

EMISIÓN ACÚSTICA, UN DIÁLOGO CON LOS MATERIALES

JOSÉ E. RUZZANTE.
MARÍA ISABEL LÓPEZ PUMAREGA

Resumen

En este trabajo se presenta el fenómeno de la Emisión Acústica (EA) en su aplicación a la Ciencia de los Materiales, la utilidad que de ella hacen distintas especies animales y un breve resumen del origen histórico del fenómeno. Posteriormente se presentan las posibles fuentes de EA. Se comentan las numerosas aplicaciones de la EA en distintas áreas del quehacer humano, finalizando con los Grupos internacionales de EA existentes y la normativa en esta área de los Ensayos No Destructivos.

Abstract

This paper presents the phenomenon of the Acoustic Emission (AE) in its application to the Materials Science, the utility of it made by different animal species and a brief summary of the historical origin of the phenomenon. Subsequently, the possible sources of AE are presented. The numerous applications of the AE in different areas of human activity are discussed, ending with the existing international EA Groups and the Standards in this area of the Non-Destructive Tests.

1. Emisión Acústica

La Emisión Acústica (EA) son las ondas elásticas (sonido audible, o no) que se genera en un material cuando se ejerce alguna acción sobre él. También se llama EA al fenómeno físico que genera las ondas. Luego, estas ondas pueden ser detectadas, dando cuenta de la existencia del fenómeno. En muchos casos la detección se realiza sin la necesidad de un equipo electrónico, tal es el caso de la rotura de un papel, vidrio o madera, en los cuales sencillamente escuchando el sonido “audible” que emiten, se infiere la rotura del material. En otros casos, la detección no es tan simple, fundamentalmente por dos razones; la intensidad de la onda es muy baja y generalmente no está en la zona audible, dependiendo fundamentalmente del material. En estos casos se requiere de equipos electrónicos que capten la señal sonora que se propaga, y la traduzcan (sensores) a una señal eléctrica equivalente para luego amplificarla y procesarla.

La EA en los sólidos es un fenómeno físico, responsable de los mecanismos de generación de las ondas elásticas y es una aplicación técnica de frecuente utilidad industrial.

El lector se dará cuenta que en esta primera parte del trabajo interpretamos a la EA en un sentido amplio como aquel fenómeno que genera ondas elásticas, viajando éstas por el medio material hasta ser detectadas y utilizadas para fines determinados.

Donald Griffin indica en su libro (*Ecos de Murciélagos y Hombres, Eudeba, Colección Ciencia Joven, 1960.*), que cuando deseamos aprender algo acerca de un tema debemos buscar un experto que pueda explicarnos el fenómeno. Luego dice que hay dos tipos de expertos, uno de ellos son los profesionales que trabajan en el tema en cuestión, mientras que el otro grupo es el que utiliza realmente el fenómeno, muy eficientemente, puesto que vive de él, desde hace siglos. Es a estos últimos a quienes vamos a interrogar para tratar de comprender el fenómeno. Con esta salvedad, estudiaremos primeramente a determinados animales que en tres medios distintos, utilizan la EA con el fin de supervivencia, resolviendo exitosamente el problema.

1.1. La lechuza

Desde la antigüedad, para el hombre, la lechuza (Fig.1) tiene un fuerte perfil simbólico, en general este depende de la cultura. En Grecia se la ve como sabia y expectante, reflexiva y caviladora, **dotada de una importante cualidad, la de ver donde nadie puede ver, en la oscuridad**, de ahí el carácter de sabia y emblema o representación de la diosa Atena que también es considerada como una personificación de la erudición. Otras culturas le atribuyen un papel negativo, esto se explica por su característica de andar de noche, ser poco o nada sociable, su vuelo silencioso y su voz lastimera (lamento de un duende), es conocida como pájaro de mal agüero por los aztecas.



Figura 1. La lechuza, experta en caza nocturna.

Cazan en zonas abiertas, cubriendo un gran terreno. Distintos estudios han demostrado que más del 95% de sus presas son pequeños ratones de campo. El rasgo anatómico más llamativo es su cara, desempeñando un papel fundamental en su supervivencia, es ancha y redonda y está cubierta de plumas rígidas y densas dispuestas en hileras muy apretadas.

Retómenos ese atributo impuesto por el hombre, la de poder ver de noche, si bien su vista es importante no es el sentido que tiene más desarrollado, éste es el oído. Descubre a su presa a través del ruido que hace al moverse. No es fácil ver un ratón de campo, ni siquiera a plena luz del día, ya que por su coloración se confunde con la de su entorno. De noche, resultan prácticamente invisibles. La lechuza localiza sonidos, con gran precisión, en dos dimensiones. Posee un amplio espectro en frecuencia de audición, de 100 Hz a 12000 Hz, sin embargo, localiza con precisión sonidos comprendidos entre 3000 Hz y 9000 Hz.

El desfase en el tiempo y la diferencia en la intensidad del sonido, proporcionan al ave información suficiente para localizar a su presa, tanto en el sentido horizontal como vertical. De nada sirven esos sonidos si no los interpreta adecuadamente, para eso cuenta con una herencia biológica y un aprendizaje adecuado. En la imagen siguiente (Fig. 2) se observa una secuencia fotográfica obtenida con luz infrarroja, el ave no es sensible al infrarrojo. (Eric I. Knudsen, *El oído de la lechuza*, *Inv. Cien. Feb. 1982*, pp. 57-68).

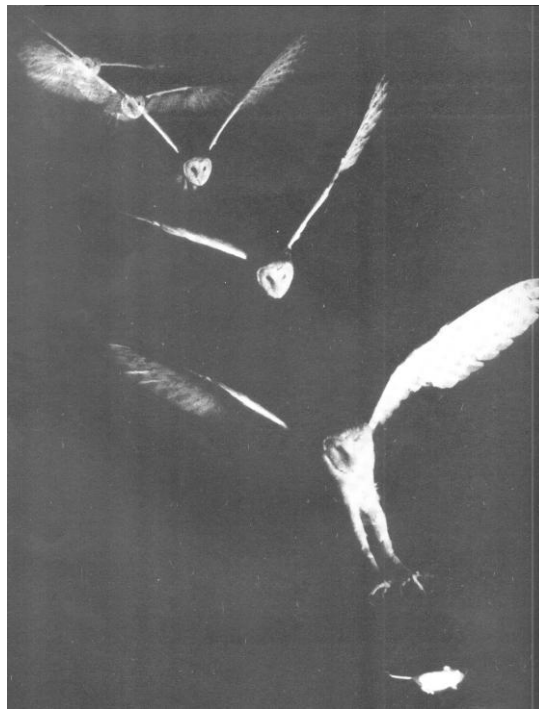


Figura 2. Secuencia fotográfica mostrando el acecho de la lechuza a un ratón de campo en plena oscuridad.

1.2. El escorpión

Es un cazador nocturno del desierto, no ve ni oye a los insectos de los que se alimenta. Para cazarlos se vale de sensores muy sensibles localizados en sus patas, con los que percibe las vibraciones que la presa genera en la arena.

Antes de continuar, es conveniente realizar algunos comentarios que nos ayudarán a comprender la situación. En los sólidos, pueden propagarse varios tipos de ondas, dependiendo de sus características y dimensiones físicas, algunas de estas ondas son

internas, llamadas de volumen, las cuales son de dos tipos: de compresión u ondas P y de corte llamadas S. Otras, sólo viajan por la superficie. Las velocidades de propagación dependen del medio, tipo de onda y en algunos casos de la geometría. En esta parte del trabajo sólo nos interesan las ondas P y las superficiales o de Rayleigh (R), más adelante veremos que será necesario introducir otras ondas. Por su característica granular se suponía que las arenas no conducían las ondas elásticas, sin embargo, se comprobó que al menos transmiten las ondas P y las R. La arena es un buen conductor de las ondas elásticas en la banda de los 0,1 kHz a los 5 kHz.

Hay que recordar que, en los sólidos, la velocidad de propagación de las ondas es mayor que en el aire, lo cual hizo suponer que el sistema nervioso del escorpión sería incapaz de detectar esas pequeñas diferencias de tiempo. Sin embargo, se comprobó que la velocidad de las ondas P en arena superficial es de sólo $120 \frac{m}{s}$, mientras que las R son aún más lentas de sólo $45 \frac{m}{s}$.

Hagamos unos cálculos sencillos. El hombre distingue perfectamente bien si un sonido procede de la derecha o de la izquierda de él. Suponiendo que el sonido es lo suficientemente intenso como para despreciar su posible atenuación, y si estimamos la distancia entre los dos oídos en 20 cm (b), luego la diferencia de tiempo de arribo en el aire, es:

$$\Delta t = \frac{b}{v} = \frac{0,20m}{330 \frac{m}{s}} = 0,0006s = 0,6ms$$

Si la fuente se encuentra justo frente a nosotros la diferencia es cero; si la desplazamos unos 10° de la perpendicular, es muchas veces ubicable, en ese caso:

$$\begin{aligned} \text{sen } \alpha &= \frac{x}{b} \therefore 0,20m \cdot \text{sen}10^\circ = 0,20m \cdot 0,173 = 0,034m \\ v &= \frac{x}{t} \therefore t = \frac{0,034m}{330 \frac{m}{s}} = 0,1ms \end{aligned}$$

En el agua, con velocidades de $1500 \frac{m}{s}$, resulta imposible la ubicación para el hombre. Luego diríamos que los tiempos estarían entre $0,6ms$ y $0,1ms$. Estimaciones biológicas dan tiempos de $0,2ms$. Siguiendo con las suposiciones, insinuamos que estos tiempos son similares en los animales. El escorpión (Fig. 3), tiene ocho patas y determinan aproximadamente un círculo de 5 centímetros de diámetro. Al igual que la lechuza, localiza el origen de la señal detectando pequeñas diferencias en el tiempo y en las amplitudes, utiliza la EA. (Philip H. Brownell, *Detección de la presa en el escorpión*, *Inv. Cien. Feb. 1985*, pp. 52-60).



Figura 3. Escorpión otro excelente usuario de la EA.

1.3. Depredadores marinos

Este es otro ejemplo de expertos (Fig. 4), en este caso en un medio líquido. Se sabe que cuando los músculos se contraen y relajan; producen “sonidos” imposibles de ser oídos por el hombre, dado que el oído humano es insensible a bajas frecuencias. La frecuencia media de los sonidos musculares es de 25 Hz, próximo al umbral de audición. Algunos tiburones sienten atracción por las frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 50 Hz, razón por lo cual se piensa que esta preferencia se debe al sonido emitido por los cardúmenes en su movimiento, así detectan y ubican los depredadores. Las frecuencias involucradas en los infrasonidos presentan baja atenuación, lo cual implica largas distancias de propagación. (Gerald Oster, *Sonidos musculares, Inv. Cien., Feb. 1984, pp. 74-83*). De lo expuesto se ve que la EA es ampliamente usada en la naturaleza por diferentes especies, en el aire, la tierra y el agua.



Figura 4. Tiburón experto en EA en el agua.

2. Antecedentes de la EA en el hombre

Es posible que se conozca vulgarmente a la EA y se la utilice desde hace mucho tiempo, por ejemplo por la relación entre la rotura de un tronco y el sonido generado, o bien la rotura o quiebre de cerámicos o vidrios.

El primer documento escrito sobre la EA en metales se debe a **Abu Mūsa Yābir ibn Hayyan** (Fig. 5), llamado por los europeos por su nombre latinizado **Geber**. Desarrolló sus trabajos en el territorio que en la actualidad es Irak (721-815). En su memoria un cráter de la luna lleva su nombre. Es considerado el máximo alquimista de origen árabe. Sus libros influyeron notablemente en los alquimistas europeos. Se le atribuye la paternidad de un gran número de instrumentos de laboratorio. En su libro “*Summa Perfectionis Magisterio*”, escribe que Júpiter (estaño) emite un fuerte sonido o ruido, cuando es deformado, y también describe algo similar con Marte (hierro), cuando es enfriado luego de la forja (Tulio A. Palacios, *Antecedentes históricos de la Emisión Acústica en Latinoamérica, http://www.cnea.gov.ar/cac/glea/trabajos/palacios.pdf 2001*). Esta sería, también la primera evidencia documentada entre la deformación de un metal y la EA.



Figura 5. Abu Mūsa Yābir ibn Hayyan, Irak (721-815).

Unos cuantos años después, el metalurgista italiano **Vannoccio Biringuccio** (Fig. 5), encargado en 1540 de la prestigiosa fundición artística del Vaticano y contemporáneo de Leonardo Da Vinci, fue considerado por algunos como el padre de la industria de la fundición. Escribió el libro *“De la Pirotecniá”*. En él menciona las aleaciones de plomo y estaño, diciendo que el ruido que emiten (cuando son deformadas) es una forma de reconocerlas, agrega que ésto ocurre más con el estaño que con otros metales. Esa es la primera evidencia donde se menciona una utilidad práctica de la EA. El libro también contiene la primera descripción del método para aislar antimonio.



Figura 6. Vannoccio Biringuccio, metalurgista de la fundición del Vaticano (1540).

Pasando al continente americano, el sacerdote español **Álvaro Alonso Barba**, (Fig. 7), adquirió una destacada experiencia en el Alto Perú sobre el beneficio de la plata. Reunió sus conocimientos en un libro llamado el *“El Arte de los Metales”*, cuya primera edición aparece en Madrid en 1640. En él escribe un capítulo dedicado a la caracterización de los metales, al referirse al estaño, expresa: **“... Se produce un estridor cuando se lo muerde o quiebra ...”**. Este fenómeno es un ejemplo emblemático de la EA pre-científica, conocido como **“grito del estaño”**, sonido producido por este material al deformarlo. Esta propiedad fue utilizada en el pasado, por ejemplo para determinar si una moneda era falsa (en general se les agregaba estaño), deformándola al morderla: si generaba un sonido o una vibración en los dientes indicaría su falsedad. Este sonido o vibración es producido por un fenómeno llamado maclado que produce abundante EA.



Figura 7. Sacerdote español Álvaro Alonso Barba.

Como sucede en la mayoría de las disciplinas científicas, el fenómeno en cuestión se inicia históricamente con aplicaciones populares del mismo, sin tener una explicación formal, en una etapa denominada pre-científica. Posteriormente comienza un estudio con una actitud específica, conocer más sobre el fenómeno, descubrir sus fundamentos y propiedades, iniciándose con esta acción la etapa científica. La EA no escapa a este comportamiento.

Muchos textos a finales del siglo XIX se referían a la emisión audible generada por materiales como el estaño, hierro, el cadmio y el zinc.

Una correlación notable entre los diferentes metales y su EA vino del químico polaco **Jan Czochralski** en 1916 (Fig. 8). Es el creador del proceso que lleva su nombre para la fabricación de monocristales.



Figura 8. Jan Czochralski (1916).

En 1920 **Abram Joffe**, destacado físico ruso (Fig. 9), observó el ruido generado por el proceso de **deformación de cristales de sal y de zinc**. Notó que el proceso de deformación al corte de cristales de sal de roca y en monocristales de cinc progresaba a pequeños saltos, cada uno de ellos acompañado de un ruido.



Figura 9. Abram Joffe físico ruso (1920).

Albert Portevin y François Le Chatelier en 1923 (Fig. 10), observaron la EA de una aleación Al-Cu-Mn deformándola.

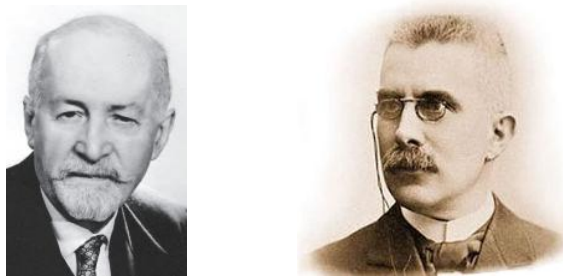


Figura 10. Albert Portevin y François Le Chatelier.

En Alemania, **Erich Schell** en 1929 informaba que la formación de **martensita en los aceros**, era acompañada por "un claro ruido audible, cuyo sonido era similar al bien conocido grito del estaño".

Por su parte **P. W. Bridgman** de los Estados Unidos en 1935 y en 1937 (Fig. 11), observó que algunos metales y muchos no metales sometidos a cargas de compresión, lo hacían de manera ruidosa, con diferentes sonidos que se superponían con el fenómeno de la fluencia plástica.

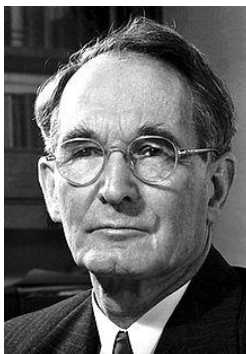


Figura 11. P. W. Bridgman prestigioso metalurgista estadounidense.

En el año 1933, en Japón, **Kishinoue** estudió la emisión de ondas elásticas de una **varilla de madera**, cuando se la sometía a una **tensión flexural**, utilizando como transductor (sensor) una cápsula de fonógrafo.

Se observa así, cómo a lo largo del tiempo se amplió el conjunto de materiales donde se detectaba el fenómeno de la EA. (Drouillard, T.F.A *History of Acoustic Emission, Journal of Acoustic Emission, vol. 14, N°1, 1996, pp. 1-34*).

2.1. Se inicia la etapa científica de la EA

Hasta aquí se extiende la etapa "auditiva", se escucha con el "simple oído", pero en 1950 se inicia la etapa científico-tecnológica con una tesis doctoral. Se suele identificar como hito histórico que determina a la EA como una disciplina científica, al trabajo que desarrolló en 1950 en Alemania, **Joseph Kaiser** (Fig. 12) en su Tesis doctoral: "Estudios del Fenómeno Acústico en Ensayos de Tracción". Sin embargo, el trabajo no tuvo una gran relevancia hasta la década siguiente, en la cual se realizaron las primeras aplicaciones industriales en plantas petroquímicas en EE UU América en 1967 (T.F Drouillillard, "*Introduction to Acoustic Emission Technology, Part I: History of Acoustic Emission Research*", *Nondestructive*



Figura 12. Joseph Kaiser, exponiendo su tesis sobre EA.

Cuando uno observa el avance de la EA a lo largo del tiempo, parecería que la etapa científica debería haberse dado antes del 1950 (o bien del 1933). Sin embargo, integrando este fenómeno con los desarrollos encontrados en disciplinas imprescindibles para la EA, vemos posibles justificaciones. Antes de 1880, año en el cual **Pierrri Curie** y su hermano **Jacques** descubren el efecto piezoeléctrico, era casi imposible generar y recepcionar señales de alta frecuencia. La primera aplicación concreta del fenómeno, fue realizada por **Paul Langevin** en 1917 para la detección de submarinos. Recién en 1921, J. Valasek descubre la ferroelectricidad en la sal de Rochelle. Aclaremos que la ferroelectricidad es el fenómeno fundamental para la construcción de sensores de EA. También debemos resaltar que las señales de EA son por lo general de baja intensidad, lo que significa que deben ser amplificadas.

La primera válvula de vacío, diodo, fue inventada en 1904 por J. A. Fleming, mientras que el triodo que puede ser usado como amplificador apareció en 1912. Por tanto, la fecha más adecuada como inicio de la etapa científica de la EA podría ser la de los trabajos en madera del japonés **Kishinoue** 1933, sin embargo, no sabemos si éstos están lo suficientemente fundamentados como los de **J. Kaiser**. También debemos recordar que gran parte de la década del 40 fue convulsionada por la 2° guerra mundial. Parecería también, que el tiempo transcurrido hasta el primer ensayo industrial (1969) fue demasiado extenso, en esta ocasión la técnica no necesitaba de ningún otro aporte, pero recordemos que ese periodo fue febril en satélites y viajes a la luna.

2.2. La EA en Argentina

El inicio de las actividades en EA en Argentina lo realizó el Dr. Roberto Pascual, en el Centro Atómico Bariloche de la Comisión Nacional de Energía Atómica en el año 1971, construyendo los sensores y amplificadores necesarios.

En ocasión de publicarse: "The status of Acoustic Emission in Argentina" (J. E. Ruzzante, M. I. López Pumarega, R. Piotrkowski, Insight, ISSN: 1354-2575, Vol. 46, No. 12, pp. 733-735, December 2004), el Dr. Patricio Laura de la Universidad Nacional del Sur nos informó, con razón, que existía una publicación de EA anterior a 1971 cuyos autores son P.A.A. Laura, H. Vanderveldt, P.Gaffner, "Detection of Structural Failure of Mechanical

Cables” (The Journal of Acoustic Society of America, Vol.45 (3), 791-793. 1969), trabajo realizado en EE UU.

A fines de la década del 70 inicia sus actividades un nuevo grupo de EA en el Centro Atómico Constituyentes, Departamento de Ensayos No Destructivos (END), continuando su actividad en la actualidad en ICES, también del Centro Atómico Constituyentes.

2.3. Similitud, pero no tanto

Salvando las dimensiones involucradas, la sismología, como técnica, es equivalente a la Emisión Acústica. Las dos tienen como uno de los objetivos básico detectar y ubicar fuentes que generan ondas elásticas,

Para detectar y ubicar la posición de las fuentes que generan los movimientos sísmicos se instalan en lugares adecuados de la superficie de la tierra “estaciones sísmicas” que no son más que sensores para traducen los movimientos sísmicos en ondas eléctricas equivalentes. Determinando la diferencia de tiempo en que arriban las ondas sísmicas a las distintas estaciones es posible, conociendo la velocidad de la onda sísmicos, ubicar la posición de la fuente emisora (esta técnica se la conoce como triangulación).

Vemos que además de las dimensiones, hay otra diferencia entre Emisión Acústica y la Sismología, es la frecuencia de la señal producida por la fuente, en el caso de la sismología es del orden de los pocos ciclos por segundo. Esto nos permite “escuchar”, sentir con el cuerpo las vibraciones. En el caso de la Emisión Acústica las frecuencias involucradas son generalmente mucho más elevadas, aproximadamente 70Khz, esto nos imposibilita escucharlas con los oídos.

3. Señales de EA

En general se habla de dos tipos de señales de EA; una continua y otra, tipo explosión (“burst”) que contiene una importante cantidad de componentes armónicos. La continua, tipo “ruido”, es generalmente producida por las pérdidas de fluidos en tubos o válvulas; mientras que la discreta es ocasionada por deformación plástica o fraturación. Seguidamente se muestran las graficas de ambas (Fig. 13).

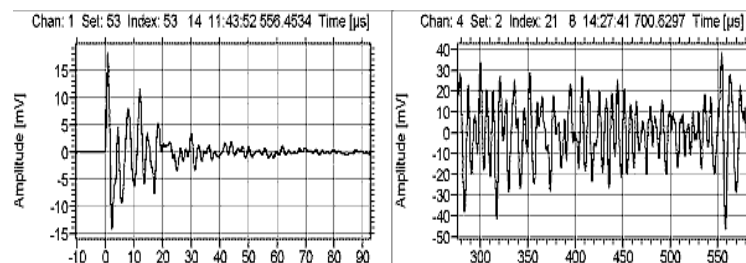


Figura 13. Señales de EA, discreta y continua, respectivamente.

En la Fig. 14 podemos observar una sucesión de eventos o “burst” o “hits”.

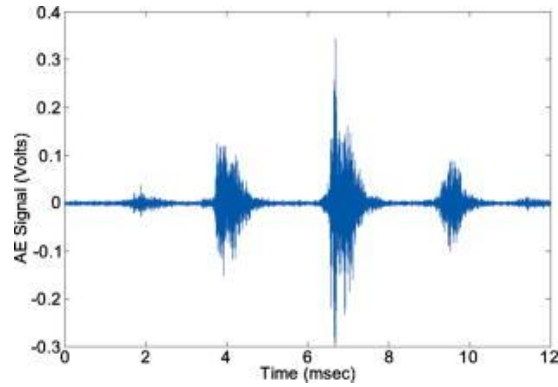


Figura 14. Sucesión de señales discretas (“hits” , “bursts”) de EA.

En la actualidad estas señales pueden ser fácilmente digitalizadas y almacenadas en una PC, para su posterior tratamiento y análisis. Sin embargo, por diversas razones, en muchos casos no se justifica digitalizar todas las señales (generalmente en ensayos industriales), sólo basta con parametrizarlas, perdiendo así información, pero ganando tiempo de procesamiento y espacio de almacenamiento.

Los parámetros característicos de la EA están típicamente definidos para señales tipo explosión y algunos pueden extenderse a las señales continuas. Los parámetros característicos típicos de la EA, definidos en la literatura y en las Normas son:

✓ **Tiempo de ocurrencia (“hit time”)**: es el “tiempo de llegada”, instante en el cual se considera que comienza el “hit”. Esto ocurre cuando la señal supera el **umbral**, que es un valor determinado por el operador de modo que sea mayor al ruido existente. Así el Tiempo de ocurrencia dependerá del valor del umbral.

✓ **Duración (D)**: es el tiempo transcurrido desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que lo hace por última vez. Depende de la magnitud de la fuente, del tipo y forma del espécimen, de las características del sensor utilizado y del valor del umbral.

✓ **Tiempo de subida (“rise time”)**: es el tiempo desde que la señal cruza el umbral, hasta que alcanza su amplitud máxima. Está condicionado por la dispersión de la onda en su viaje entre la fuente y el sensor. Depende, también del umbral.

✓ **Número de Cuentas (N, “ring down counting”)**: es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral. Históricamente fue uno de los primeros parámetros de EA usados, debido a su facilidad de implementación electrónica, también depende del umbral.

✓ **Energía MARSE**: es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada (“Measured Area under Rectified Signal Envelope”). Esta parametrización no depende del umbral, pero sí de la Amplitud y la Duración de la señal.

✓ **Valor cuadrático medio o RMS (“Root Mean Square”)**: este valor se calcula mediante la ecuación:

$$V_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t)]^2 dt\right)}$$

Donde V es el voltaje a la salida del sensor. Sirve también para EA continua.

✓ **Energía eléctrica**: se define como

$$E_s = \frac{1}{R} \int [V(t)]^2 dt$$

Con V , voltaje a la salida del sensor y R una resistencia de referencia.

✓ **Frecuencia Media:** se define como el cociente entre el Número de Cuentas y la Duración del “hit”:

$$f_m = \frac{\text{número de cuentas}}{\text{duración}} = \frac{N}{D}$$

✓ **Amplitud máxima o Amplitud:** es el valor máximo de la amplitud de la señal de EA. Este valor está relacionado con la magnitud de la fuente y las propiedades del material. En general se expresa en dB_{EA} , dado que la variación de la intensidad de la señal puede abarcar varios órdenes de magnitud. Ha sido uno de los primeros parámetros utilizados para estudiar los fenómenos de EA. También este parámetro es uno de los pocos útiles en la descripción de señales de tipo continuo. No depende del umbral.

La definición de los dB de EA, llamados dB_{EA} , es particular para este método, y está referida a una señal de $1\mu\text{V}$ a la salida del sensor de EA. Un dB_{EA} se define como:

$$\text{dB}_{EA} = 20 \log \left(\frac{V_s}{1\mu\text{V}} \right)$$

donde V_s es el voltaje de la señal medido a la salida del sensor.

En el esquema de la Fig. 15, se observan algunos de los parámetros definidos anteriormente.

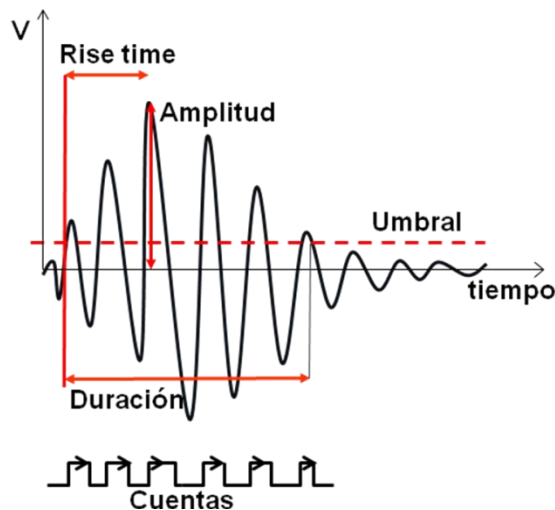


Figura 15. Algunos de los parámetros definidos previamente

3.1. Trabajo de J. Kaiser

Joseph Kaiser realizó su trabajo en EA durante la deformación uniaxial de una probeta de hierro. En el esquema de la Fig. 16 se observa una configuración similar a la usada por Kaiser para el estudio de la EA. Durante la deformación también uso un hierro de bajo carbono.

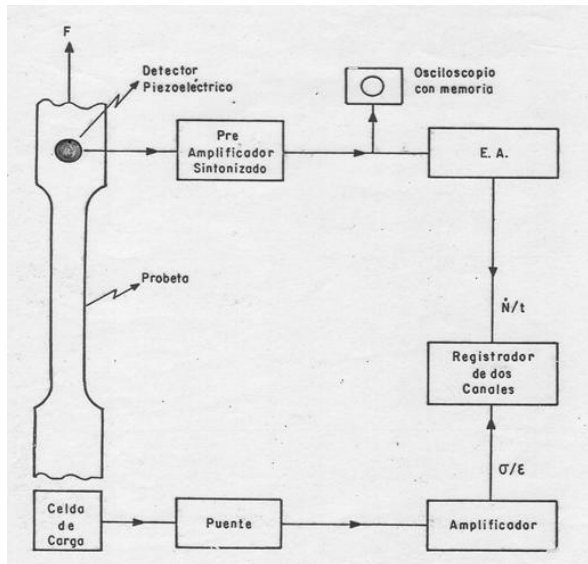


Figura 16. Esquema de un ensayo de tracción uniaxial siguiendo su evolución con medición de EA.

Se observa que el sensor fue colocado en el "hombro" de la probeta con el objeto de evitar el deslizamiento del material respecto del sensor, lo que generaría ruido. Con \dot{N} se simboliza la cantidad de pulsos o eventos generados en la unidad de tiempo Fig. 17). Luego se registra simultáneamente la tensión/deformación mecánica y el número de eventos

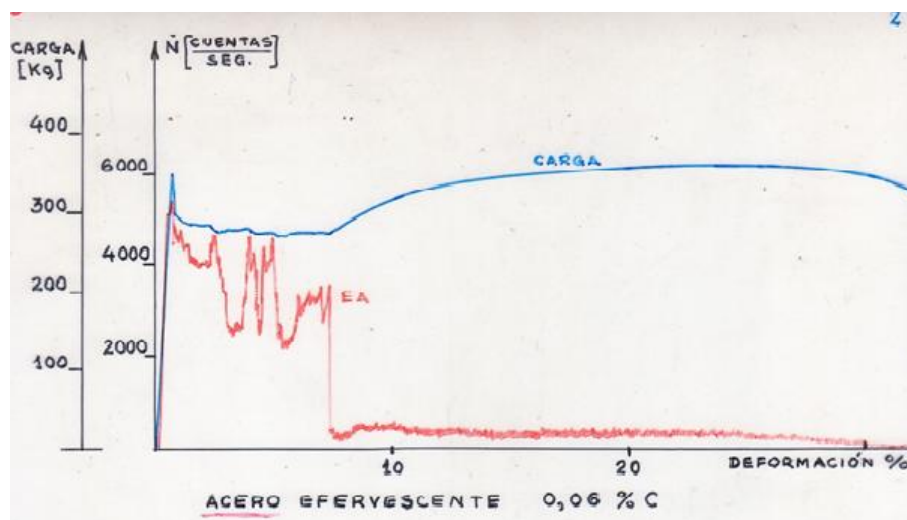


Figura 17. Registro tensión deformación, (azul) y EA (rojo)

La gráfica de la figura muestra los resultados experimentales al traccionar un acero de bajo carbono, se observa que la EA se inicia simultáneamente con la zona elástica, llegando a valores máximos en la zona de deformación homogénea. Cuando se accede a la banda de deformación homogénea, los valores de EA son menores, pero no nulos, produciéndose un pico de emisión en la rotura (que no está mostrado en la gráfica).

En zona de Luder se insinúan picos o aumentos de EA en las caídas de la tensión mecánica. Dicho de otro modo, cuando el material resiste, la EA disminuye. Este fenómeno es visualizado más claramente en la gráfica de la Fig.18, donde se muestra solamente un detalle de la zona de deformación inhomogénea El registro fue obtenido con un "plotter" lo cual justifica el adelanto de la EA respecto a la tensión mecánica. Este comportamiento explica el origen de la EA en este tipo de material. Al caer la tensión se genera una nueva banda de

Luder o bien se destraban o generan dislocaciones. En ambos casos el rápido movimiento de dislocaciones es el responsable de los picos de EA.



Figura 18. Detalle de la zona de deformación inhomogénea, en un acero de bajo C.

Debemos tratar de explicar la importante EA en la zona elástica de la deformación. Tengamos en cuenta que aquí también hay movimiento reversible de dislocaciones y por otro lado estamos en presencia de un material ferromagnético con propiedades estrictivas y como se verá más adelante, este fenómeno genera ondas elásticas.

Continuando con el trabajo de J. Kaiser, se comentó anteriormente el esquema experimental utilizado Fig. 16 similar al empleado por nosotros. En este caso Kaiser descargó la máquina de tracción al finalizar la zona de Luder, para luego cargarla nuevamente. Por supuesto el material descarga por una recta paralela a la elástica, observando la aparición de la EA recién cuando se llega a valores de tensión similares a los de la descarga. Este fenómeno observado por primera vez por Kaiser lleva su nombre, **efecto Kaiser**. Es totalmente coherente con las explicaciones sobre el origen de la EA dadas anteriormente. En el esquema de la Fig.19 se visualiza el efecto Kaiser.

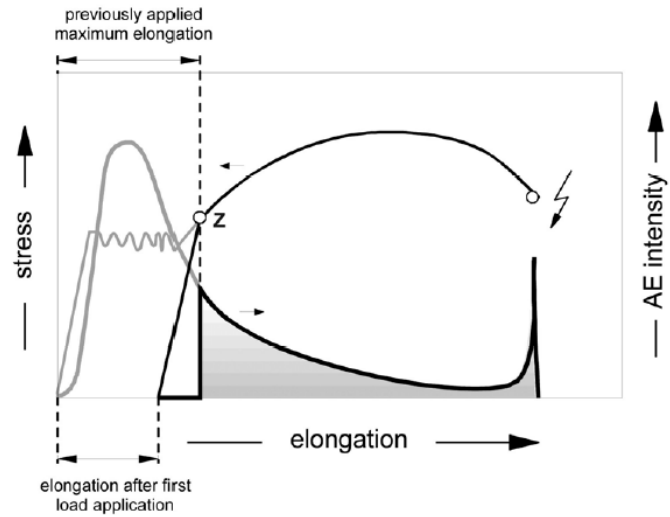


Figura 19. Esquema donde se evidencia el efecto Kaiser.

3.2. Modelado de la señal de EA

La señal de EA puede ser representada por una sucesión de “bursts” separados en el tiempo, y de amplitud aleatoria, mediante la expresión

$$s(t) = \sum_i A_i V(t - t_i)$$

donde A_i es la amplitud del i -ésimo “burst”, t_i es el tiempo de ocurrencia y $V(t)$ es la forma supuesta para cada evento. Uno de estos modelos es el que considera a $V(t)$ igual a:

$$V(t) = A_1 e^{-ct} \sin(\omega t + \alpha) \quad \text{con } t > 0$$

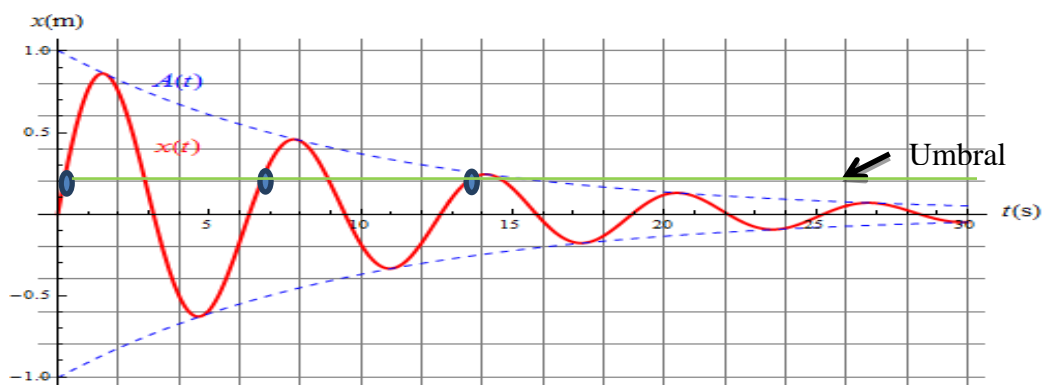


Figura 20. Modelo de una señal de EA donde se muestra el umbral (color verde).

En la Fig. 20 se observa la función $V(t)$, el umbral establecido y los puntos donde corta a la función, siendo N =Número de cuentas. Tratemos de encontrar el número de cuentas en función de los datos del modelo. Llamando t_0 a la duración del evento y T al período de la oscilación, decimos que el número de cuentas es:

$$N = \frac{t_0}{T} = \frac{t_0 \omega}{2\pi}$$

Luego reemplazando en $V(t)$:

$$\frac{V(t_0)}{A_1} = e^{(-ct_0)} \sin(\omega t_0 + \alpha) = e^{(-c \frac{2\pi N}{\omega})} \sin\left(\omega \frac{2\pi N}{\omega} + \alpha\right)$$

$$N = \frac{\omega}{2\pi c} \ln \frac{A_1}{V(t_0)}$$

El Número de Cuentas depende de la frecuencia del sensor, del amortiguamiento del sensor, de la forma de la estructura y también del umbral. Este modelo presenta el inconveniente de tener un "Rise-Time" igual a cero. Luego es posible utilizar la función anterior multiplicada por un factor polinomial

$$V(t) = kt^b e^{(-ct)} \sin(\omega t + \alpha)$$

Donde b es un entero positivo y k una constante.

3.3. Energía, Número de Cuentas y rms

Recordando que la energía eléctrica de una señal desarrollada en una carga R es:

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V^2(t) dt$$

Reemplazando en esta expresión la forma de un hit de EA:

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V^2(t) dt = E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} A_1^2 e^{(-2ct)} \sin^2(\omega t) dt =$$

Integrando en el intervalo $(0, t_0)$ donde t_0 es la duración del hit, se obtiene:

$$-\frac{2A_1^2}{4R(c^2 + \omega^2)} [e^{-2ct}(c \sin(\omega t) + \omega \cos(\omega t)) \sin(\omega t)] - \frac{2\omega^2 A_1^2}{4Rc(c^2 + \omega^2)} [e^{-ct}]_0^{t_0} =$$

$$= -\frac{A_1^2}{4R(c^2 + \omega^2)} [e^{(-2ct)} \sin(\omega t) (2c \sin(\omega t) + 2\omega \cos(\omega t))] + \frac{\omega^2 A_1^2}{4Rc(c^2 + \omega^2)} (1 - e^{(-2ct)})$$

si $e^{(-2ct)} \ll 1$:

$$E \approx \frac{\omega^2 A_1^2}{4Rc(c^2 + \omega^2)}$$

Recordando que:

$$N = \frac{\omega}{2\pi c} \ln \frac{A_1}{V(t_0)}$$

luego:

$$A_1 = V(t_0) e^{\frac{2\pi N c}{\omega}} \rightarrow E \approx \frac{\omega^2 (V(t_0))^2 e^{\frac{4\pi N c}{\omega}}}{4Rc(c^2 + \omega^2)}$$

Si ω , c y R son constantes, N nos provee una indicación sobre la energía de la señal.

De igual manera como $E = \frac{1}{R} \int_0^{t_0} V^2(t) dt = \frac{1}{R} (V_{rms})^2$ luego V_{rms} también nos daría información sobre la energía.

3.4. Fisuras y EA

Las fisuras, inclusiones y otras discontinuidades en los materiales son concentradores de las tensiones. En la punta de la fisura las tensiones pueden exceder el nivel de tensión de fluencia produciendo deformación plástica. Por tal motivo las grietas activas en los metales, pueden ser reveladas por la detección de EA generada por la deformación plástica alrededor de la fisura, ver la Fig. 21 (Juan E. Pérez Ipiña, *Mecánica de fractura, Librería Editorial Alsina, 2004*).

En el extremo de una fisura el estado de tensiones, bajo ciertas condiciones, está controlado por un único parámetro K , denominado **Factor de Intensidad de Tensiones**. Si prevalecen las condiciones de linealidad y plasticidad reducida el Factor de Intensidad de Tensiones es solo función de la carga y geometría y puede ser calculado. (Luis A. de Vedia, *Mecánica de Fractura, monografía tecnológica N°1 CNEA, 1986*) a grieta comienza a crecer, (es activa desde el punto de vista de la EA), cuando el K alcanza un valor crítico K_{Ic} llamado **tenacidad a la fractura**. Este valor puede ser evaluado experimentalmente. Luego para prevenir el crecimiento de la fisura se debe cumplir que $K < K_{Ic}$. El tamaño de una zona de plástico puede evaluarse usando el factor de intensidad de tensión k_I para el modo I de apertura de una fisura

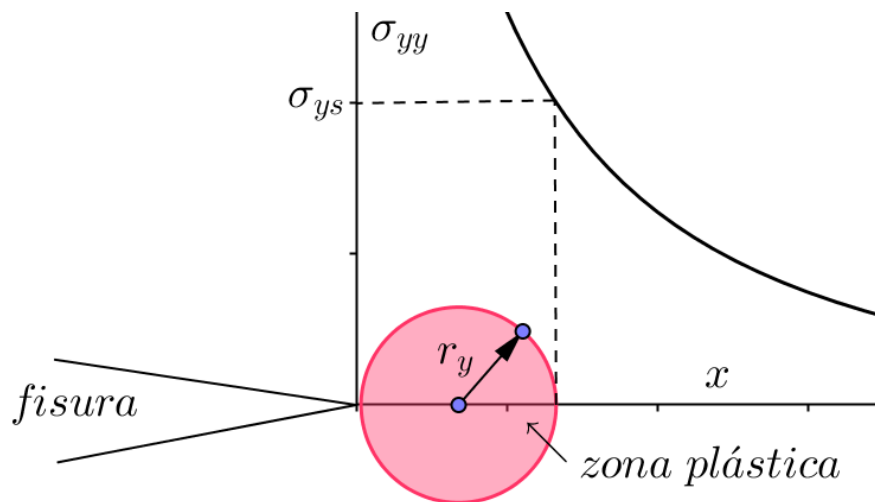


Figura 21. Esquema que muestra la propagación de una fisura.

Si r_y es el radio plástico dado por:

$$r_y = \frac{1}{\alpha\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

Para un estado plano de tensiones $\alpha = 2$, ó $\alpha = 6$ para un estado plano de deformación. Asumiendo que la AE es proporcional al tamaño de la zona de deformación plástica:

$$N \propto V_p$$

donde V_p es el volumen deformado entre ϵ_y , que es la deformación de fluencia y ϵ_u que es la deformación uniforme. (Paul McIntire, editor, *Nondestructive testing handbook, vol. 5, ASNT, 1987*):

$$V_p \sim \pi(r_y^2 - r_u^2)B$$

$$V_p = \pi B \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{E\epsilon_y} \right)^2 \right]^2 - \pi B \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{E\epsilon_u} \right)^2 \right]^2 = \frac{B}{4\pi} \left[\frac{\epsilon_u^4 - \epsilon_y^4}{4\pi(E\epsilon_u\epsilon_y)} \right] K_I^4$$

con $\alpha = 2$ y B espesor de la chapa, por tanto:

$$V_p \propto K_I^4$$

Luego:

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt} \propto \dot{V}_p$$

y

$$N \propto K_I^4$$

Pese a las importantes aproximaciones supuestas, los datos experimentales coinciden bastante bien con los teóricos.

3.5. Modo de fractura y tipo de "hit"

Para correlacionar el comportamiento de la fisura con los parámetros de AE en diferentes materiales, es beneficioso discriminar los distintos modos de fisuras. Para este propósito sólo se consideran dos modos típicos: Modo I: tipo de tracción y Modo II: tipo de corte (ver Fig.22). Generalmente cuando el material está bajo carga, aparece inicialmente la fractura de modo I (tipo de tracción) y el modo II (tipo de cizallamiento), se hace dominante cuando se aproxima a la rotura.



Figura 22. Dos posibles modos de rotura.

Cuando los lados de la grieta se alejan uno de otro, causando un cambio volumétrico transitorio (modo I), se produce un "hit". Como consecuencia, la mayor parte de la energía se genera como ondas longitudinales (onda P), con una pequeña componente de ondas de corte (onda S). Por lo tanto, la mayor parte de la energía viaja con la velocidad de las ondas P, lo que genera un (RT) pequeño y una duración corta como se muestra en la Fig.23.

En el caso de una grieta de corte, la forma del material cerca de la vecindad de la grieta cambia y la proporción de energía generada cambia a favor de las ondas s, que viajan más

lentamente que las p. Por lo tanto, la parte más importante de la forma de onda llega mucho más tarde que las ondas longitudinales. Como resultado, el tiempo de subida y la duración de la señal AE es más largo como se muestra en la Fig. 22.

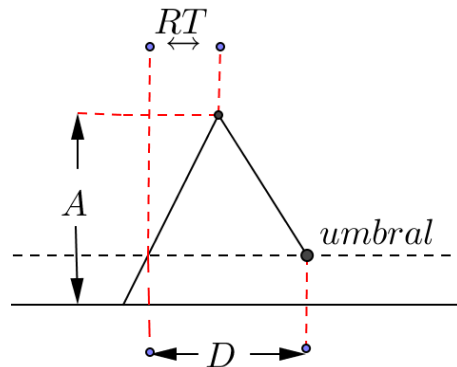


Figura 23. Esquema que muestra un RT pequeño.

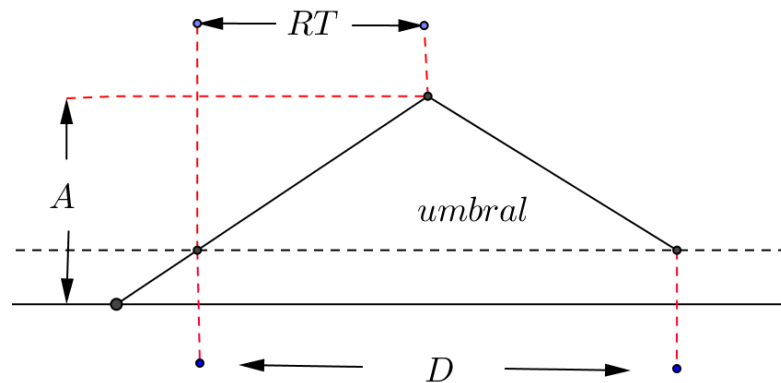


Figura 24. Por el contrario, aquí tenemos un RT y una duración mayor.

3.6. Parámetros que definen el “hit”

La determinación de los “hits” es realizada por el equipo electrónico automáticamente. Para tal fin es necesario definir e introducir en la electrónica del sistema una serie de parámetros que posibilitan su correcta medición. Usaremos sus nombres en inglés ya que su uso es habitual en este idioma.

- ✓ **HDT**, “Hit Definition Time”.

Permite al sistema determinar el final del evento (“hit”) y cerrar el proceso de medición, almacenando los parámetros medidos de la señal. Este tiempo comienza a transcurrir luego de que la señal se ubicó por última vez debajo del umbral. Los parámetros se pueden observar en la Fig.25.

- ✓ **HLT**, “Hit Lockout Time”.

Después de finalizar el tiempo HDT, el equipo espera hasta que finalice el tiempo HLT (tiempo de bloqueo), en este punto el equipo se restablece y está listo para adquirir

un nuevo hit. El tiempo HLT evita que el equipo trate a una reflexión de la primera señal, como una nueva señal de EA, siendo en realidad parte de la misma.

✓ **PDT**, “Peak Definition Time”.

Cuando la amplitud de la señal alcanza un máximo y comienza a declinar, se contabiliza el máximo de Amplitud, y se espera un tiempo adicional (PDT), para ver si durante ese tiempo se sobrepasa la amplitud anterior. Si es así, la medición continúa. Si no hay señal de Amplitud más alta, dentro del tiempo PDT, ese último valor se define como la Amplitud del “hit”.

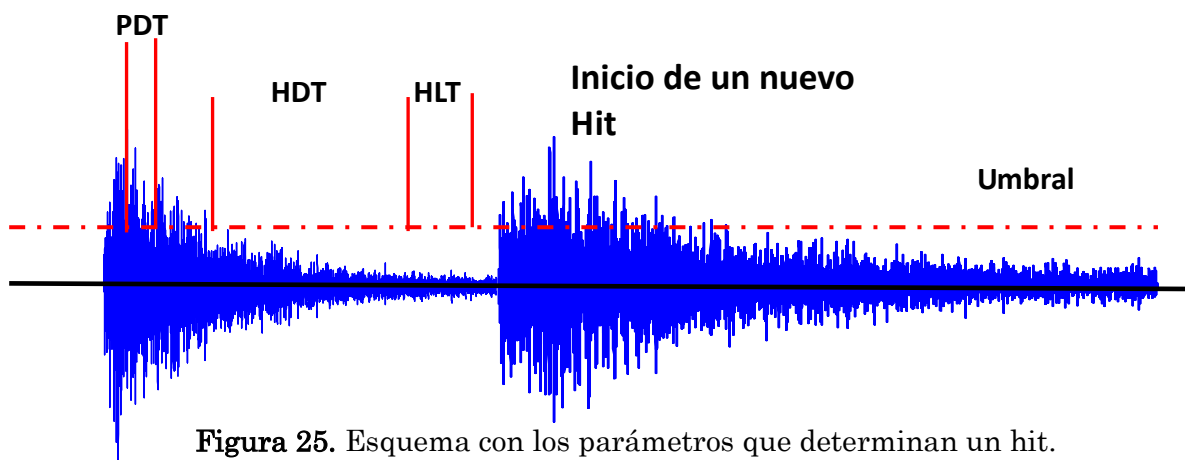


Figura 25. Esquema con los parámetros que determinan un hit.

3.7. Localización de fuentes de EA

El caso de la localización de fuentes en una dimensión (1 D) es el más simple de todos ya que solo necesitamos como mínimo dos sensores. Varios métodos pueden ser aplicados para determinar fisuras o pérdidas en tuberías o gasoductos, considerados como 1 D, para tal fin es conveniente distinguir entre fisuras no pasantes y pérdidas. Si bien los algoritmos de localización son relativamente simples de aplicar y en muchos casos pueden ser resueltos a “mano”. Por otro lado, introduciendo en la computadora la geometría de la estructura que se está analizando, ésta ubica e indica durante el ensayo, en el monitor, la localización de la fisura

✓ **Fisuras en tubos**

Las fisuras o grietas activas en caños al ser presurizadas por arriba de la presión de trabajo generan “hits” que se propagan por la tubería llegando a los sensores. El equipo electrónico se encarga de determinar la diferencia de tiempo de arribo a los sensores, ya que los eventos son limitados, tienen principio y fin. Con este dato conociendo la ubicación de los sensores y la velocidad de propagación de la onda, es factible ubicar la posición de la grieta o fisura activa (ver Fig. 26).

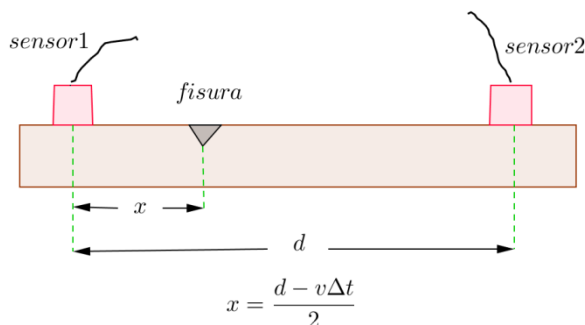


Figura 26. Esquema que muestra un tubo con una fisura activa.

✓ **Localización con un solo sensor**

En algunos casos es posible utilizar un solo sensor para evaluar la posición la fuente de AE (pero no la dirección). Lo principal de esta localización se basa en la desigual velocidad de propagación de los diferentes modos de onda. Tal método de localización se puede usar en varillas cortas, tubos, cuando la detección y separación de modos puede ser realizada de manera efectiva, aunque en general no es simple.

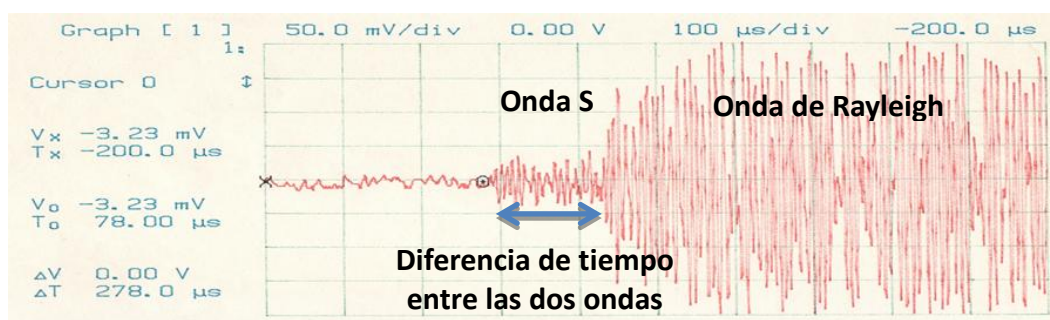


Figura 27. Se muestra la diferencia de tiempo entre la onda P y S

✓ **Localización por atenuación de la energía**

Al propagarse la onda en un medio cualquiera, va perdiendo energía. La ley que determina esta pérdida de energía es:

$$E_i = E_0 e^{-\beta|x_i - x_0|}$$

Tomando logaritmos y suponiendo que se trabaja con tres sensores, se ve que no es necesario conocer β , con dos sensores, sí debemos conocer la atenuación:

$$\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) / \ln\left(\frac{E_2}{E_3}\right) = \frac{|x_1 - x_0| - |x_2 - x_0|}{|x_2 - x_0| - |x_3 - x_0|}$$

$$\frac{\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}{\ln\left(\frac{E_2}{E_3}\right)} = \frac{|x_1 - x_0| - |x_2 - x_0|}{|x_2 - x_0| - |x_3 - x_0|}$$

La Fig.28 indica el significado de cada término de la expresión matemática.

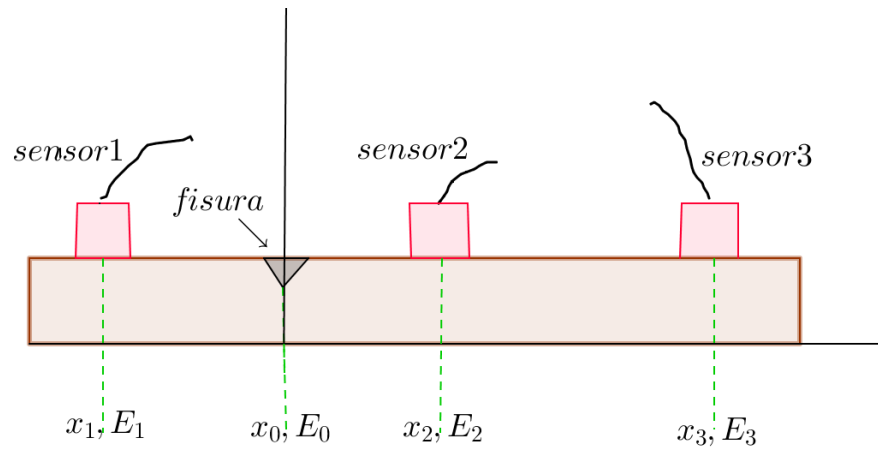


Figura 28. En el esquema se muestra el significado de cada término.

✓ **Tubería con una pérdida**

En este caso, la pérdida genera una onda continua y el equipamiento no distingue el comienzo del fin de la señal. Con esta situación, la correlación cruzada es otro método para la localización de fuentes de AE, basada también en la estimación de la diferencia de tiempo de arribo entre señales AE detectadas por diferentes sensores (ver Fig. 29).

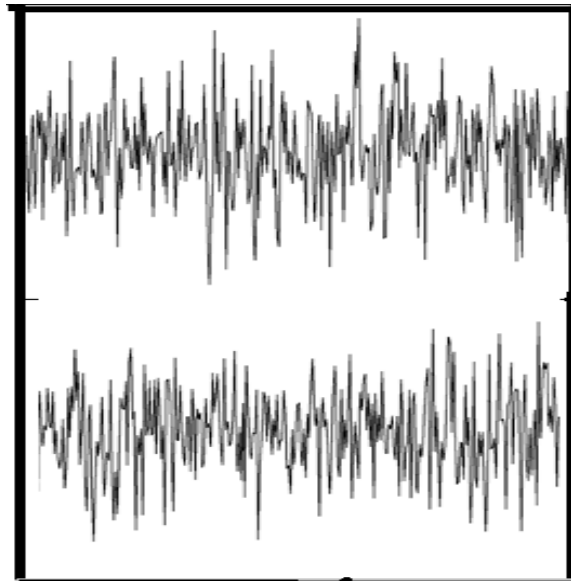


Figura 29. Se observan dos señales continuas recibidas en dos sensores, generadas por una misma pérdida.

Dicho de otro modo, cuánto deben desplazarse en el tiempo estas dos ondas para que la coincidencia entre ellas sea la máxima posible. Este razonamiento es llevado a cabo por la expresión siguiente

$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau)S_2(\tau + t)d\tau$$

La diferencia de tiempo entre una y otra señal está dada por el máximo valor de la integral.

✓ Localización de fuentes de EA en 2 D

La metodología para hallar fuentes (fisuras activas) en 2 D y 3 D, es similar, la diferencia radica en el número de sensores empleados en cada caso. En el plano, como mínimo se necesitan tres sensores. Los casos más simples son aquellos en los cuales la geometría del recipiente donde se desea hallar la posible fisura es desarrollable en un plano, panificable. Comenzaremos por este caso y a modo de anécdota comentaremos una metodología desarrollada para otro fin por el geómetra Griego Apolonio de Perge (nace 262 a. C.). Él propuso y además resolvió, el problema de hallar la circunferencia tangente a otras tres circunferencias dadas, problema conocido como el problema de Apolonio.

Para ilustrar el procedimiento supongamos tener tres sensores ubicados en las posiciones como muestra la Fig. 30. Con el permiso de Apolonio utilizamos un sistema Cartesiano para facilitar la interpretación y asumimos una versión libre del problema.

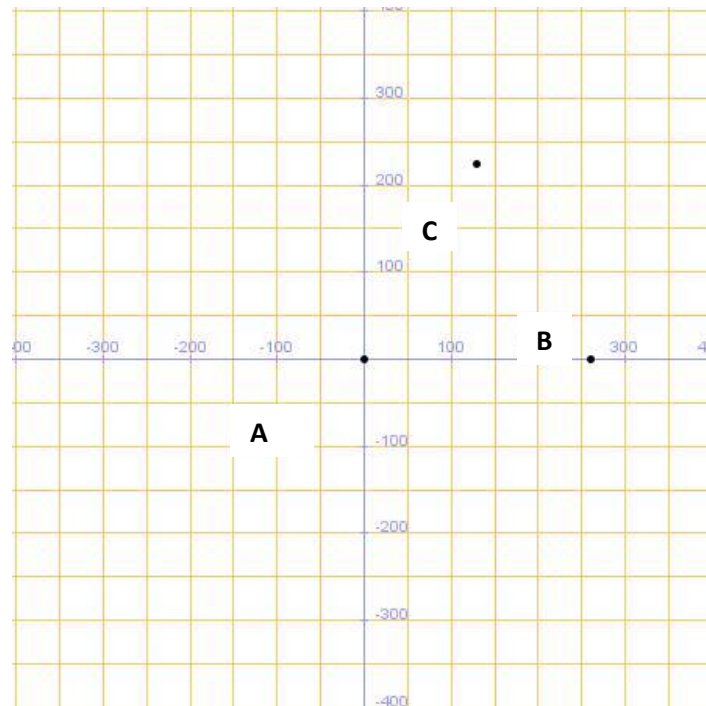


Figura 30. Ubicación de los sensores, método de Apolonio.

Supongamos que el primer sensor de estos tres, golpeado por la onda, es el C, con los diferentes tiempos de arribo medidos $\Delta t_{AC}=569.28\mu s$ y $\Delta t_{BC}=669.65\mu s$. Luego, se dibujan circunferencias con centro en los sensores y cuyos radios se calculan teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la onda, en este caso $0.324\text{cm}/\mu s$, y los Δt , o sea: $569.28\mu s \times 0.324\text{cm}/\mu s=184.4\text{cm}$, el otro valor se halla de igual manera,

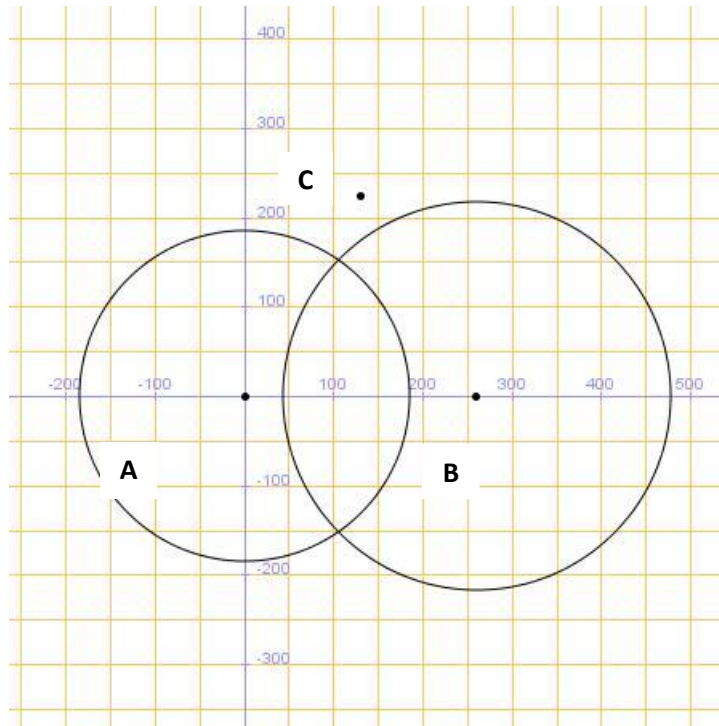


Figura 31. Circunferencias con centro en los sensores.

Se traza la circunferencia tangente a las otras dos ya dibujadas y que pase por el sensor C. En el centro de esa nueva circunferencia se encuentra la fuente.

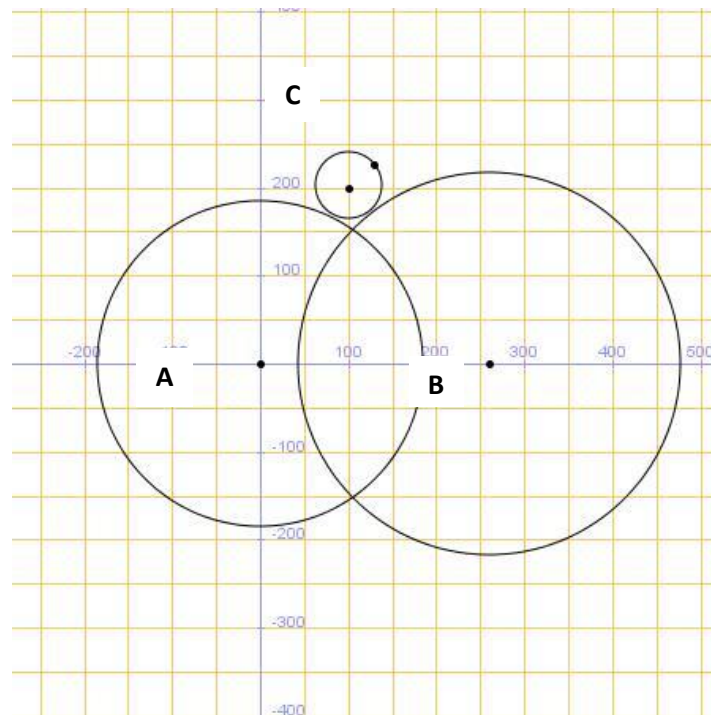


Figura 32. Tercera circunferencia tangente a las otras dos, en cuyo centro está la fuente de EA.

✓ **Uno de los Métodos Algebraicos**

En este caso trabajaremos con cuatro sensores que se hallan en las posiciones A (a_1, b_1), B (a_2, b_2), C (a_3, b_3), D (a_4, b_4),

Planteamos las cuatro ecuaciones de circunferencias con centro en cada uno de los sensores y cuyo radio es la distancia a la fuente:

$$(V T_1)^2 = (x - a_1)^2 + (y - b_1)^2$$

$$(V T_2)^2 = (x - a_2)^2 + (y - b_2)^2$$

$$(V T_3)^2 = (x - a_3)^2 + (y - b_3)^2$$

$$(V T_4)^2 = (x - a_4)^2 + (y - b_4)^2$$

donde V es la velocidad de la onda elástica y T es el tiempo que emplea la perturbación para ir desde la fuente al sensor correspondiente. Como el equipo nos da la diferencia de tiempo de arribo $\Delta t_{21} = T_2 - T_1$. Restando las ecuaciones y trabajando sobre ellas se llega a:

$$2(a_1 - a_2)x + 2(b_1 - b_2)y - 2V^2 \Delta t_{21} T_1 - V^2 (\Delta t_{21})^2 + a_2^2 - a_1^2 + b_2^2 - b_1^2 = 0$$

$$2(a_1 - a_3)x + 2(b_1 - b_3)y - 2V^2 \Delta t_{31} T_1 - V^2 (\Delta t_{31})^2 + a_3^2 - a_1^2 + b_3^2 - b_1^2 = 0$$

$$2(a_1 - a_4)x + 2(b_1 - b_4)y - 2V^2 \Delta t_{41} T_1 - V^2 (\Delta t_{41})^2 + a_4^2 - a_1^2 + b_4^2 - b_1^2 = 0$$

Llegamos a un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas x, y, T_1 , que es fácilmente resoluble. La Posición de los sensores es:

$$A = (100, 200) \quad B = (300, 200) \quad C = (200, 500) \quad D = (400, 500)$$

Y las Diferencias de tiempo de arribo:

$$\Delta t_{AB} = 0.1 \mu s, \quad \Delta t_{AC} = 182 \mu s, \quad \Delta t_{AD} = 435 \mu s$$

Luego se escribe la ecuación, reemplazado las constantes:

$$2(100-300)x + 2(200-200)y - 2(324)^2 0.1 T_1 - (324)^2 0.1^2 + 300^2 - 100^2 + 200^2 - 200^2 = 0$$

$$2(100-200)x + 2(200-500)y - 2(324)^2 182 T_1 - (324)^2 182^2 + 200^2 - 100^2 + 500^2 - 200^2 = 0$$

$$2(100-400)x + 2(200-500)y - 2(324)^2 435 T_1 - (324)^2 435^2 + 400^2 - 100^2 + 500^2 - 200^2 = 0$$

La solución que da el programa es:

$$x = 199.9 \quad y = 299.2$$

✓ Velocidad Práctica

Un parámetro necesario para la localización de la fuente es la “velocidad práctica” (real). La velocidad práctica puede establecerse experimentalmente, con o sin considerar diferentes modos de propagación de la onda. Cuando los modos de propagación están mezclados, el error en la evaluación de la ubicación de la fuente de AE puede ser significativo. Por ejemplo, en localización lineal puede ser alrededor del 10% del espaciamiento de los sensores.

Trabajar efectivamente con un modo de propagación, puede mejorar significativamente la precisión de la ubicación. Sin embargo, la detección y separación de los diferentes modos de onda, es complejo o imposible en el caso de geometrías complejas o bajo condiciones de ruido de fondo alto y variable.

Cuando más sensores detectan las ondas AE de una fuente, mejor se realiza la ubicación de la misma. Es posible utilizar esta información para mejorar la precisión de la ubicación mediante métodos de optimización.

✓ **Uso de las curvas de dispersión**

Las curvas de dispersión pueden utilizarse eficazmente para mejorar la precisión de localización de las fuentes de AE.

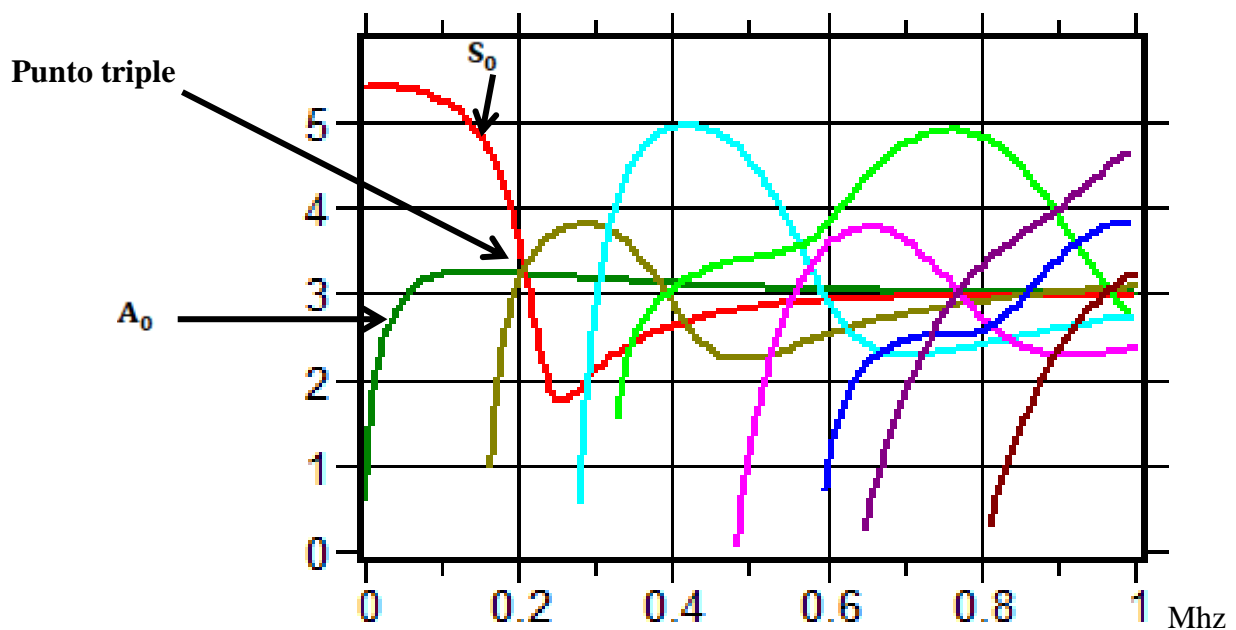


Figura 33. Curvas de dispersión mostrando la velocidad de propagación en función de la frecuencia.

Filtrando las ondas de AE en la frecuencia del punto triple (200 kHz), se puede mejorar la precisión de la ubicación. Esto se debe a que todos los modos, a esta frecuencia, tienen una velocidad similar, y el umbral de detección será activado por el mismo modo de onda en todos los sensores.

Localización en Medios Anisótropos

En materiales anisótropos, la velocidad de propagación de las ondas es diferente en las distintas direcciones. Para conseguir resultados apropiados en la localización de la fuente, es necesario evaluar el perfil de velocidad como una función de

la dirección de propagación e incorporar ésto en el cálculo. Esta metodología es de fundamental importancia en los materiales compuestos. En la Fig. 34 se observan las superficies de las velocidades según la dirección de propagación para Cadmio-Telurio.

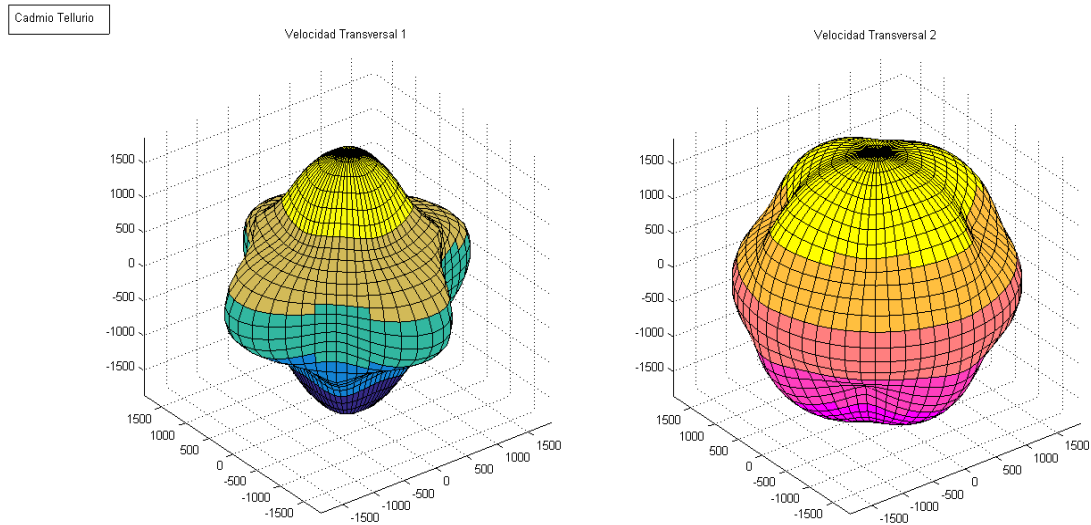


Figura 34. Diagramas que muestran la inhomogeneidad de la velocidad con la dirección de propagación, para el caso del Cadmio-Telurio.

✓ Localización zonal

En muchos ensayos industriales no es necesario conocer con exactitud la ubicación de la fuente. En estos casos, con indicar la “zona” donde se encuentra la fisura (Localización zonal) es suficiente y más aún, por ejemplo, en el caso de tubos de GNC basta con saber que tiene una fisura para descartarlo. En la Fig. 35 se indica la posición de tres sensores, es claro que con saber el orden de arribo de las ondas elásticas a cada uno de ellos, podemos determinar la zona donde se encuentran las fuentes de EA. Si la señal llega primero al sensor A y luego al B y posteriormente al C, la zona ABC es donde se encuentra la fuente (triángulo en rojo).

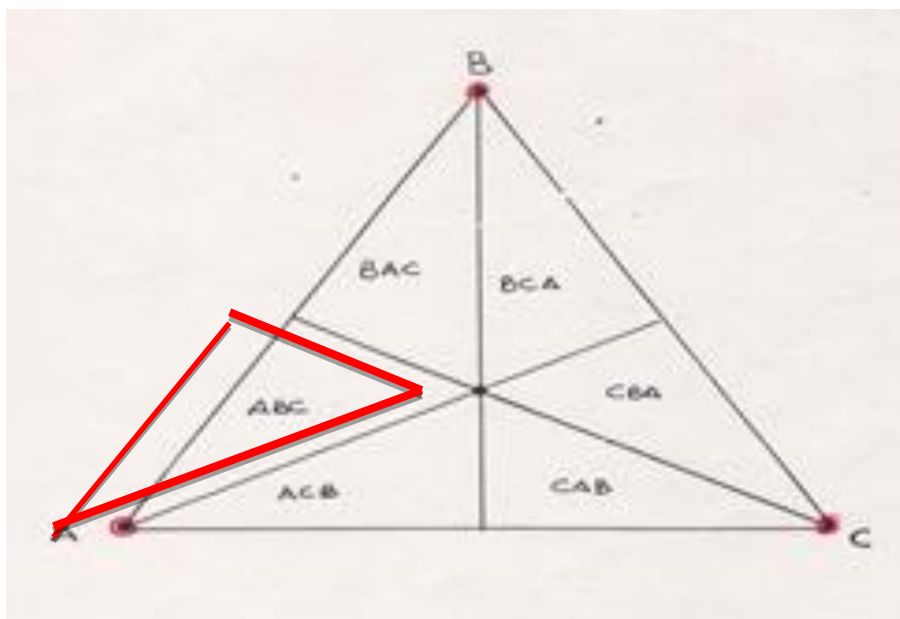


Figura 35. Los tres sensores están ubicados en los puntos A, B y C. El triángulo rojo indica la zona correspondiente al arribo de orden ABC.

En la Fig. 36, vemos otro caso con mayor cantidad de sensores.

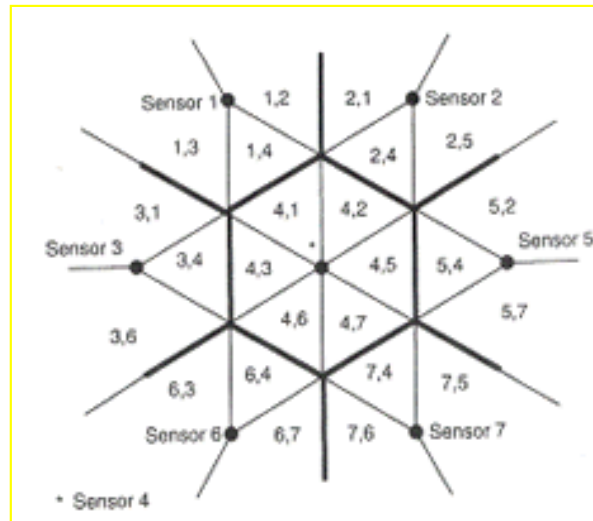


Figura 36. La misma idea anterior con mayor cantidad de sensores.

✓ Caso de esferas

Si bien la esfera es un cuerpo no desplegable en un plano, se pueden obtener desarrollos aproximados de la misma, como los usados para construirla con superposición de superficies planas (ejemplo: pelota de fútbol, la tierra en un plano geográfico, etc.). Si fuera desarrollable fácilmente, la podríamos introducir en la computadora para que un algoritmo apropiado ubicara las fuentes. No obstante, este no es un inconveniente ya podemos aproximarla a una figura geométrica desarrollable o bien trabajar en coordenadas esféricas y representar las fuentes sobre la misma. Una alternativa es aproximación a la esfera con un icosaedro que es un poliedro de veinte caras, formadas por triángulos equiláteros iguales entre sí. El icosaedro es desarrollable y se aproxima a una esfera (Fig. 37 y Fig. 38).

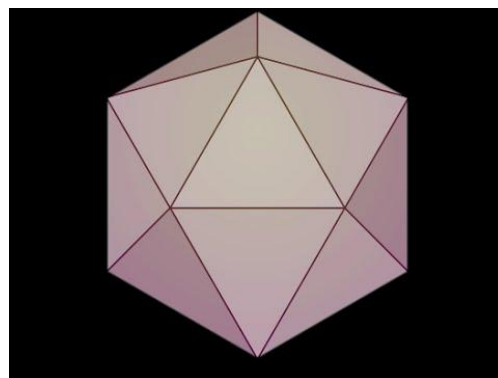


Figura 37. Icosaedro.

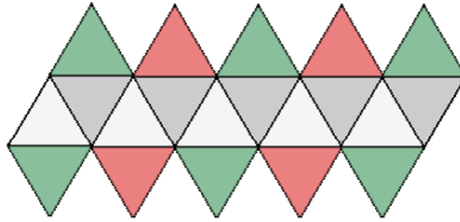


Figura 38. Desarrollo de un icosaedro.

En la Fig. 37 se observa el esquema introducido en la PC para realizar un ensayo de EA en una esfera, aproximada con un icosaedro y empleando 8 sensores. También en la Fig. 40, se puede ver la representación dada por un equipo comercial, de las fuentes, directamente indicadas sobre la esfera.

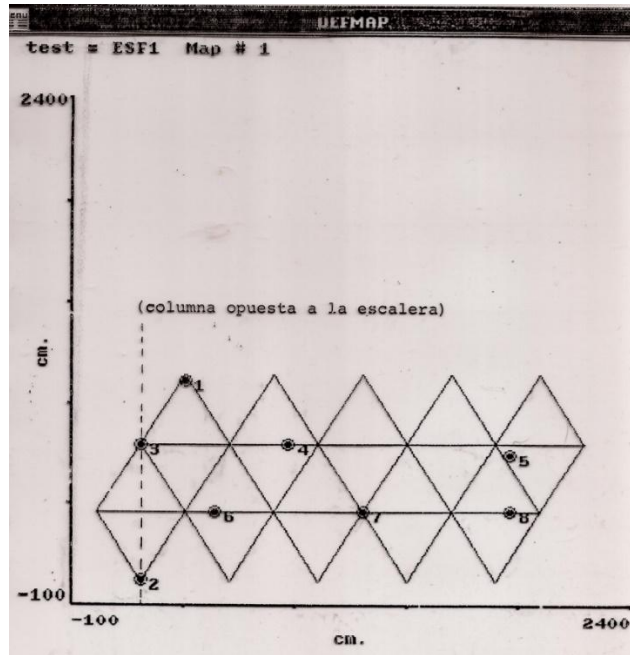


Figura 39. Desarrollo del icosaedro y la ubicación de los sensores

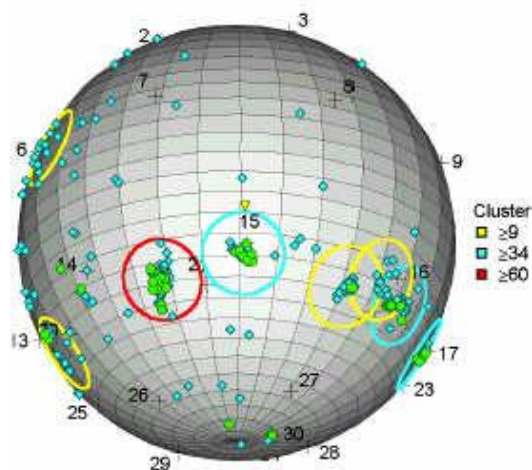


Figura 40. Representación de las fuentes de EA sobre una esfera.

3.8. Algunas aplicaciones industriales de la EA

La EA se aplica industrialmente, por ejemplo, para la determinación de pérdidas y fisuras activas. Seguidamente se muestran algunos casos. En la Fig.41 observamos una tubería aislada térmicamente, con temperatura del orden de 300°C, en la cual se debió instalar el sensor de EA por medio de una guía de onda ya que los sensores piezoeléctricos a temperaturas altas se despolarizan dejando de funcionar.



Figura 41. Se observa un sensor de EA con su guía de onda a temperatura de 300°C.

Seguidamente en la Fig. 42 se distinguen los preparativos para realizar un ensayo de EA en tuberías de 30cm de diámetro que transportan petróleo (YPF), en Las Heras, Prov. de Santa Cruz, Argentina.



Figura 42. Preparativos para la realización de un ensayo de EA en una tubería.

Se instaló un sensor aproximadamente cada 100 m. Seguidamente en la Fig. 43 se observa la verificación y calibración de los distintos canales, mediante la rotura de la mina de un lápiz, y en la Fig. 44, se ven los distintos preamplificadores utilizados.



Figura 43. Verificación del buen funcionamiento de los canales de EA, mediante la rotura de la mina de lápiz.

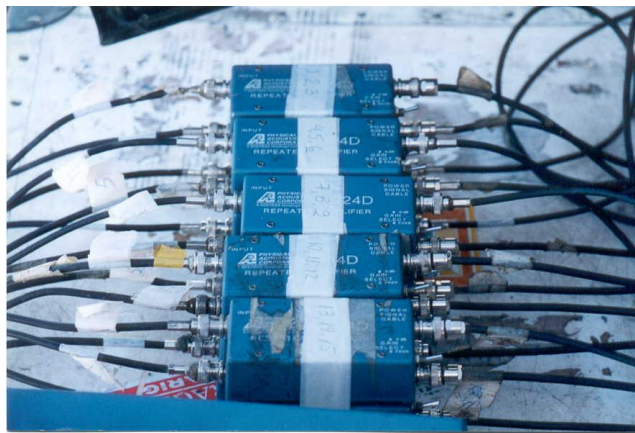


Figura 44. Los distintos preamplificadores de EA.

El sistema se presurizó por arriba de la presión de trabajo para determinar la posible existencia de fisuras activas.

3.9. Algunas aplicaciones de laboratorio de la EA

Seguidamente se presentan algunas aplicaciones de la EA a escala de laboratorio o planta.

En la Fig.45, se muestra la vista de un diagrama en bloque y el equipo Fig. 43 para ensayos a rotura de tubos de tubos de Zircaloy 4 para uso en centrales nucleares.

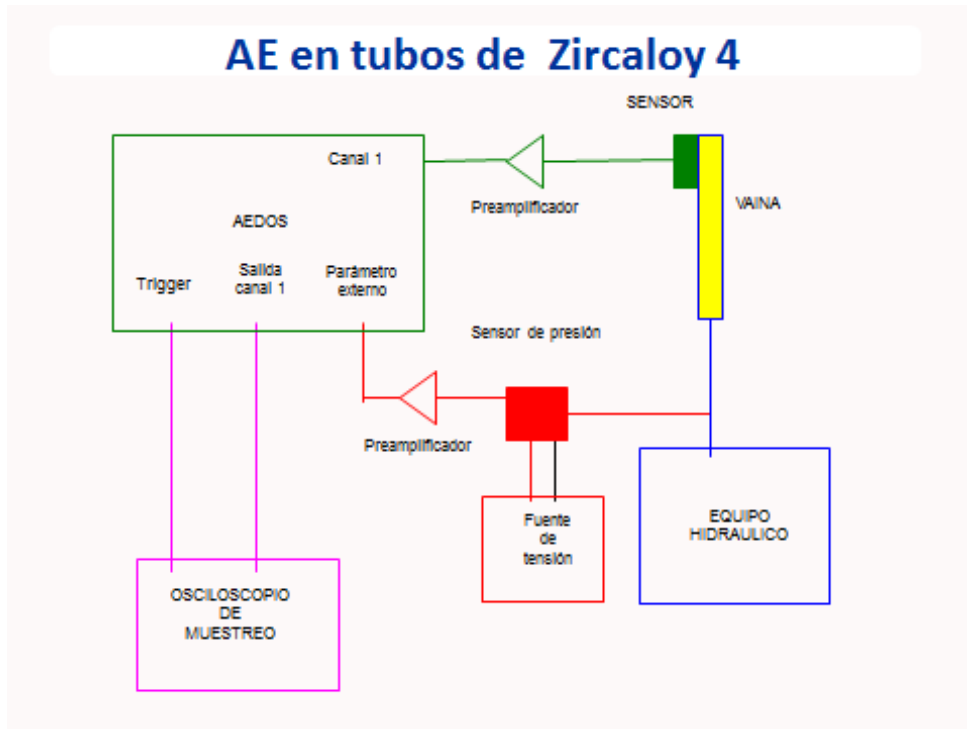


Figura 45. Diagrama en bloque de un sistema monitoreado con EA, para presurizar a rotura tubos de Zry.



Figura 46. Sistema hidráulico construido y central de presurización.

En la Fig. 47, vemos la fotografía de un tubo de Zry (Zircaloy) llevado hasta la rotura,



Figura 47. Fotografía de un tubo de Zry llevado hasta la rotura.

Como otra aplicación del uso de la EA, se muestra el ensayo de adherencia de recubrimientos llamado “**scratch test**”. En este ensayo una punta de diamante se hace deslizar sobre el recubrimiento a ensayar, simultáneamente se carga la punta hasta la rotura del recubrimiento. Todo el este procedimiento es seguido con un sensor de EA, permitiendo encontrar la carga a la cual ya se rompió todo el recubrimiento.

En la Fig. 48 vemos un equipo de laboratorio construido para este fin y una vista de la probeta con el sensor de EA.

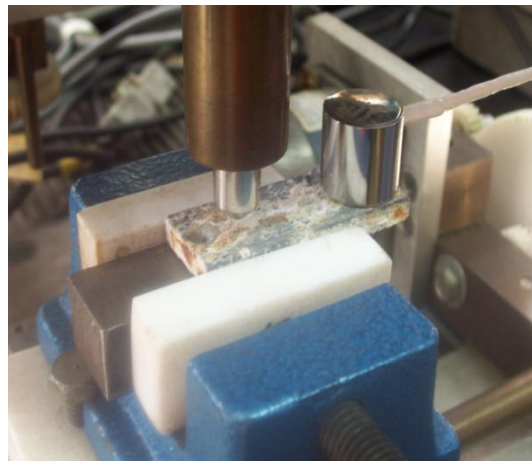


Figura 48. Vista del equipo de “**scratch test**” y detalle de la probeta con el sensor de EA.

Seguidamente en la Fig. 49 se observa el trazo que deja la punta de diamante sobre dos recubrimientos distintos.

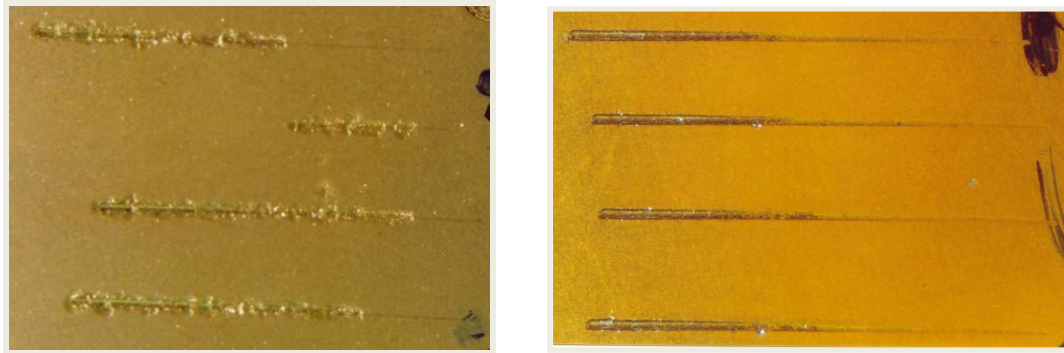


Figura 49. Se observa el trazo que deja la punta de diamante sobre las probetas con diferentes recubrimientos.

3.10. Algunas aplicaciones de la EA en Geofísica.

Hace unos años, el ICES inició la primera aplicación de la EA con fines de investigación en geofísica, concretamente en el volcán Peteroa. Este Volcán activo se encuentra en la provincia de Mendoza, próximo a la ciudad de Malargüe, compartido con Chile por su ubicación fronteriza. La idea es detectar pequeños cambios de tensión elástica que generen EA y relacionarlos con posibles erupciones del volcán. El primer equipamiento de EA instalado fue provisto por Italia, realizándose la comunicación por teléfono satelital. Las fotos siguientes muestran la ubicación del Peteroa (Fig. 50) y la primera instalación realizada en la base del volcán (Fig. 51).



Figura 50. Ubicación del Volcán Peteroa, en Malargüe, Mendoza, Argentina.



Figura 51. Primera estación de monitoreo volcánico, Peteroa, Malargüe, Mendoza, Argentina.

En el esquema que se observa en la Fig. 52, se ejemplifica la primitiva instalación para la medición de EA realizada en el Peteroa.

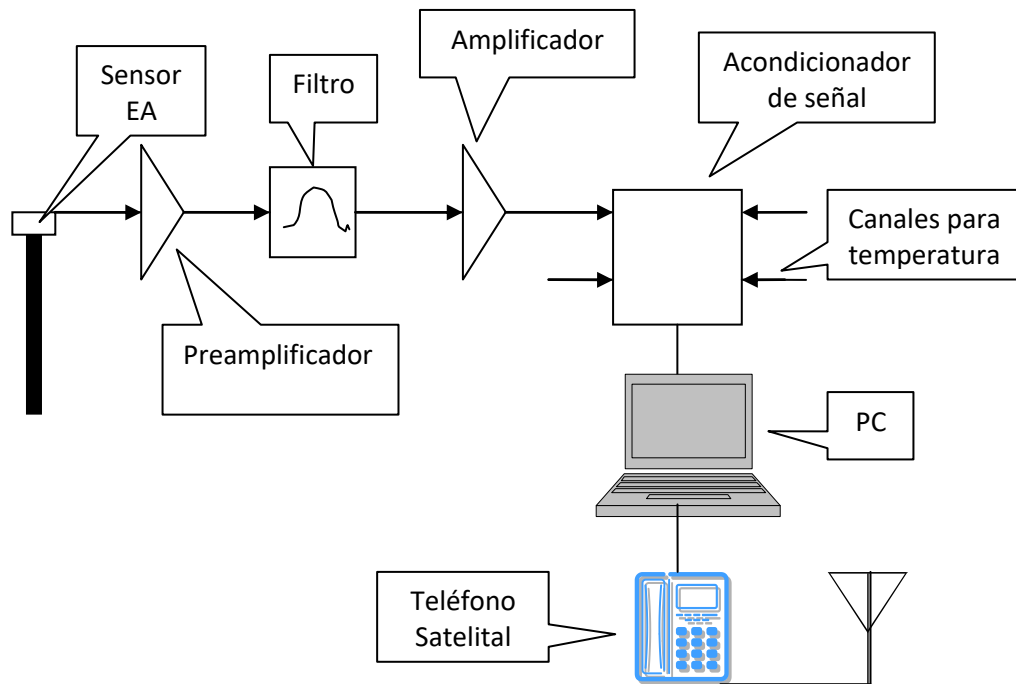


Figura 52. Esquema del primitivo sistema de monitoreo en el volcán Peteroa, Malargüe, Mendoza, Argentina.

Las imágenes siguientes muestran el estado actual de la estación, donde se ha agregado más instrumental y cámaras de video para la vigilancia volcánica. En la actualidad la comunicación es continua y permanente via internet, por medio de una antena satelital parabólica allí instalada, así las imágenes del volcán pueden ser vistas en Buenos Aires en tiempo real.



Fig.52. Estado actual de la estación instalada en el Volcán Peteroa, Malargüe, Mendoza, Argentina.

Seguidamente mencionaremos otra posible aplicación de la EA en geofísica, aunque no totalmente resuelta, por varios inconvenientes. Existen varios métodos para estimar las tensiones de una roca in-situ a partir de muestras de probetas extraídas de la roca, en profundidad. Una de estas posibilidades consiste en usar el llamado efecto Kaiser (EK) o “memoria de tensiones” de las rocas, es decir la habilidad de acumular, retener, y bajo ciertas condiciones, reproducir información de las tensiones experimentadas en el pasado. Esto es esencialmente debido al daño irreversible acumulado en la roca cuando está sujeta a cargas, como ya fue comentado. La deformación irreversible de las rocas está acompañada por el EK que involucra la EA. La actividad de EA se incrementa dramáticamente cuando se excede el máximo nivel de tensión experimentado previamente. El EK puede ser considerado la base de las mediciones de tensión en rocas. Este fenómeno es caracterizado por su complejidad y es la razón de la discusión en los procedimientos de interpretación de los datos. Para la correcta aplicación del EK para la medición de tensiones, hay que comprender cabalmente el rol del estado triaxial de tensiones en la formación de la “memoria” de la roca.

3.11. Emisión Magneto Acústica

En 1919 Heinrich Georg Barkhausen, verificó experimentalmente el movimiento de los dominios magnéticos predicho anteriormente. El movimiento de las paredes de los dominios magnéticos de un metal ferromagnético, producido por la excitación de una corriente eléctrica lentamente variable, genera una tensión eléctrica detectable por una pequeña bobina sensora colocada sobre la superficie. Esta señal eléctrica filtrada y amplificada es denominada Ruido Barkhausen (RB). De manera similar este movimiento (magneto estricción) también genera una onda, pero en este caso elástica (mecánica) que es detectada con un equipo de EA, la llamamos Emisión Magneto Acústica (EMA). El RB es utilizado como ensayo no-destructivo, dando información sobre el estado del material ferromagnético. La EMA aún no tiene aplicaciones concretas en la industria. En el esquema de la Fig.54 observamos una implementación para detectar RB y EMA de laboratorio. Posteriormente en la Fig. 55 se observa una señal de RB.

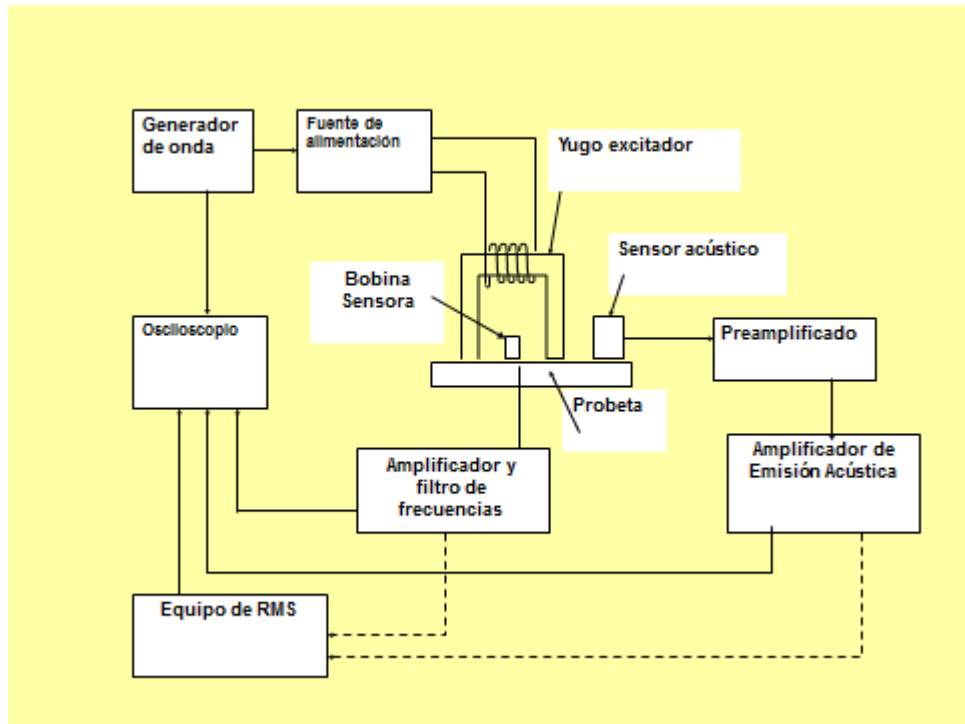


Figura 54. Implementación en laboratorio, para detectar RB y EMA

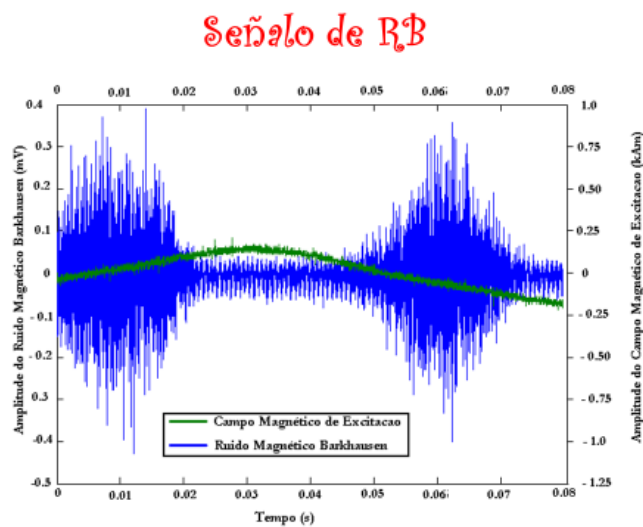


Figura 55. Señal sinusoidal de excitación magnética (color verde) y superpuesta la señal de RB (color azul).

4. La EA en el mundo

A continuación, se verá cómo fueron evolucionando las actividades relacionadas con la EA en las distintas regiones del mundo.

4.1 Grupos Internacionales en el Área de la EA

Pocos años después del inicio de los estudios, investigaciones y aplicaciones de la nueva técnica de EA, sus especialistas, técnicos y usuarios en varias partes del mundo, comenzaron a organizarse. Así en EEUU se creó en 1967, el “Acoustic Emission Working Group, AEWG”, para reunir a los investigadores y usuarios de la EA, centralizar la información, compatibilizar la terminología y las técnicas experimentales, y compilar e intercambiar experiencias. Su primer Encuentro fue en 1968. En Japón comenzó a reunirse en 1969 el “Japanese Committee on Acoustic Emission (JCAE)”. Por otro lado, Europa comenzó la organización de la comunidad usuaria de la EA en 1972, con la “Physics Conference on Acoustic Emission” en Londres, allí se creó el “European Working Group on Acoustic Emission, EWGAE”. Todos estos Grupos periódicamente organizan Congresos Internacionales donde se presentan los últimos trabajos de investigación, desarrollo y aplicaciones de la EA.

Durante el año 1997 en Argentina, en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se creó, al principio con investigadores argentinos y brasileros, el “**Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, GLEA**”, luego se fueron incorporando investigadores de toda América. Los objetivos del GLEA son puramente científicos y tecnológicos: promover, desarrollar, investigar, realizar reuniones, en temas de EA, y fomentar la incorporación de nuevos adherentes estudiosos de estos temas. La participación en el GLEA es absolutamente gratuita. Desde 1999, **cada dos años** se organizan Encuentros internacionales, llamados **E-GLEA**. El GLEA dispone de una página web y un correo electrónico.

El GLEA realizó su primer Encuentro (E-GLEA 1), en el Centro Atómico Constituyentes de la CNEA en Buenos Aires, del 10 al 14 de septiembre de 1999. En esa ocasión se invitó al Prof. Dr. Kangi Ono, de la Universidad de California, EEUU, uno de los más reconocidos investigadores de la EA, creador y editor de la revista especializada “Journal of Acoustic Emission”. Dicho E-GLEA 1 fue divulgado por K. Ono desde la tapa de esa revista, como se puede ver en la Fig.56.

Los E-GLEA son un ámbito de encuentro, discusión y difusión de los nuevos trabajos de investigación y aplicaciones de la EA. Año por medio, se fueron realizando los distintos Encuentros internacionales del GLEA de acuerdo con el siguiente resumen:

E-GLEA 1: Buenos Aires, Argentina, 6-10 de septiembre de 1999.

E-GLEA 2: Buenos Aires, Argentina, 10-14 de septiembre de 2001.

E-GLEA 3: Río de Janeiro, Brasil, 2-6 de junio de 2003.

E-GLEA 4: Taormina, Italia, 16 al 19 de octubre de 2005.

E-GLEA 5: Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, durante este Encuentro se celebraron los **10 años del GLEA**, 29 de agosto al 1 de septiembre de 2007.

E-GLEA 6: Universidad de Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil, 16 de septiembre de 2009.

E-GLEA 7: Universidad Tecnológica Nacional, Regional Mendoza, Mendoza, Argentina, 25-27 de agosto de 2011.

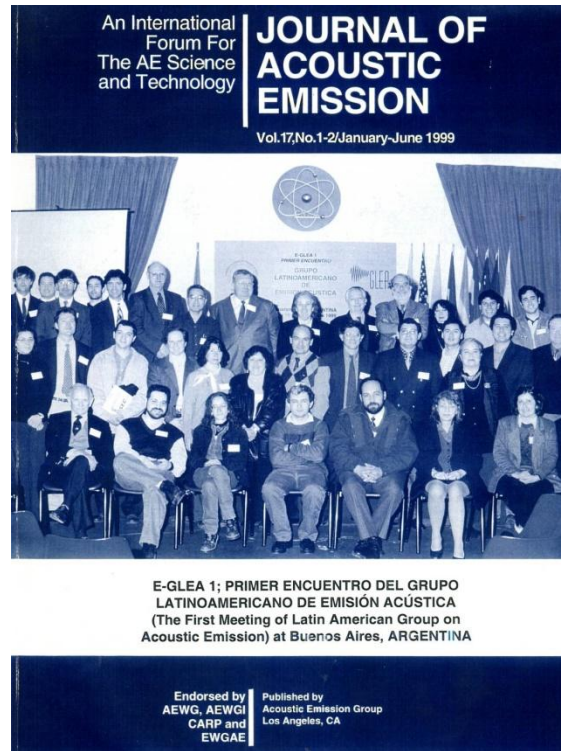


Figura 56. Participantes del E-GLEA 1 en la tapa de la revista “Journal of Acoustic Emission”, Volumen 1-2/January-June 1999.

E-GLEA 8: Universidad Nacional de Tres de Febrero, UNTREF, Caseros, Buenos Aires, Argentina, 10-12 de septiembre de 2013.

E-GLEA 9: Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, celebrándose los **20 años del GLEA**, del 29 al 31 de agosto de 2017.

4.2. Normalización en EA

Una **Norma** es un documento, que, aprobado por consenso en un organismo reconocido, establece reglas y criterios para usos comunes y repetidos. Es decir, establece las condiciones mínimas que deben reunir un producto o un servicio para que sirva al uso al que está destinado. La **Normalización** es la actividad que tiene por objeto crear, ante problemas reales o potenciales, disposiciones, protocolos o documentos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo, en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico (*Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM*, <http://www.iram.org.ar/index.php>; *International Standard Organization ISO*, <https://www.iso.org/standards.html>).

Las Normas están en todas partes y nos protegen a todos. Los productos elaborados conforme a Normas son más aptos, más seguros, de buena calidad y poseen información para guiar al consumidor. Aseguran la compatibilidad de los productos y la disponibilidad de repuestos que prolongan la vida útil del producto. Facilitan el comercio, colaboran en la regulación del mercado, permiten la transferencia de tecnología y promueven el desarrollo económico.

Las Normas protegen la salud, la seguridad y la propiedad, de peligros como el fuego, las explosiones, los químicos, las radiaciones, la electricidad y resguardan el medio ambiente. Representan resultados probados de investigación tecnológica y desarrollo. En el ámbito

empresarial, las Normas sobre materiales y componentes, facilitan los pedidos y aceleran las entregas. Además, las Normas de los sistemas de gestión ayudan a encontrar oportunidades de mejora y son propicias para la reducción de los costos.

Las Normas nacionales, alineadas a las internacionales, facilitan el acceso a los mercados de exportación. Permiten innovar, anticipar y mejorar productos.

La actividad de “**Normalización**” es llevada a cabo, en cada país, por un Organismo de Normalización: entidad reconocida a escala nacional, regional o internacional, que tienen como función principal, de acuerdo con sus estatutos, la preparación, aprobación o adopción de Normas, que pone a disposición del público en general. Cada nación del mundo tiene su propio Organismo Nacional de Normalización. En Argentina es el **Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM** (*Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM*, <http://www.iram.org.ar/index.php>).

En Argentina, las actividades de Normalización se llevan a cabo desde el año 1935, por el IRAM, reconocido en 1994 por el Poder Ejecutivo Nacional, como el Organismo de Normalización de la República Argentina.

El IRAM es un ente privado, no estatal, en el que participan representantes de consumo, producción, usuarios, gobierno, comunidad científico-técnica, fabricantes de productos, etc. El IRAM desarrolla, estudia y publica Normas argentinas en todos los campos de actividad, que favorecen y facilitan el crecimiento económico y social, contribuyendo a mejorar la calidad de vida y el uso racional de los recursos.

Se debe destacar que el IRAM fue el primer Organismo de Normalización creado en América Latina, lleva elaboradas más de 13000 Normas aplicables en muy diversos ámbitos.

El proceso de elaboración de Normas se hace a través de los Organismos de Estudio (Comisiones), con la participación de representantes de distintas organizaciones que pertenecen a los tres sectores involucrados en la creación de una Norma: los productores, los consumidores y los responsables de velar por el interés general y el bien común. Todos, excepto el personal del IRAM, tienen carácter honorario.

Como paso previo para que un Proyecto de Norma adquiriera el carácter de Norma IRAM, una vez aprobado por la Comisión específica, debe ser considerado dentro del mismo IRAM, por el Comité General de Normas (CGN), organismo independiente y también honorario, que es el encargado de examinar en forma integral, todas las Normas aprobadas por los diferentes Organismos de Estudio.

En Argentina, debido a los altos estándares de calidad y seguridad que debe aplicar la industria nuclear, a iniciativas de la CNEA, en 1969 se creó en el IRAM el Subcomité de Ensayos No Destructivos, con competencia específica en todas las áreas de este tipo de ensayos.

Recién en junio de 2000, también a pedido de la CNEA, se creó en el IRAM la Comisión de Emisión Acústica. Esta Comisión funciona desde entonces en forma autónoma y continua, reuniendo en promedio 5 personas en cada convocatoria mensual: fabricantes de equipos de EA; empresas petroquímicas que usan la EA; investigadores; autoridades gubernamentales y empresas que realizan servicios de EA.

En la década de los 90, debido a la creciente regionalización latinoamericana, se creó la Asociación MERCOSUR de Normalización, AMN (Asociación Mercosur de Normalización: <https://www.amn.org.br/>). La AMN es una asociación civil sin fines de lucro, no gubernamental, reconocida por el Grupo Mercado Común del Sur (GMC). Es el único organismo responsable por la gestión de normalización voluntaria en el ámbito del MERCOSUR. La constitución Jurídica del Comité MERCOSUR de Normalización se produjo en 1996.

A propuesta de la Comisión de EA del IRAM, junto con su equivalente de Brasil (ABNT), en junio de 2004, se creó en el ámbito del MERCOSUR, el Comité Sectorial 24 (CSM 24) con competencia específica en el tema de los END.

De acuerdo a los procedimientos de la AMN, para que entre en vigencia una Norma MERCOSUR, debe ser aprobada al menos, por dos de los países miembros, luego se envía a votación a los demás y si no hay objeciones en contra, se considera aprobada.

Las Normas MERCOSUR (NM) aceptadas como tales, remplazan a sus equivalentes nacionales, y deben ser adoptadas por los respectivos Organismos de Normalización de cada país.

En la actualidad, la AMN está formada por las siguientes instituciones:

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM, Argentina.

Instituto Nacional de Tecnología y Normalización, Paraguay.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, Uruguay.

Los principales objetivos a lograr en la Normalización MERCOSUR son:

UNIFORMIDAD: simplificar y reducir procedimientos para la elaboración de productos y la realización de servicios.

ECONOMÍA: reducir la creciente variedad de productos y procedimientos y los costos de los mismos, proporcionando al consumidor y al fabricante mejores condiciones de mercado.

COMUNICACIÓN: proporcionar informaciones más eficientes para el fabricante y el consumidor, mejorando la confiabilidad de las relaciones comerciales y de servicios.

SEGURIDAD Y SALUD: proteger la vida humana y la salud.

PROTECCIÓN AL CONSUMIDOR: proveer a la sociedad de medios eficientes para verificar la calidad de productos y servicios.

ELIMINACIÓN DE BARRERAS TÉCNICAS Y COMERCIALES: facilitar el intercambio comercial, evitando, en base al principio de “referencia a Normas”, la existencia de reglamentos en conflicto sobre productos y servicios en distintos países.

El Comité Sectorial MERCOSUR 24 (CSM 24) está dedicado íntegramente a la creación de Normas en el ámbito de los END. Está formado por 5 Subcomités que se especializan en cada método de END, de acuerdo al siguiente detalle:

00 - Subcomité de Generalidades

01 - Subcomité de **Emisión Acústica**

02 - Subcomité de Ultrasonido.

03 - Subcomité de Calificación y Certificación de Personal.

04 Subcomité de Radiografía Industrial.

05 - Subcomité de Métodos Superficiales (LP, PM y Visual).

06 - Subcomité de Corrientes Inducidas.

En el actual período la Secretaría Técnica del CSM 24 pertenece a la Argentina, a través del IRAM (se va rotando entre los países miembros). Hasta hoy se llevan realizados 21 Encuentros internacionales del CSM 24, tanto en Brasil como en Argentina. Generalmente se utilizan los espacios ofrecidos por distintos Congresos internacionales relacionados con los END. En los últimos dos, se ha agregado la modalidad de videoconferencia para facilitar la mayor participación de los representantes de cada país.

A nivel internacional también las actividades en la creación y adopción de Normas de EA, ha ido progresando rápidamente. Así es que, si bien dentro de la “International Organisation for Standardization (ISO)” (*International Standard Organization ISO*, <https://www.iso.org/standards.html>), existía dentro del Technical Committee TC135 (Ensayos No Destructivos), un Sub Comité, el SC 3 relacionado con todos los temas del área de acústica, que abarcaba al Ultrasonido y la EA, la AMN propuso la creación de un grupo específico para el estudio de la EA. Como consecuencia, en el año 2007, se instituyó un nuevo grupo, el “Sub Committee SC9”, relativo sólo a la EA, y cuya Secretaría en la actualidad pasó de Brasil a China. En este Subcomité participan activamente 14 países y otros 5 más son “Observadores”. De este modo, dentro del [ISO/TC 135: "Non-destructive testing"](#), trabajan ahora los siguientes Subcomités:

SC 02: "Surface methods".

SC 03: "Ultrasonic testing".

SC 04: "Eddy current methods".

SC 05: "Radiation methods".

SC 06: "Leak detection methods".

SC 07. "Personnel qualification".

SC 08: "Infrared thermography for non-destructive testing".

SC 09: "Acoustic emission testing".

A su vez, cada Subcomité crea Grupos de Trabajo (“Working Groups, WG”) para tratar temas específicos, convocando a reconocidos especialistas internacionales. Dentro del SC9 (Subcomité de EA) del TC 135 (Comité Técnico de END), funcionan cuatro Grupos de Trabajo:

WG 1: “Metal Materials”.

WG 2: “Composite Materials”.

WG 3: “Leak Detections”.

WG 4: “Acoustic Emission Technology”.

En los Grupos de Trabajo mencionados, por Argentina, participan varios reconocidos especialistas de CNEA.

En Europa además existe el “European Committee for Standardization CEN” (*“European Committee for Standardization CEN”*, <https://www.cen.eu/Pages/default.aspx>), que reúne a los Institutos de Normalización Nacionales de 33 países europeos, desarrollando y publicando Normas europeas. En octubre de 1991, en Viena, Austria, se aprobó formalmente un Acuerdo de Cooperación Técnica entre la ISO y el CEN, conocido como el “Viena Agreement”. A partir de la firma de ese documento, se trata de no duplicar las tareas en el trabajo de la Normalización, sino que la ISO y el CEN trabajen en conjunto.

Gran parte de la actividad de personas en el área de los END está reglamentada a escala nacional e internacional, a través de las Normas específicas para cada Método de END, y en la Norma de Calificación y Certificación de Personal, que se dedica a la aplicación de los END en la industria. Es ésta la Norma **NM-ISO 9712: “Calificación y Certificación de Personal de END”**.

Allí están comprendidas todas las actividades industriales de EA, con los requisitos, competencias y obligaciones para los Operadores e Inspectores de EA, en sus tres posibilidades: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.

En cuanto a las instituciones y al personal que aplica cada método de END, es necesario la **Accreditación**, que es el reconocimiento formal de competencia e imparcialidad de los Laboratorios, Organismos de Certificación y/o de Inspección. Se realiza mediante una evaluación independiente en base a requisitos normativos internacionales. Demuestra que esas entidades son confiables para

42

realizar ensayos, calibraciones, inspecciones y certificaciones. En la Argentina esta actividad es llevada a cabo, por el **Organismo Argentino de Acreditación OAA**, (www.oaa.org.ar/).

El OAA es una entidad civil sin fines de lucro, creada en el marco del Sistema Nacional de Normas, Calidad y Certificación, para desarrollar las funciones establecidas en el Decreto del Poder Ejecutivo Nacional 1474, de 1994. Acredita entidades como: Laboratorios de Ensayo, Laboratorios de Calibración, Laboratorios Clínicos, Organismos de Certificación de Sistemas de Gestión (de la Calidad, Ambiental, Salud y Seguridad Ocupacional, etc.) y monitorea las Buenas Prácticas de Laboratorios. Además, acredita:

- Organismos de Certificación de Productos.
- Organismos de Certificación de Personas.
- Organismos de Inspección.

El IRAM está acreditado por el OAA para la Certificación de Personas y éste a su vez, delega la facultad de la Calificación de Personas en los **Organismos de Calificación Acreditados (OCA)**, certificando sus acciones. En la Argentina existen pocos OCAs, entre ellos se pueden citar: la CNEA, la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Fac. Regional Delta y la UTN Facultad Regional Mendoza. Todos ellos están habilitados para la Calificación de Personas en los métodos de END en los que cada uno es competente. Todos ellos se desempeñan conforme a las indicaciones de la NM-ISO 9712 (*Calificación y Certificación de Personal de END*), para las correspondientes habilitaciones de operadores técnicos y profesionales en los Niveles 1, 2 y 3, estableciendo las incumbencias, competencias y obligaciones, de cada Nivel, para cada sector industrial y en cada método de END.

4.3. EA y Documentos Internacionales

De acuerdo a una revisión internacional realizada por una empresa alemana fabricante de equipos de EA, existen a nivel internacional, más de 100 Códigos y Normas relacionadas con este método de END (*“Code, Standards, Practices, and Guidelines related to Acoustic Emission (AE)”*, Vallen-Syteme GmbH, Release September 2013, http://www.vallen.de/zdownload/pdf/AE_Standards_1309.pdf). En la cita de la referencia, las Normas, Códigos y Prácticas están ordenadas por institución productora (ISO, ASNT, CEN, API, EPRI, ASME, IEEE, etc.), actualizadas al año 2013, con su correspondiente codificación, título, fecha de edición y comentarios. Las Normas desarrolladas en Latinoamérica no han sido incorporadas aún, pero pueden ser consultadas en la página web de la AMN (*Asociación Mercosur de Normalización, Comité Sectorial 24 CS24, Normas MERCOSUR de END*, <https://www.amn.org.br/Paginas/NormasGeral>).

La **Agencia Internacional de Energía Atómica** (IAEA por sus siglas en inglés), dependiente de las Naciones Unidas, también desarrolla el tema de la EA en su Documento Técnico: IAEA-TECDOC 628/Rev.1 (*IAEA-TECDOC 628/Rev.1. “Training guidelines in non-destructive testing techniques”*).

La Sección V del **Código ASME**, en su Artículo 12 describe el proceso de examinación por EA, de recipientes metálicos durante la prueba de presurización (ASME Code, Section V, ARTICLE 12: Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing). El Artículo 13, describe los requerimientos a usarse durante la monitorización continua por EA, en contornos de recipientes a presión metálicos y no metálicos usados en servicio, en la industria nuclear y no nuclear, (*ASME Code, Section V, ARTICLE 13: Continuous Acoustic Emission Monitoring*).

En la Publicación No. 322 del **“American Petroleum Institute, API”**, se hace una evaluación ingenieril del método de EA para la detección de pérdidas en tanques sobre tierra, para almacenamiento (*API Publication Number 322: An Engineering Evaluation of Acoustic Methods of Leak Detection in Aboveground Storage Tanks*).

De todo lo indicado, se desprende la enorme importancia del uso de la EA en el mundo.

4.4. EA y Documentos Gubernamentales Nacionales

La documentación en el ámbito nacional donde se menciona la EA puede, encontrarse en el portal de “**Información Legislativa y Documental Oficial**”, especificando el tipo de documento y el año de sus publicación (*Información Legislativa y Documental Oficial, www.infoleg.gov.ar/*).

a) La **Subsecretaría de Combustibles**, en su **Disposición 89/97** especifica: “...Establéense los requisitos a los que se deberán ajustar las Empresas Fraccionadoras para el llenado de cilindros de Gas Licuado de Petróleo, GLP...”:

*“...Realizar un control mediante ensayos no destructivos, utilizando tecnologías debidamente autorizadas por esta Subsecretaría, tales como **emisión acústica** y ultrasonido, no siendo admisible la prueba hidráulica para evitar el acrecentamiento de las condiciones de riesgo...”*

b) La **Secretaría de Minería y Energía**, en la Resolución 124/2001, Anexo I, Capítulo II, establece:

*“...Para el caso de cilindros ICC (INTERSTATE COMMERCE COMMISSION) no se someterán a prueba hidráulica, efectuándose en su lugar **emisión acústica** y ensayos complementarios correspondientes, debiéndose cumplimentar para los mismos, lo dispuesto en la Disposición ex SUBSECRETARIA DE COMBUSTIBLES N° 89 de fecha 24 de noviembre de 1997...”*

c) **Secretaría de Energía**, Resolución 131/2003: “Gas Licuado de Petróleo Automotor, Normas Técnicas y de Seguridad, Aprobación, Anexo I:

*“...Si el móvil sufriese un accidente que afectase parte o la totalidad del equipo conversor, éste deberá ser desinstalado, y se lo someterá a todo tipo de pruebas para verificar su integridad, para este caso, será obligatorio realizar por lo menos una prueba hidráulica y una **emisión acústica** al tanque antes de ser reinstalado, independientemente del tiempo que falte para que expire su habilitación...”*

d) **Subsecretaría de Combustibles, Secretaría de Energía, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios**, Nota S. S. C. N° 2209, 10/8/04, dirigida a Empresas Auditoras de Seguridad: establece criterios para los ensayos periódicos de recipientes que contengan GLP por el método de **Emisión Acústica** y controles adicionales.

e) **Subsecretaría de Combustibles, Secretaría de Energía, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios**, Nota D.N.R. y C. N° 576, 10/11/04, dirigida a Empresas Auditoras de Seguridad: se refiere al personal que participa en los ensayos periódicos por medio de **Emisión Acústica**, modificando a la nota S.S.C. N° 2209 del 10/8/04.

f) **Secretaría de Política Ambiental, Gobierno de la Provincia de Buenos Aires**, Resolución N° 231/96: Aparatos sometidos a presión:

*“...Cuando por razones de temperaturas, resistencia de las bases del equipo o razones del proceso no se pueda realizar la prueba hidráulica, se podrá realizar una prueba neumática o ensayo de **emisión acústica**...”*

*En el “Esquema de Inspección de Recipientes Sometidos a Presión”, se nombra a los ensayos de **emisión acústica**, para los siguientes aparatos sometidos a presión: Generadores de vapor; Recipiente para aire comprimido; Recipientes para contener cloro; Recipientes*

criogénicos; Tanques para contener anhídrido carbónico; Cilindros de continuas y cilindros en general calefaccionados con vapor.

*“...NOTA: El ensayo de **emisión acústica** es opcional y su reiteración estará sujeta al informe técnico correspondiente...”*

g) **Secretaría de Política Ambiental, Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, Resolución N° 129/97:** “Modificatoria Resolución S.P.A. N° 231/96 de Aparatos Sometidos a Presión”:

*“...Cuando por razones de temperatura, resistencia de las bases del equipo o razones del proceso no se pueda realizar la prueba hidráulica, podrá realizarse una prueba neumática o ensayo de **emisión acústica**...”*

*En el “Esquema de Inspección de Recipientes Sometidos a presión”, se nombra a los ensayos de **emisión acústica**, para los siguientes aparatos sometidos a presión: Generadores de vapor; Recipiente para aire comprimido; Recipientes para contener cloro; Recipientes criogénicos; Tanques para contener anhídrido carbónico; Cilindros de continuas y cilindros en general calefaccionados con vapor.*

*“...NOTA: El ensayo de **emisión acústica** es opcional y su reiteración estará sujeta al informe técnico correspondiente...”*

h) **Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe, Departamento Generación, Inspección de Equipos Sometidos a Presión, Ley Provincial 1373, Modificación Decreto Reglamentario 0640/92, nov. 1998:**

*“...Artículo 29 d): Prueba hidráulica o de **emisión acústica**...”*

*“...Artículo 31 e): Prueba hidráulica o de **emisión acústica**: cada dos años...”*

De lo expuesto previamente, se deduce que la EA está presente en la documentación legal argentina, en al menos 7 instrumentos legales oficiales.

5. Agradecimientos

Se agradece especialmente a la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires y al Dr. Julio Gratton por la invitación a realizar esta publicación.

Se agradece al Dpto. Coordinación Proyecto ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica, en cuyo ámbito se ha llevado a cabo algunas de las investigaciones relatadas en este trabajo.