

Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico



E. Marín

*Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
del Instituto Politécnico Nacional
Legaria 694, Col. Irrigación, C. P. 11500, México D. F., México*

Email: emarin63@yahoo.es , emarinm@ipn.mx

(Recibido 31 de Enero de 2008; aceptado 3 de marzo de 2008)

Resumen

Se presentan cuestiones históricas relacionadas con el descubrimiento del efecto fotoacústico, su interpretación y aplicaciones, con el ánimo de dar a conocer a profesores involucrados en la enseñanza de las ciencias un episodio poco conocido de la historia de la física y una técnica que hoy en día se ha incorporado al gran arsenal de herramientas existentes para escudriñar la naturaleza y resolver algunos problemas cruciales relacionados con nuestra interacción con el medioambiente.

Palabras clave: Historia de la ciencia, fotoacústica, espectroscopía.

Abstract

We describe some historical details related to the discovery of the photoacoustic effect, its interpretation and applications, with the aim to present to professors and teachers involved in sciences education a little known episode of the history of physics and a technique that nowadays has been incorporated to the great arsenal of existing tools to the study of nature and to solve some crucial problems related to our interaction with the environment.

Keywords: Historia de la ciencia, Fotoacústica, espectroscopía.

PACS: 01.65.+g, 43.58.Kr, 43.35.Ud

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Hace más de 100 años Alexander Graham Bell (1847-1922) [1] descubrió que una señal acústica puede producirse iluminando con radiación modulada periódicamente una muestra colocada en una celda cerrada. En la actualidad las técnicas basadas en ese fenómeno tienen muchas aplicaciones.

El **Efecto Fotoacústico** (FA) es interesante desde el punto de vista pedagógico por diversas razones: Su historia demuestra una vez más¹ cómo un descubrimiento aparentemente sin aplicaciones en determinado momento histórico puede ser re-descubierto muchos años después y dar lugar a aplicaciones excitantes. Por otra parte, su

¹ Otro ejemplo tiene que ver con los orígenes de la espectroscopía cuantitativa, o espectrometría (una de ellas es la espectroscopía FA) que se remontan a los trabajos de Lambert (1760) y Beer (1852) que condujeron a la hoy muy conocida Ley de Lambert-Beer que relaciona la absorbancia de una sustancia a una longitud de onda particular con la concentración de especies absorbentes en la muestra. La realización práctica no tuvo lugar hasta muchos años después en que se inventaron fuentes de luz y detectores apropiados.

descripción involucra diferentes tipos de ondas, como electromagnéticas, acústicas y térmicas, ofreciendo una oportunidad para compararlas y contrastar sus peculiaridades, así como de sintetizar conocimientos provenientes de diferentes ramas de la Física para entender el efecto y utilizarlo de manera práctica. Los mecanismos físicos involucrados pueden ser tratados cualitativamente, a un nivel elemental, o cuantitativamente en cursos avanzados, una vez que los estudiantes hayan tenido una introducción a las ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales.

El objetivo de este artículo es proponer una manera sencilla de explicar en qué consiste el efecto FA, así como hacer una síntesis de la historia de su descubrimiento y mencionar algunas de sus aplicaciones, haciendo énfasis en aquellas relacionadas con la solución de problemas ambientales, un asunto de gran importancia hoy en día.

II. ¿PODEMOS ESCUCHAR LA LUZ? UN EXPERIMENTO CASERO

Intente realizar el siguiente experimento (varios experimentos “de cocina” parecidos son descritos en las Refs. [2, 3, 4, 5]). Tome un estetoscopio, de los que

utilizan los médicos para medir la tensión arterial, escuchar los latidos del corazón o monitorear el funcionamiento de nuestros pulmones (Fig. 1). Colóquese cerca de una lámpara incandescente que sea alimentada con corriente alterna (un foco de 25 Watts conectado a la red eléctrica es suficiente). Con el estetoscopio acoplado a sus oídos acerque lentamente su diafragma plástico (preferiblemente debe ser de color negro, para que absorba más la luz) al foco hasta que se escuche claramente un sonido parecido a “hum”.

Si el flujo luminoso incidente es interrumpido (apagando la lámpara o interponiendo un objeto opaco, como nuestra mano, entre ella y el diafragma), el “hum” desaparece. Si la iluminación es interrumpida periódicamente, por ejemplo colocando y quitando sucesivamente el objeto opaco, se escuchará el “hum” intermitentemente: *hum-hum-hum...* El experimento es conclusivo: El oído humano (equipado con un instrumento adecuado, en este caso el estetoscopio) es capaz de “escuchar” la luz, siempre que el flujo luminoso varíe periódicamente, como es el caso de un bulbo incandescente alimentado con corriente eléctrica alterna.

¿Cuál es la causa de este fenómeno? Lo que hemos redescubierto con el experimento anterior no es más que el Efecto Fotoacústico (FA), descrito por primera vez por Bell en 1880, como mencionamos en nuestra introducción [1].

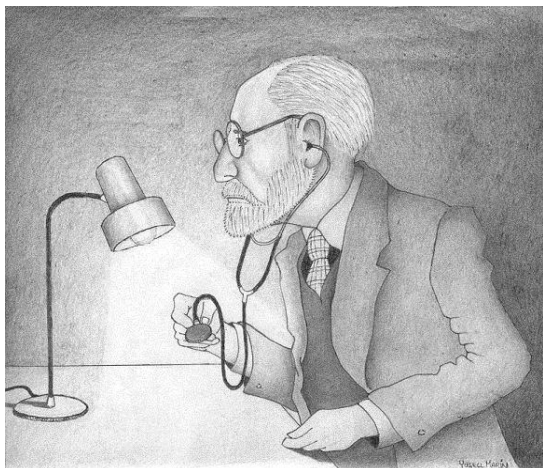


FIGURA 1. “Escuchando” la luz con un estetoscopio.

III. EL EFECTO FOTOACÚSTICO

El “hum” del experimento descrito no es otra cosa que el resultado de un proceso de transformación de energía luminosa en térmica y de esta en acústica. El estetoscopio está formado por una cavidad metálica en forma de cilindro aplastado, cerrada en una de sus bases por el diafragma plástico. Un tubo de goma conecta dicha cavidad con la parte del instrumento que se acopla a los oídos. El diafragma absorbe parte de la luz incidente sobre él y se calienta. En la parte de adentro de la cavidad cilíndrica hay aire, cuya capa en contacto con la parte interior del diafragma se calienta periódicamente,

siguiendo la frecuencia de modulación de la luz (por ej., los 60 ciclos por segundo de la línea eléctrica en la iluminación directa), expandiéndose y contrayéndose con esa periodicidad, y actuando como una especie de pistón sobre el resto de la columna cilíndrica de gas, en el cual se genera una onda acústica o de presión que se propaga a través de los tubos del estetoscopio y los conductos auditivos hacia nuestros tímpanos, siendo así detectada.

IV. EL DESCUBRIMIENTO

El efecto FA fue descubierto por Bell de una manera diferente, mientras trabajaba, junto con Charles Sumner Tainter (un conocido fabricante de instrumentos ópticos), en el fotófono², según él un instrumento más revolucionario que el teléfono que había patentado algunos años antes³ [6], y con el cual intentaba transmitir la voz a grandes distancias utilizando la luz solar como portadora de la información (Fig. 2).

Bell reflejaba un haz de luz solar sobre una celda de selenio incorporada a un circuito telefónico (en un viaje a Inglaterra en 1878 había estudiado las propiedades del selenio, entre ellas la variación de su resistencia eléctrica cuando absorbe luz). El haz era reflejado con ayuda de un espejo colocado en el diafragma de una especie de altoparlante, y que vibraba al ser activado por la voz. La resistencia eléctrica del selenio era modulada entonces por la luz, reproduciéndose la voz transmitida hacia el receptor telefónico. (Nótese que Bell, con estos trabajos, se anticipó un siglo a lo que es hoy la transmisión de información a largas distancias a través de la atmósfera, e introdujo la idea de la comunicación óptica a distancia que revolucionó más tarde las comunicaciones con el desarrollo de las fibras ópticas).

Con el fotófono Bell y Tainter fueron capaces de transmitir información solamente en distancias de algunas decenas de metros, por lo que era necesario continuar perfeccionando el sistema, pero puede decirse que experimentalmente fue un éxito (sus principios fueron utilizados por Guglielmo Marconi para desarrollar la telegrafía inalámbrica), aunque como negocio un fracaso: No funcionaba en días nublados. El invento fue presentado en una reunión de la *American Association for the Advancement of Science*, celebrado en Agosto del mismo 1880 en la ciudad de Boston, convirtiéndose posteriormente en la primera patente sobre comunicación telefónica inalámbrica [7]. En Octubre Bell viaja a Francia a recibir el Premio Volta, que le otorgaron por el desarrollo del teléfono, y lleva al fotófono consigo, haciendo una demostración que, según cuentan, deleitó a los científicos e ingenieros europeos presentes. Después

² Traducción de la palabra inglesa Photophone.

³ Ha existido un gran debate en cuanto a la paternidad del invento. De lo que no parece existir duda es de que fue patentado por Bell en Estados Unidos, aunque el Congreso de ese país reconoció como su inventor, el 11 de junio del 2002, a Antonio Santi Giuseppe Meucci (1808-1896), inmigrante italiano quien lo bautizó como teletrófono o telégrafo parlante.

viajó a Inglaterra, donde hizo presentaciones en la *Royal Society*, la *Society of Arts*, y la *Society of Telegraph Engineers*. Todo ello hizo que eminentes científicos europeos de la época, como W H Preece, Ernest Mercadier, J Tyndall y W K Röntgen se interesaran e investigaran con el fonógrafo.

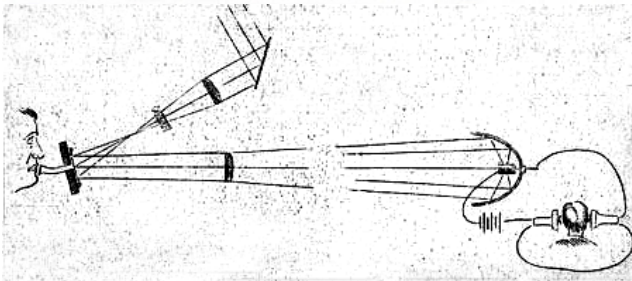
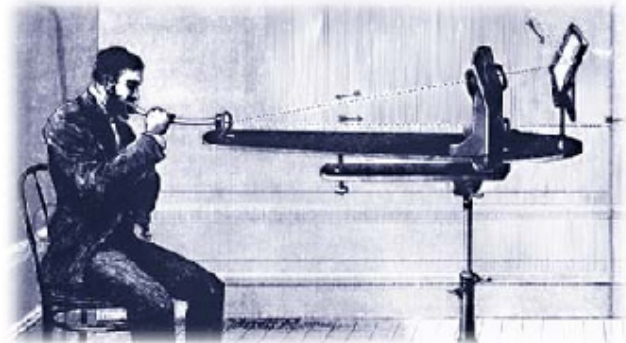


FIGURA 2. Fotófono construido por A G Bell según un dibujo de la época (encima) y esquemas hechos por el propio Bell, quien intentaba transmitir la voz utilizando un haz modulado de luz.

Inmerso en sus experimentos con el fonógrafo, y colocando el selenio en forma de diafragma sobre un tubo de escucha, Bell descubrió que ese material (y otros sólidos) emite sonido cuando es iluminado por la luz modulada, lo que conseguía haciéndola pasar a través de un disco rotatorio con agujeros (Fig. 3) (Un aparato sencillo para demostrar el efecto FA de manera similar a la originalmente descrita por Bell es mostrado por Rush y Heubler [5]). Bell llegó incluso a descubrir, utilizando un dispositivo denominado espectrófono⁴, ilustrado en la Fig. 4, que la intensidad del sonido emitido depende de la longitud de onda o color de la luz incidente, y que por lo tanto el efecto debía ser atribuido a un proceso de absorción óptica. Demostró además que era producido por la absorción de radiación fuera de la región visible del espectro.

⁴ *Spectrophone*, en inglés. Traducción del autor.

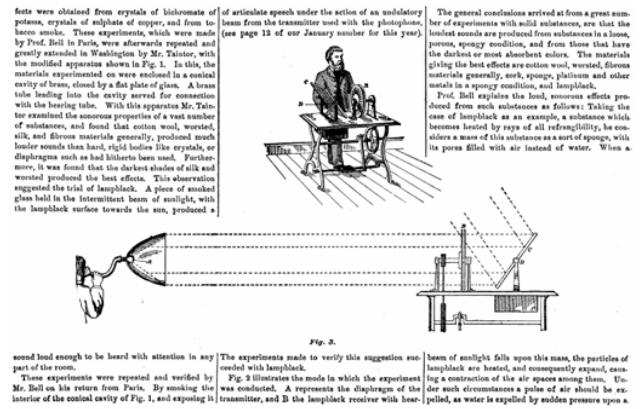


FIGURA 3. Esquema del dispositivo con el cual Bell descubrió el Efecto Fotoacústico, según una publicación de la época.

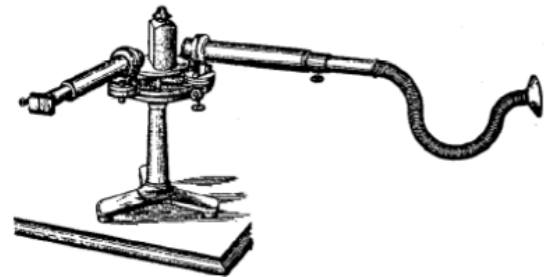


FIGURA 4. El Espectrófono de Bell. La luz solar (blanca) entra por el tubo de la izquierda, una especie de telescopio donde un sistema de lentes la hace incidir sobre el prisma colocado en el centro donde se separa en diferentes longitudes de onda, antes de incidir sobre un material sólido colocado a la entrada del tubo de la derecha y provocar el efecto fotoacústico. Las ondas sonoras generadas se propagan a través del tubo de escucha de manera similar a como lo hacen en el estetoscopio. Esta imagen se ha convertido en logotipo de las conferencias bianuales sobre fenómenos fotoacústicos y fototérmicos [8].

Aunque el efecto FA en sólidos ganó el interés de algunos investigadores, como Röntgen⁵, Tyndall y (Lord) Rayleigh, permaneció como una curiosidad científica por casi medio siglo hasta que, gracias en gran medida al desarrollo del micrófono, que sustituiría al tubo de escucha en el montaje experimental de Bell, al advenimiento de fuentes luminosas intensas (ejemplo los láseres⁶) y al desarrollo de sensibles sistemas de detección (amplificadores sensitivos a fase o sincrónicos) y procesamiento de datos, comenzaron a gestarse las primeras aplicaciones prácticas.

⁵ Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) no solo descubrió los rayos X, por lo que recibió el primer Premio Nobel de Física, en 1905. Entre otras cosas notó que el efecto descubierto por Bell también se produce por la absorción de la luz en gases, lo cual es la base de algunas aplicaciones que serán descritas en el texto.

⁶ Los primeros láseres datan de la década del 1950.

V. LA TÉCNICA FOTOACÚSTICA

El efecto FA es la base de la técnica que lleva su nombre y que forma parte de un conjunto de técnicas experimentales que se conocen como fototérmicas (FT) [9]. En ellas se hace incidir energía luminosa⁷ de forma periódica (o pulsada) sobre la muestra a investigar (en estado sólido, líquido o gaseoso) siendo parte de ella absorbida y parcialmente transformada en calor. La temperatura de la muestra varía entonces con la misma periodicidad que lo hace la radiación incidente, induciendo cambios en los parámetros del material (y/o del medio en el que se encuentra inmerso) dependientes de ella. La detección de estas variaciones es la base de los diferentes esquemas experimentales (Fig. 5). En particular, en la Técnica FA, la muestra del material a investigar es colocada en una celda cerrada que contiene aire u otro gas (Fig. 6). Como resultado de la absorción de radiación modulada, el material se calienta, transmitiéndose el calor a una capa de gas adyacente a la superficie iluminada de la muestra de manera análoga a como ocurría en el estetoscopio. Esta capa de gas se calienta entonces periódicamente, expandiéndose y contrayéndose, y actuando como un pistón sobre el resto del gas contenido en la celda. Se genera así una onda acústica, o de presión, que puede ser detectada con un micrófono colocado también dentro de la celda.

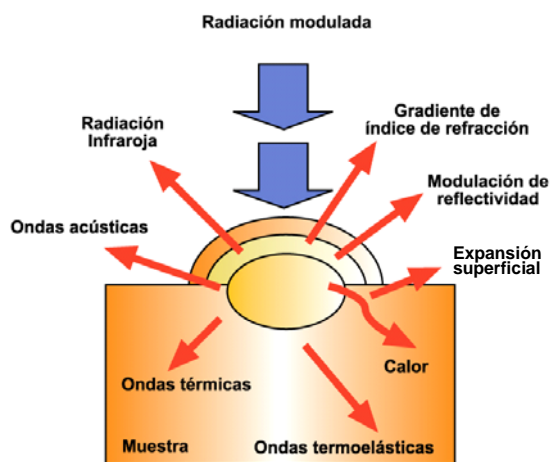


FIGURA 5. Ilustración de algunos fenómenos fototérmicos.

La teoría más aceptada en la actualidad para explicar el efecto FA fue enunciada en 1976 por A. Rosenzweig, entonces miembro de los laboratorios Bell de Murria Hill, New Jersey, en los Estados Unidos de Norteamérica, y su colaborador A. Gersho [10]. Rosenzweig, por muchos considerado el Padre de la llamada Espectroscopía Fotoacústica (Bell podría ser entonces el Abuelo), desarrolló esa variante de la espectroscopía óptica de absorción que ofrecía a los investigadores un gran número de ventajas. La misma, a diferencia de la espectroscopía óptica convencional, puede ser aplicada al estudio de

materiales opacos o transparentes, al de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas y, además, a aquellas que se encuentren en forma de polvos [11].

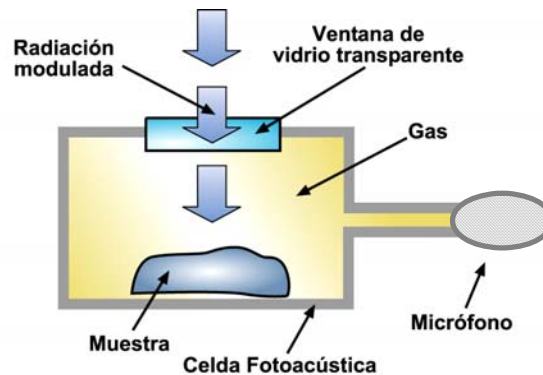


FIGURA 6. Esquema de una celda fotoacústica.

Es importante señalar que, si bien la década de los años 70 del siglo XX es mencionada como la del resurgimiento del Efecto Fotoacústico, las primeras aplicaciones del mismo se deben a los trabajos del soviético Viengerov [12], quien en 1938 efectuó los primeros análisis espectroscópicos en gases utilizando una variante de esta técnica⁸. Los experimentos de Viengerov no tuvieron mucha trascendencia debido a la ausencia de fuentes intensas de luz, pero sobre todo al hecho de haber sido publicados en una revista y en un idioma poco accesible en esa época fuera de las fronteras de la entonces Unión Soviética.

V. APLICACIONES

A. Mecanismos de generación de la señal FA

La generación de la señal fotoacústica consta de tres procesos fundamentales, en los que como veremos están fundamentadas sus posibles aplicaciones:

i) Absorción de la radiación luminosa: Este mecanismo depende de las propiedades ópticas de la muestra, como son el coeficiente de absorción, su reflectancia y su transmitancia óptica, entre otros. Ello hace que la señal FA dependa de dichos parámetros y que ellos puedan ser medidos. En particular su dependencia de la longitud de onda de la radiación hace posible aplicaciones espectroscópicas.

ii) Transformación de la energía electromagnética en calor: Depende siempre de la eficiencia cuántica del proceso⁹ y del tipo de material. En semiconductores, por ejemplo [13], está condicionada por procesos de

⁸ La causa de la aparición de una onda sonora debido a la absorción de luz en un gas es también la conversión directa de energía luminosa en acústica a través del proceso de calentamiento y expansión-compresión del gas.

⁹ Es el cociente entre la cantidad de calor generado y la energía absorbida.

⁷ Existen variantes que utilizan otros tipos de radiación, por ejemplo haces de partículas.

recombinación no radiativos caracterizados por los tiempos y velocidades de recombinación, los coeficientes de difusión de portadores minoritarios y la longitud de difusión de los mismos. Adecuando el experimento apropiadamente estos parámetros pueden ser determinados [14, 15, 16]

iii) Difusión del calor generado a través del material hasta el establecimiento de un campo de temperatura cuyas oscilaciones periódicas son denominadas ondas térmicas (ver próximo epígrafe). Ese proceso depende de cuatro propiedades térmicas fundamentalmente: La difusividad térmica, α , la conductividad, k , la efusividad térmica, ε , y la capacidad calorífica específica, C (producto de la densidad y el calor específico). que se relacionan entre sí mediante las ecuaciones: $\alpha=k/C$ y $\varepsilon=(kC)^{1/2}$. Por ello la técnica puede ser utilizada para medir estas magnitudes [17].

A. Ondas térmicas

El término onda térmica se ha introducido en la literatura para describir las soluciones de la ecuación de difusión del calor en presencia de una fuente periódica, como es el caso en las técnicas fototérmicas. Las ondas térmicas no son ondas en el sentido estricto de la palabra, toda vez que no transportan energía [18], pero su semejanza matemática con ondas reales ha hecho posible la aplicación de su concepto para la interpretación de muchos experimentos fototérmicos [19]. Sobre el concepto de onda térmica pueden también mencionarse algunos detalles históricos interesantes: El mismo fue anticipado por Jean Baptiste Fourier, quien en su obra *Analytical Theory of Heat* [20], publicada en 1822, mostró que los problemas de conducción del calor podían ser resueltos expandiendo distribuciones de temperatura en series de ondas. Fourier utilizó ecuaciones similares a aquellas que se usan en la actualidad para describir las ondas térmicas, para proponer un método de estimación de las propiedades térmicas de la corteza terrestre. En la mencionada obra planteó que “*el problema de la temperatura de la corteza terrestre presenta una de las más bellas aplicaciones de la teoría del calor*”¹⁰.

Hoy en día las mediciones de la temperatura del suelo en función del tiempo a diferentes distancias de la superficie y la interpretación de los resultados con ayuda de las ondas térmicas es un método bien establecido para medir la difusividad térmica del suelo [21, 22], como predijo Fourier. Ese es probablemente el experimento más simple que pueda realizarse en la temática de las ondas térmicas y ha sido propuesto anteriormente para ser utilizado en la enseñanza [23, 24] (ver Fig. 7).

Aunque A. J. Ångström (1814-1874) [25] (Fig. 8) propuso en 1861 un método similar para medir la difusividad térmica de un sólido en forma de barra, no fue hasta la década del 1970 que aparecieron la mayoría de las primeras aplicaciones prácticas de las ondas térmicas en el contexto de las técnicas fototérmicas.

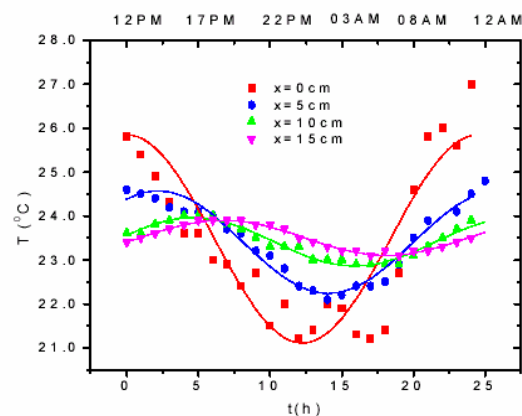


FIGURA. 7. Propagación de ondas térmicas en el suelo. Temperatura en función del tiempo a diferentes profundidades (según Ref. [24]).

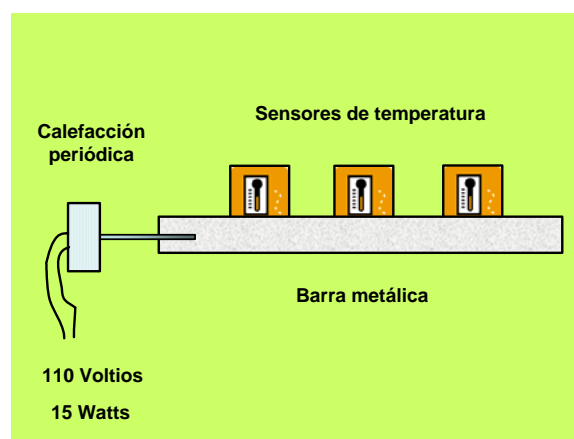


FIGURA. 8. La medida de la difusividad térmica suele realizarse por el método de Ångström. En él se calienta una barra metálica por un extremo, aplicándole una calefacción periódica, mientras se deja enfriar libremente el otro extremo. La temperatura en un punto dado de la barra realizará oscilaciones periódicas, aproximadamente armónicas como las de la Fig. 7, que pueden relacionarse con la difusividad térmica.

C. Delatando la presencia de contaminantes

Uno de los campos donde la técnica fotoacústica ha tenido mayor incidencia es en la detección espectroscópica de contaminantes en agua y aire atmosférico, entendiéndose por contaminantes aquellos elementos o compuestos químicos que, en determinadas concentraciones, pueden producir efectos negativos en la salud humana, la infraestructura que nos rodea y en el medio ambiente. Con el incremento del interés en la solución de problemas ambientales, la detección de contaminantes a niveles cada vez menores ha alcanzado una gran importancia.

La Espectroscopia Fotoacústica permite detectar en el aire atmosférico concentraciones de diversos contaminantes monitoreados por los órganos de control ambiental de todo el mundo. La causa radica en que en la región infrarroja del espectro electromagnético numerosas moléculas contaminantes presentes en el aire absorben fuertemente la radiación luminosa, y esta región felizmente

¹⁰ Traducción del autor.

coincide con el rango de emisión luminosa y las líneas espectrales del láser de Dióxido de Carbono (Fig. 9). Esto ha sido aprovechado para diseñar sistemas de medición que utilizan esa fuente de excitación. El corazón del sistema es la celda FA, un recipiente cerrado donde circula un flujo de aire atmosférico o de cualquier mezcla gaseosa que se quiera analizar, a través de la cual se hace pasar el haz luminoso. Cuando el láser es sintonizado en la frecuencia apropiada, las moléculas contaminantes absorben su energía. Como el haz de luz es interrumpido periódicamente (como la luz que incidía sobre el estetoscopio) la absorción ocurre solamente en los intervalos de tiempo en que el haz se deja pasar. En esos momentos las moléculas pasan a un nivel de excitación, retornando al nivel inicial cada vez que el haz es interrumpido, y cediendo el exceso de energía a moléculas vecinas mediante colisiones, transformando así la energía luminosa en energía de movimiento térmico y generando calor. Las variaciones de temperatura son acompañadas por cambios de presión que generan ondas acústicas en la celda que pueden ser detectadas con un micrófono incorporado a ella. Literalmente hablando, los contaminantes revelan su presencia mediante el sonido. La señal eléctrica generada por el micrófono, que es proporcional a la concentración de moléculas que absorben la radiación, es filtrada electrónicamente, amplificada y analizada con ayuda de una computadora donde el espectro Fotoacústico de cada molécula es registrado y analizado con programas basados en precisos y elegantes modelos físico-matemáticos. Cada molécula presenta un espectro FA único, como si fuese una huella dactilar. De esta manera se pueden detectar concentraciones de hasta una molécula del elemento contaminante por cada billón de moléculas de aire, como es el caso en la mayoría de los gases contaminantes. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de medir con gran precisión, por ejemplo, cómo evoluciona la concentración de estos gases durante el transcurso del día en determinadas localidades y así permitir tomar medidas para su control [26, 27].

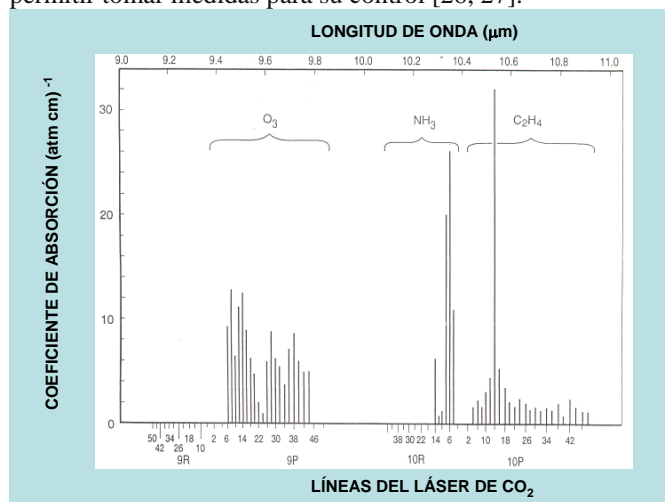


FIGURA 9. Líneas de emisión del láser de CO₂ y bandas de absorción de algunas moléculas como ozono (O₃), amoníaco (NH₃) y etileno (C₂H₄).

Además de los contaminantes ambientales, estos sistemas
Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 2, May 2008

permiten medir otros gases. De esta forma han aparecido aplicaciones en otros campos. Por ejemplo, muchas investigaciones en la fruticultura dependen del análisis de las concentraciones de etileno, gas cuya presencia, en muchos casos, acelera el proceso de maduración de las frutas [28]. Esos estudios permiten determinar métodos más adecuados para que las frutas lleguen a su destino en buenas condiciones de comercialización. En el área médica han aparecido estudios para medir de manera no invasiva los gases exhalados por la piel en condiciones fisiológicas específicas, por ejemplo durante la irradiación solar. Esos gases contienen información acerca de una gran variedad de procesos bioquímicos que tienen lugar en nuestros cuerpos, habiéndose detectado, por ejemplo, moléculas que resultan del deterioro de las células por la acción de la radiación ultravioleta [29]. Este método permitirá a los investigadores estudiar estos procesos con más detalle que con las técnicas tradicionales.

Por otra parte, la detección de contaminantes a niveles cada vez menores en agua ha alcanzado también una gran importancia. Especialmente hoy es un imperativo la necesidad de contar con métodos rápidos y precisos para la medición de bajas concentraciones de estos contaminantes en aguas subterráneas y de beber, legislándose en muchos países el límite permitido en el total de pesticidas presentes en agua potable en niveles de una molécula por cada millón de moléculas de agua. Recientemente se ha demostrado que la espectroscopía fotoacústica permite detectar trazas del ión Cromo-VI (Fig. 10) y de Fósforo, dos de los contaminantes más importantes [30, 31], y la validez de la metodología propuesta se ha reafirmado en otras aplicaciones, como la detección de Hierro-III en harina de maíz, [32] y de Hierro-II en leche [33]¹¹, es decir, las aplicaciones pueden tener incidencia también en campos como las industrias farmacéuticas y la de alimentos.



FIGURA 10. En el filme de Steven Soderbergh "Erin Brockovich", la actriz Julia Roberts (en la foto) encarna a una mujer que destapa un caso de contaminación en agua con Cr-VI por parte de la sede local de una importante empresa, que ha provocado incontables daños en la salud de sus convecinos.

¹¹ Es conocido que el Hierro se adiciona muchas veces a los alimentos con el objetivo de prevenir o combatir enfermedades como la anemia ferropénica.

VII. CONCLUSIONES

Las técnicas fototérmicas han alcanzado un gran desarrollo desde el redescubrimiento del efecto fotoacústico y sus primeras aplicaciones en la década del 1970. Sin embargo, aún son desconocidas para muchas personas. Por ello resulta importante dar a conocer sus principios fundamentales, la historia de su desarrollo y sus potencialidades, a profesores y estudiantes de ciencias e ingenierías y a aquellos involucrados en la enseñanza de la historia de las ciencias, con el objetivo de que estos aspectos puedan ser incorporados en algunos cursos y diseminados entre una audiencia más amplia. Las referencias [9-11, 18, 19] pueden ser un buen punto de partida para profundizar en el tema.

Aunque hemos limitado la exposición de las aplicaciones al campo de la espectroscopía y específicamente a su uso en la detección de contaminantes en sistemas ambientales, muchas otras demuestran que podemos, escuchando la luz, detectar la actividad de diferentes elementos químicos en diversos sistemas físicos y biológicos, cuya presencia en muchos casos puede resultar indeseable. Escuchando la luz se pueden medir, además, diferentes propiedades de los materiales, como las ópticas, que regulan cómo es absorbida la luz de diferentes colores, o las térmicas, que describen por qué un cuerpo se calienta más o por qué conduce mejor el calor que otro. Pero referirse a ellas podría ser tema de otros trabajos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Y. Marín-Gutiérrez por proporcionarle la Fig. 1. Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por el IPN a través de COFAA y del proyecto de investigación SIP 20070490.

REFERENCIAS

- [1] Bell, A. G., *Am. J. of Sci.* **20**, 305 (1880).
- [2] Campbell, C. y Laherrere, J., *Sci. Am.* **78**, 278, (1998).
- [3] Euler, M., Niemann, K. y Müller, A., *The Physics Teacher* **38**, 356 (Septiembre 2000).
- [4] Euler, M., *The Physics Teacher* **39**, 406 (2001).
- [5] Rush, W. F. y Heubler, E., *Am. J. Phys.* **50**, 669, 1982.
- [6] Bell, A. G., *Telephone United States Patent No.* 174, 465, (1876).
- [7] Bell, A. G. y Tainter, S., *Photophone United State Patent No.* 235, 496, (1880).
- [8] <http://www.icppp.org/links.htm>.
- [9] Almond, D. P. y Patel, P. M., *Photothermal Science and Techniques in Physics and its Applications*, 10 Dobbsand, E. R. y Palmer, S. B. (Eds), (Chapman and Hall, London, 1996).
- [10] Rosencwaig, A. y Gersho, A., *J. of Appl. Phys.* **47**, 64 (1976).
- [11] Rosencwaig, A., *Physics Today* **28**, 23 (1975)

- [12] Viengerov, M. L., *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **19**, 687 (1938)
- [13] Mandelis, A. (Ed.) *Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors* (Elsevier, 1987).
- [14] Marín, E., Vargas, H., Díaz, P. y Riech, I., *Phys. Stat. Sol.(A)* **179**, 387 (2000).
- [15] Marín, E., Riech, I., Díaz, P., Alvarado-Gil, J. J., Baquero, R., Mendoza-Alvarez, J. G., Vargas, H., Cruz-Orea, A. y Vargas, M., *J. Appl. Phys.* **83**, 2604 (1998).
- [16] Riech, I., Gomez-Herrera, M. L., Díaz, P., Mendoza-Alvarez, J. G., Herrera-Pérez, J. L. y Marín, E., *Applied Physics Letters* **79**, 964 (2001).
- [17] Vargas, H. y Miranda, L. C. M., *Physics Reports* **161**, 43 (1980).
- [18] Salazar, A., *Eur. J. Phys.* **27**, 1 (2006).
- [19] Marin, E., *European Journal of Physics* **28**, 429 (2007).
- [20] Fourier, J. B. J., *Analytical theory of Heat*, traducida por Freeman, A. (Encyclopedia Britannica, Inc., Chicago: 1952)
- [21] Hanks, R. J., *Applied soil physics. Soil water and temperature applications*, 2nd ed., (Springer-Verlag, New York, 1992).
- [22] Fuhrer, O. *Inverse Heat Conduction In Soils A New Approach Towards Recovering Soil Moisture From Temperature Records* Diploma Thesis Climate Research ETH, Zurich ETH Zurich, Dept. Physics March 2000. <http://iacweb.ethz.ch/staff/fuhrer/publ/dipl/>
- [23] McIntosh, G. y Sharratt, B. S., *The Phys. Teach.* **39** 458 (2001).
- [24] Marín, E., Jean-Baptiste, E. y Hernández, M., *Revista Mexicana de Física* **E52**, 21 (2006).
- [25] Ångström, A. J., *Ann. Physik. Lpz.* **114**, 513, (1861).
- [26] Sigrist, M. W. In "Air Monitoring by Spectroscopy Techniques" Sigrist, M. W. (Ed.) (Wiley, New York, 163, 1994).
- [27] de Vries, H. S. M., "Non-intrusive fruit and plant analysis by laser photothermal measurements of ethylene emission" In "Modern methods of plant analysis" Linskend, H. F. y Jackson, J. F. (Eds) (Springer-Verlag, Heidelberg, 1995).
- [28] Voesenek, L. A. C. J., M Banga, J. H. G. M., Rijnders, E. J. W., Visser, F. J. M., Harrent, Brailsford, R. W., Jacksont, M. B. y Blom, C. W. P. M., *Annals of Botany* **79** (Supplement A): 57 (1997).
- [29] Harren, F. J. M. y Reuss, J., *Encyclopaedia of Applied Physics*, Trigg, G. L. (Ed.), (Weinheim, 1997).
- [29] Lima, J. A. P., Marin, E., Cardoso, S. L., da Silva, M. G., Sthel, M., Costa, C. G. S., Mariano, A., Rezende, C. E., Ovalle, R. C., Susuki, M. S. y Vargas, H., *Int. J. of Envirom. Anal. Chem.* **76**, 331 (2000).
- [30] Delgado-Vasallo, O., Valdés, A. C., Marín, E., Lima, J. A. P., da Silva, M. G., Sthel, M. S., Vargas, H. y Cardoso, S. L., *Meas. Sc. Technol.* **11**, 412 (2000).
- [31] Delgado-Vasallo, O., Peña, J., San Martín Martínez, E., Calderón, A., Peña-Rodríguez, G., Jaime Fonseca, M. R. y Marín, E. *Anal. Sciences* **19**, 599 (2003).
- [32] Cardoso, S. L., Dias, C. M. F., Lima, J. A. P., Massunaga, M. S. O., da Silva, M. G. y Vargas, H., *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 712 (2003).