

# Redes de energía eléctrica y comunicaciones basadas en la propagación de ondas elásticas



**Juan Antonio Talavera Martín**

Ingeniero Electromecánico del ICAI.  
Doctor Ingeniero Industrial por la UPM.  
Investigador del IIT-ICAI Universidad Pontificia Comillas. Responsable de Desarrollo en ESDRAS.

En estos últimos años, con el crecimiento tan espectacular en las telecomunicaciones, se está haciendo un gran esfuerzo en el aumento de la capacidad de transmisión en las redes. En general, se está siguiendo dos alternativas. Una de ellas, la más obvia, consiste en la instalación de nuevas líneas, por ejemplo, de fibra óptica o enlaces inalámbricos. Otra, menos evidente pero que está dando unos resultados sorprendentes, es la reutilización de las infraestructuras actualmente existentes por medio de un cambio de tecnología de transmisión. Así tenemos, por ejemplo, ADSL en las líneas telefónicas o los nuevos sistemas PLC en las líneas eléctricas. El artículo describe una nueva tecnología de transmisión basada en la propagación de ondas elásticas para la reutilización de las infraestructuras eléctricas como medio de transmisión.



**Carlos Mateo Domingo**

Ingeniero Industrial del ICAI. Investigador en formación del IIT-ICAI Universidad Pontificia Comillas.

## Un poco de historia

Paseando por Florencia podemos encontrar una vivienda en cuya fachada existe una placa que reza: "Aquí nació, el 13 de abril de 1808, Antonio Meucci, el inventor del teléfono". La inscripción tiene dos sorpresas para un atento observador; por un lado, el hablar de desarrollos tecnológicos en esta ciudad cuna del renacimiento e icono del arte universal. Por otro, la fecha tan reciente de la placa: 16 de mayo de 1996. Con ella sus con-

ciudadanos tratan de corregir un error que está tardando más de un siglo en disiparse. La cámara de representantes de Estados Unidos, más recientemente, en junio del 2002, tuvo que hacer sorprendentemente una declaración similar. Y es que la historia oficial de los descubrimientos hasta ahora nos decía que el inventor estadounidense de origen escocés Alexander Graham Bell fue quien desarrolló las ideas básicas del teléfono.

Estando Bell preparando uno de los terminales se le derramó un poco de ácido en una de sus piernas. En otra habitación estaba Watson, su ayudante, trabajando en el otro terminal. Watson se quedó atónito cuando de repente escuchó claramente unas palabras que salían del terminal: ¡*Watson, ven aquí, te necesito!*. Los libros de historia de la tecnología nos cuentan que esas fueron las primeras palabras escuchadas por teléfono. Sin embargo, años antes en la bella ciudad colonial todavía española de La Habana, Meucci posiblemente escuchara la primera transmisión por cable eléctrico de la voz humana.

Antonio Meucci había nacido en Florencia donde realizó estudios de ingeniería mecánica. Contratado como encargado de tramoya del teatro Tacón, llegó a La Habana, junto con su esposa Ester, en 1835. Pionero de la electrotecnia en Cuba montó en los altos del teatro un taller de galvanoplastia, uno de los primeros, si no el primero, que funcionaron en el continente americano. Las pilas eléctricas de la instalación también sirvieron a Meucci para realizar experimentos de electroterapia sobre diversos amigos enfermos de La Habana. Estos tratamientos con descargas eléctricas alcanzaron mucha popularidad. En 1849, cuando preparaba uno de tales tratamientos, un paciente emitió una exclamación que Meucci afirmó haber oído a distancia, en otra habitación, por transmisión eléctrica en un cable que unía los aparatos de las dos habitaciones.

Obsesionado con el descubrimiento, un año más tarde Meucci partió para Nueva York, con el objeto de desarrollar y promover su hallazgo. Repetidos sus experimentos habaneros obtiene el mismo resultado aunque la transmisión de las palabras todavía no resulta suficientemente clara. Sin embargo, hacia 1860, consigue una mejora notable al sustituir el dispositivo inicial de tipo eléctrico por otro de tipo electromagnético. En 1870, ya lograba transmitir la señal telefónica a una "distancia de cerca de una milla". Desgraciadamente, los éxitos técnicos no fueron acompañados de los económicos. No logró interesar a los inversores en su innovación. Para obtener fondos Meucci intentó distintas aventuras comerciales de naturaleza dispar que resultaron repetidos fracasos.

Tratando desesperadamente de buscar financiación, presentó su invención a la

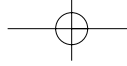
todopoderosa Western Union, compañía que monopolizaba entonces la red de telegrafía más grande del mundo. Con una visión desgraciadamente muy común, los directores de la compañía no mostraron tampoco interés por la innovación. Sin embargo, allí trabajaba un científico de origen escocés que sí leyó con interés el contenido de la propuesta. Pocos años más tarde, fuera de la Western, Bell convertiría la innovación en un éxito comercial. Meucci lo demandó pero no pudo obtener ningún beneficio y murió en la miseria.

Debemos reconocer a Bell y a su compatriota Samuel Morse años antes, en 1837, con el telégrafo, que aunque no fueran los creadores de las ideas originales, sí supieron llevar la tecnología al mercado y crear empresas que han sido verdaderos gigantes industriales. Curiosamente, las aplicaciones en comunicaciones precedieron a otras más conocidas de la electricidad. Por ejemplo, no fue hasta 1881 cuando Edison presentó la primera lámpara incandescente en París.

### El electromagnetismo sobrepasa a la mecánica

Al menos los que hemos estudiado la especialidad eléctrica o electrónica, creíamos que las funciones escalares o vectoriales y sus operadores tales como el gradiente o el rotacional habían sido desarrollados para explicar los campos electromagnéticos. Sin embargo, esa apreciación no es correcta. Fueron creados con anterioridad para explicar los movimientos de las partículas en la materia. En caso de sólidos, desplazamientos de su posición de reposo; deformaciones elásticas que ocurren en el interior de los cuerpos cuando se les aplican fuerzas.

Así, si una barra es sometida a una fuerza de tracción, se deforma, alargándose. Pero junto a este alargamiento se produce algo que no solemos dar importancia: una contracción de su sección. Y este segundo fenómeno que nos habla de desplazamientos en direcciones perpendiculares a las fuerzas aplicadas, es clave para comprender las ondas elásticas y cómo se propagan. Si se aplica en un extremo de una barra una fuerza, aparece una deformación que se propaga por la barra. Las posiciones de las partículas internas  $u$  del material se desplazan de su punto de reposo siguiendo la ecuación de movimiento [1]:



$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad [1]$$

Siendo  $\rho$  la densidad del material y  $\mu, \lambda$  las constantes de Lamé. Estos desplazamientos  $\mathbf{u}$  se pueden descomponer en un componente escalar que denominamos  $\phi$  y otro componente vectorial,  $\mathbf{H}$ . Estos componentes verifican la expresión propuesta por Helmholtz:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad [2]$$

Si sustituimos la ecuación [2] en la ecuación [1] y considerando que es nula la divergencia de  $\mathbf{H}$ , resultan dos ecuaciones de onda que rigen la propagación en un sólido. En ellas aparecen las constantes  $c_1$  y  $c_2$  que corresponden a las velocidades de propagación longitudinal y transversal respectivamente.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad [3]$$

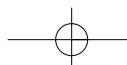
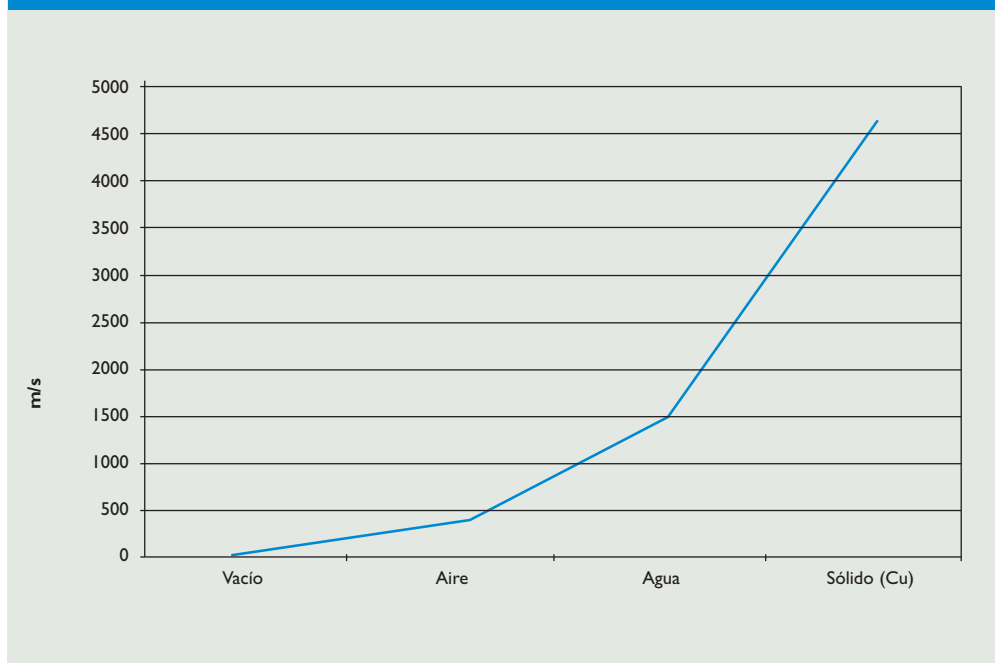
$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad [4]$$

Ambas ecuaciones forman un sistema completo capaz de explicar como se propagan las ondas elásticas a lo largo de una barra sólida. Una de las curiosidades más significativas es que hay dos velocidades de propagación

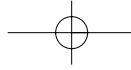
distintas [2]. Cuando las ondas atraviesan una frontera entre dos medios aparecen, como en el caso de luz, ondas reflejadas y ondas refractadas. Sin embargo, a diferencia de la luz, dada esta dualidad de velocidades, el fenómeno es más complejo desdoblándose tanto las reflejadas como las refractadas, a su vez, en ondas longitudinales y transversales viajando a distintas velocidades [3].

Si en dichas ecuaciones mecánicas, en vez de considerar un potencial escalar  $\phi$  relativo a los desplazamientos, se considera el potencial eléctrico y paralelamente se sustituye  $\mathbf{H}$  por el campo magnético, se puede llegar a las famosas ecuaciones de Maxwell. Este gran físico, también escocés como Bell, las propuso en su *Tratado de Electricidad y Magnetismo* (1873) y desde entonces han conformado el desarrollo teórico del electromagnetismo. Existiendo este paralelismo entre las ecuaciones, se hace obvio que Maxwell propusiera, dado que existían las ondas elásticas, lo que se considera la cumbre del paradigma científico: afirmar la posibilidad de la existencia de ondas electromagnéticas antes de que estas se descubrieran experimentalmente. Efectivamente años después, siguiendo la predicción de Maxwell, se descubrieron. Y según se descubrieron se aplicaron. A la memoria nos vienen nombres conocidos como Herz o Marconi. Desde entonces, ha sucedido una cadena acelerada de innovaciones en el campo de las comunicaciones: radio, televisión, teléfonos móviles,

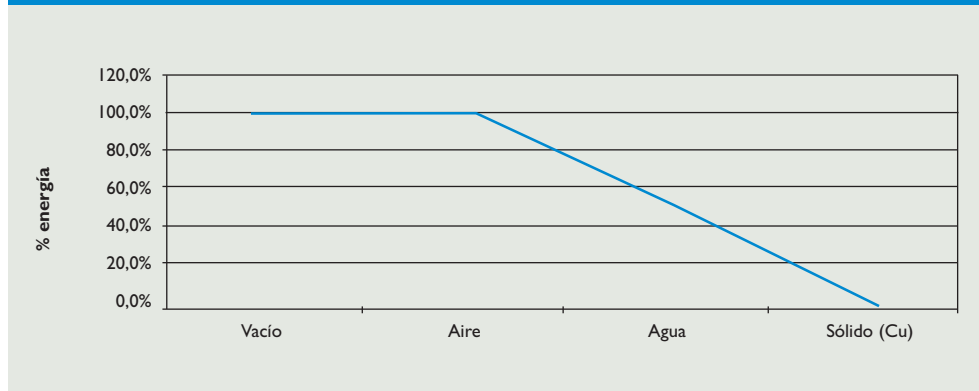
Figura 1. Los medios materiales y las ondas elásticas: velocidad de propagación en m/s







**Figura 2. Porcentaje de energía transmitida por las ondas electromagnéticas atravesando los medios materiales. Frecuencia: 1 MHz. Distancia: 1 m**



Internet... todas ellas basadas en el electromagnetismo. Incluso la luz ha resultado estar constituida por ondas electromagnéticas. Por otro lado, ¿qué avances podemos destacar que han ocurrido en la mecánica y que hayan llegado a las personas en el mismo periodo de tiempo? Desde luego en lo relativo a comunicaciones poco significativos.

### Pero la mecánica puede volver por las líneas eléctricas

Las ondas elásticas, al contrario que las electromagnéticas, no se propagan por el vacío; necesitan un medio material. Además el medio gaseoso, desgraciadamente para la voz soporte de la comunicación humana, no es el medio más adecuado para su propagación, tal como podemos observar en la Figura 1. En ella está representada una característica representativa del medio relacionada con la transmisión de energía: la velocidad de propagación.

Esta ventaja que proporcionan los sólidos para la propagación de las ondas elásticas, junto al fenómeno de que es así para la mayoría de los sólidos conductores como para muchos sólidos dieléctricos, puede resultar de elevado interés para el sector eléctrico. De hecho, durante estos años hemos estado trabajando con la propagación de ondas elásticas por medios dieléctricos, por ejemplo, para desarrollar transformadores de medida en alta tensión [4]. Por otro lado, la propagación por sólidos conductores la teníamos abandonada hasta que en una experimentación exploratoria pudimos constatar un fenómeno de gran importancia: los conductores eléctricos parecían comportarse como excelentes guías de ondas elásticas.

### La banda ancha por las líneas eléctricas

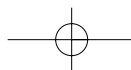
En contra de los escepticismos iniciales, basados en la suposición técnicamente bas-

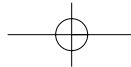
tante razonable de que los cables eléctricos no están preparados para la transmisión de alta frecuencia, la comunicación, por lo que se llama con las siglas inglesas PLC (Power Line Communications), también llamado PLT (Power Line Telecommunications) o BPL (Broadband over Power Line), ha llegado al mercado y con fuerza.

PLC designa los sistemas que utilizan las líneas eléctricas de transporte y distribución de energía eléctrica como medio de comunicación. Se modulan las señales en bandas alejadas de los 50 ó 60 Hz. Aunque esto ha sido realizado desde hace décadas, en la actualidad ha tenido un importante renacimiento con la asignación de la banda 1,6-30 MHz para uso doméstico; típicamente para proveer servicios de telefonía y acceso a Internet.

Cuando la frecuencia es baja, las ondas electromagnéticas se propagan muy bien por los conductores. Esto significa que la atenuación es baja, las pérdidas son reducidas y, por tanto, son apropiadas para la transmisión de energía. Así, la energía eléctrica, que se genera predominantemente con frecuencias de 50 Hz ó 60 Hz, se transmite por líneas de conductores eléctricos. Sin embargo, según se aumenta la frecuencia y entramos en la banda de los MHz, la atenuación de las ondas electromagnéticas aumenta de tal forma que en realidad la energía se propaga por el medio dieléctrico siendo los conductores meras guías de onda.

Tal como vemos en la Figura 2, donde se representa la proporción de energía transmitida longitudinalmente en distintos medios de diferentes conductividades, según aumenta la conductividad la proporción de energía transmitida se reduce. Conviene hacer notar que el agua tiene una conductividad muy variable y que el valor representado es un nivel medio entre la energía que se transmite por





el agua de lluvia (99,8%) y la que se transmite por el agua del mar (0,03%). Para sólidos conductores como el cobre, la potencia transmitida a distancia tan pequeña como un metro es prácticamente nula. Por otro lado, la atmósfera y, particularmente, el vacío son muy buenos medios de transmisión electromagnética a altas frecuencias. Así, según la frecuencia aumenta es esperable una tendencia a dominar la propagación de ondas electromagnéticas por medios dieléctricos (baja conductividad) tanto por el aire (teléfonos móviles) como por fibra óptica frente a la comunicación por cable eléctrico.

Los desarrolladores de la tecnología PLC no se han rendido ante esta evidencia y han sabido hacer frente a este problema a base de técnicas de modulación y corrección de errores. Estas técnicas permiten transmisiones con muy fuertes atenuaciones. Aparentemente están logrando superar con éxito esta limitación dado que cada vez salen modelos con mayores anchos de banda y que, por tanto, admiten mayores atenuaciones en los enlaces.

### De los problemas electromagnéticos surgen las oportunidades "mecánicas"

Sin embargo, mucha atenuación significa que gran parte de la energía emitida se radia al espacio. Los cables se convierten en auténticas antenas emisoras de ondas electromagnéticas. Estos cables que se extienden por todas las habitaciones de las casas modernas pueden afectar a múltiples aparatos. Así, el tema de compatibilidad electromagnética es importante y ha sido desde el principio un tema muy problemático para los sistemas PLC. Las compañías telefónicas, las cuales no ven con buenos ojos que las compañías eléctricas se metan en el negocio de las comunicaciones, han retenido la comercialización de los sistemas PLC durante años basándose en la posible interferencia electromagnética que pueden provocar. Trabajar con ondas no electromagnéticas evitaría este problema de raíz. Así, esta es una gran ventaja potencial de los sistemas basados en ondas elásticas cuya emisión electromagnética es prácticamente nula.

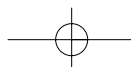
Otra ventaja de los módems basados en ondas elásticas sería su tamaño. Los módem PLC actuales tienen que incorporar complejos filtros para evitar emitir en las bandas de radiodifusión legalmente establecidas (radio y televisión principalmente) y su tamaño es relativamente grande. Son,

por tanto, poco apropiados para aplicaciones portátiles. Por otro lado, dado la distinta naturaleza de la propagación, la transmisión por ondas elásticas no requiere este tipo de filtros. Es más, cuanto más alta es la frecuencia, el tamaño de los emisores y receptores es más pequeño. Se está pensando, incluso, en dimensiones de nanómetros para emisiones en la banda de los GHz dentro de circuitos integrados. Todo esto hace que el tamaño potencial de los módems "elásticos" pueda ser extremadamente pequeño.

### Constitución de los sistemas basados en ondas elásticas

Los componentes más significativos que tiene un sistema de transmisión basado en ondas elásticas son los siguientes:

- **Convertidores de señales eléctricas a ondas elásticas.** Típicamente son estructuras basadas en materiales piezoeléctricos, o magnetostrictivos, que al aplicar tensión o corriente eléctrica generan deformaciones y esfuerzos que se propagan elásticamente. A estos convertidores les hemos llamado emisores.
- **Acoplamientos dieléctricos.** A través de ellos las ondas elásticas producidas por los convertidores se transmiten al medio de transmisión, o bien, las ondas elásticas propagadas por los cables son transmitidas a los convertidores. Para ello, adaptan la impedancia acústica de los convertidores a la impedancia acústica del conductor del cable dentro de su recubrimiento aislante. Además, los acoplamientos dieléctricos son de materiales eléctricamente aislantes para separar galvánicamente los circuitos de los convertidores del voltaje del conductor. Así, se consigue independencia entre el potencial de los circuitos generadores de las señales elásticas y el potencial eléctrico del medio de transmisión. En caso de cables para distribución de energía eléctrica en viviendas y oficinas europeas, las tensiones son usualmente de 220 V. Estas tensiones son relativamente elevadas comparativamente con las tensiones de los circuitos electrónicos de los convertidores. Además, la separación mediante un dieléctrico permite la eliminación del ruido debido a campos eléctricos y magnéticos, así como la reducción de las interferencias de los otros posibles canales de transmisión basados en señales electromagnéticas;
- **Convertidores de ondas elásticas a señales eléctricas.** Al igual que el primer compo-



nente, son también estructuras basadas en materiales piezoeléctricos que al deformarse por los pequeños esfuerzos producidos por las ondas elásticas generan voltajes y corrientes eléctricas. A estos convertidores les hemos llamado receptores.

- Opcionalmente, se requiere una clase de componentes más: **los puentes dieléctricos**. Tienen la misión de transmitir las señales elásticas entre segmentos del mismo, o de otro, cable eléctrico de tal forma que se eviten ciertos aparatos, como relés, interruptores, contadores, ... que pudieran interrumpir el medio de transmisión o producir atenuaciones, reflexiones u otro tipo de efectos sobre las ondas elásticas. Por otro lado, hay que considerar que no se deben establecer conexiones eléctricas adicionales a las existentes. Por ello, estos puentes deben estar basados en materiales no conductores de la electricidad.

Finalmente, como todo sistema de comunicación requiere además otros tipos de componentes: codificadores, moduladores, etc. Dado que no son específicos de los sistemas basados en ondas elásticas no vamos a detenernos en su descripción.

### Resultados de laboratorio

Los primeros ensayos realizados han sido en baja frecuencia. En este rango de frecuencia los convertidores se han basado en "zumbadores" piezocerámicos. Estos componentes se encuentran muy fácilmente en el mercado y, además, a bajo coste. En la Figura 3 aparece fotografiado uno de ellos ya acoplado a un cable eléctrico. Aunque son mucho mayores de los requeridos en alta frecuencia, el tamaño de estos piezocerámicos permite que sean manipulados y conectados con facilidad. Su frecuencia de trabajo queda limitada a 20 kHz, típica de los dispositivos acústicos. A pesar de estas limitaciones, nos han posibilitado explorar ciertos comportamientos de las ondas elásticas. Por ejemplo, un resultado interesante y que verifica los modelos teóricos es el relativo a la influencia del aislamiento. Las ondas elásticas, al menos en baja frecuencia, tienen una mayor atenuación en cables aislados que en cables desnudos. Por otro lado, el aislamiento se estima que tiene el efecto beneficioso de reducir los posibles efectos de interfonía (*cross-talk*) entre cables paralelos.

Uno de los resultados con mayor relevancia conseguidos con este tipo de componentes

viene representado en la Figura 4. Estábamos buscando detectar los primeros modos de propagación puros por el conductor de cobre. Cuando se trabaja con frecuencias de 20 kHz, el tamaño físico de las ondas hace que estas se propaguen, además de por el cobre, por el aislamiento e incluso por el aire que rodea el aislamiento. Estimaciones preliminares sugieren que la frecuencia de la onda a emitir para que pueda viajar exclusivamente por el cobre debe estar por encima de 1,5 MHz.

Para intentar obtener una emisión por encima de dicha frecuencia, con un generador de ondas aplicamos repetidamente a los zumbadores escalones de tensión de 18 V. La descomposición de una señal de tipo escalón contiene, en teoría, armónicos de todas las frecuencias. Con ello, pretendimos excitar algún modo de resonancia superior que tuvieran los zumbadores fuera de su rango de trabajo. Como la señal está fuera de especificaciones, debería ser muy débil y se requeriría hacer un tratamiento especial para aumentar la relación señal/ruido. Este consistió en guardar las medidas de cada ensayo, procesar y acumular estos datos con los resultados de los ensayos anteriores.

En la Figura 4 se ha representado la distribución espectral en la banda de 0 a 12 MHz de la respuesta en escalón promediada 8.000 ensayos consecutivos. En ella podemos observar una elevación de energía con frecuencia aproximada de 10,6 MHz que pudiera corresponder a uno de los primeros modos de transmisión elástica guiada internamente por el conductor de cobre (modos de propagación puros). En la respuesta temporal, no representada, se observa que

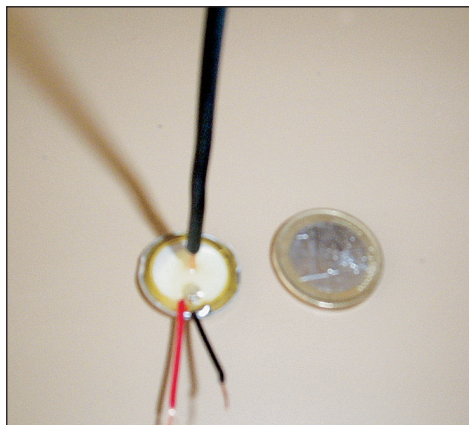
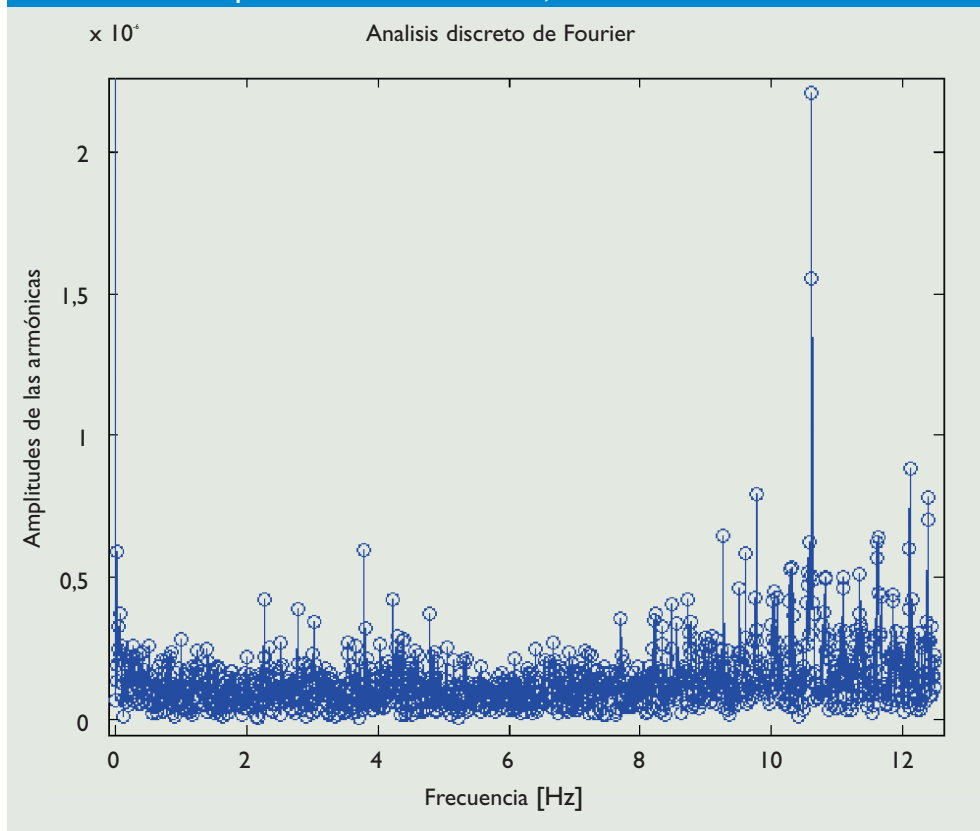


Figura 3. Vista de un convertidor con el acoplamiento dieléctrico a un cable eléctrico para pruebas de baja frecuencia

Figura 4. Distribución espectral de la respuesta a escalón, en la zona de los 265  $\mu$ s posteriores al inicio del escalón, en la banda 0-12 MHz



esta elevación energética ocurre a los 265 microsegundos después de haberse iniciado el escalón. Para el cable ensayado, de los típicamente usados en las casas con 1,5 mm<sup>2</sup> de sección y 1 metro de longitud, supone una velocidad de propagación superior a 3.770 m/seg.

En la actualidad se están desarrollando los modelos teóricos de la propagación guiada por los conductores y preparando los montajes experimentales para realizar ensayos con emisores y receptores de alta frecuencia.

### El futuro es cooperativo

Finalmente, no queremos terminar sin destacar uno de los aspectos más interesante de los sistemas basados en ondas elásticas. Este consiste en la posibilidad que tienen de superponerse a los sistemas de comunicación actualmente existentes. Es decir, dado que están basados en ondas de diferente naturaleza física pueden convivir con los basados en ondas electromagnéticas. Tener dos sistemas es disponer de más ancho de banda; un bien muy apreciado por las compañías de telecomunicaciones y en la actualidad también buscado con ahínco por ciertas compañías eléctricas.

Quizás no vuelvan aquellos tiempos dorados donde la mecánica era la disciplina científica más innovadora tanto en los conceptos teóricos aportados como en las realizaciones prácticas. Sin embargo, la comparación de la Figura 1 con la Figura 2 sugiere fuertemente que puede haber un espacio de desarrollo conjunto con el electromagnetismo en el área de las comunicaciones que deslumbrase a propios y extraños nuevamente. ■

### Referencias

- [1] J. N. Barshinger and J. L. Rose, *Guided Wave Propagation in an Elastic Hollow Cylinder Coated with a Viscoelastic Material*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 51, pp. 1547-1556, 2004.
- [2] M. J. S. Lowe, *Matrix Techniques for Modeling Ultrasonic Waves in Multilayered Media*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 42, pp. 525-542, 1995.
- [3] H. F. Pollard, *Sound Waves in Solids*, Pion, 1977.
- [4] J. A. Talavera, A. Carnicero, O. López, C. Mateo y R. M. Ruiz, *Electrical current measurement based on elastic waves propagation through dielectric materials*, 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, U.K., 2004.