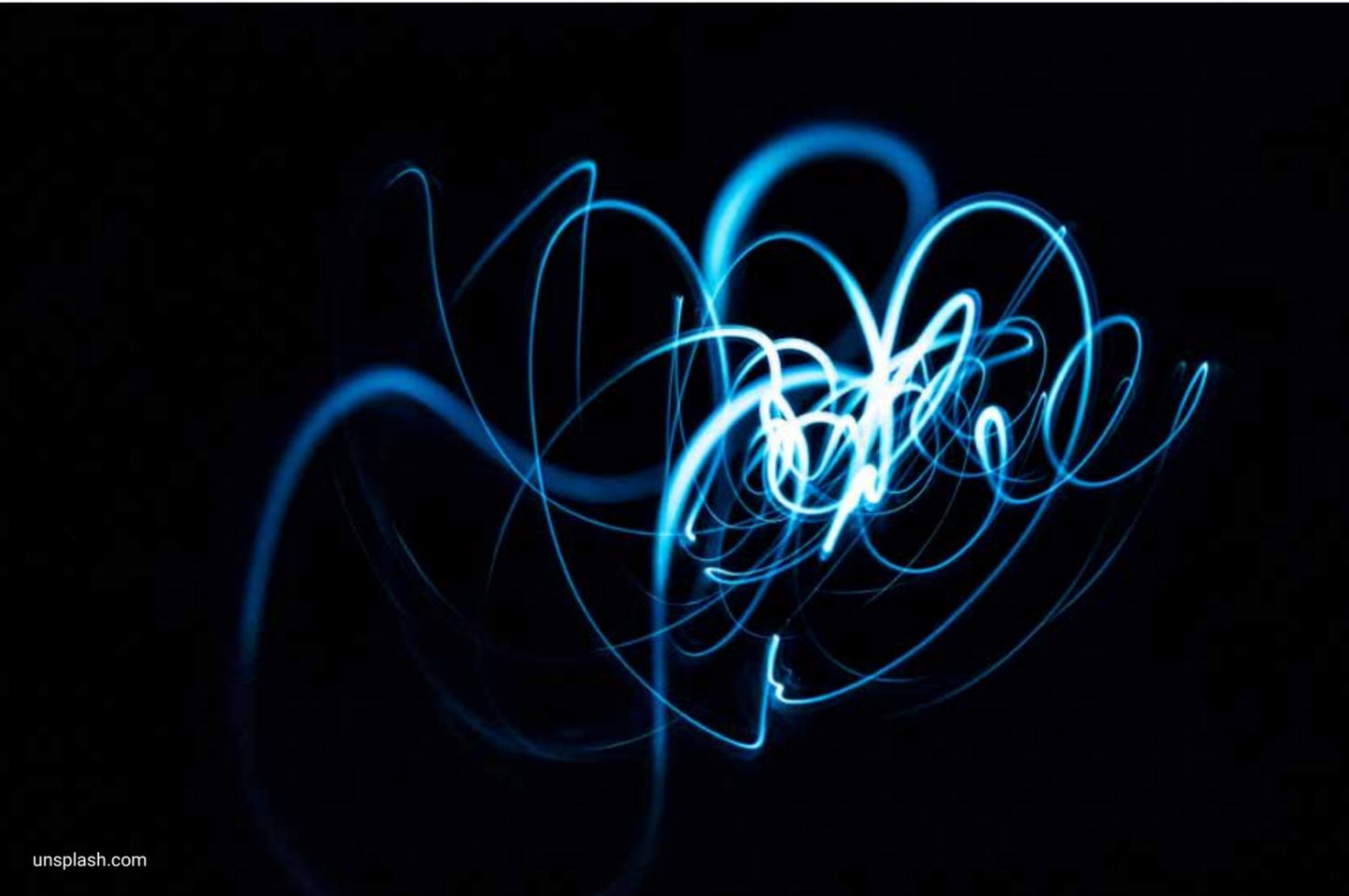


# Un mundo lleno de ondas

Juan Pablo Martínez Jiménez

Dispersión de la  
luz blanca por un  
prisma óptico

Peter Martin/Hemera/Thinkstock



unsplash.com

Cuando J. Clerk-Maxwell<sup>1</sup> publicó en 1865 su trabajo 'A dynamical theory of the electromagnetics fields' difícilmente era consciente de las puertas que abría al desarrollo de la Ciencia y de la Tecnología. La unificación completa de la descripción y comportamiento de las ondas electromagnéticas, entre las que se incluye la luz, facilitó la comprensión y tratamiento matemático de ese gran mundo que hoy conocemos como Ondas electromagnéticas.

La posterior comprobación experimental de dicho trabajo realizada por Heinrich R. Hertz (1888) y la comprobación de la generación, transmisión y detección de ondas electromagnéticas en el laboratorio supuso el inicio de un desarrollo científico y tecnológico sobre el cual se sustenta gran parte de la tecnología cotidiana.

Pero realmente ¿qué es una onda electromagnética? Para los físicos está claro que es la propagación de un campo electromagnético (podemos precisar que la propagación de un campo eléctrico y otro magnético, pero como ambos están biunívocamente ligados, conocido el uno queda determinado el otro). Pero entonces ¿qué es el campo eléctrico? Simplemente es un concepto físico-matemático para describir la fuerza eléctrica que se ejerce sobre la unidad de carga eléctrica en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo. Esta fuerza es ejercida por otras cargas eléctricas y se manifiesta en el espacio, para el caso de dos cargas puntuales, con una magnitud directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas (Ley de Coulomb, 1785).

Si modificamos o desplazamos una distribución de cargas, cambiará la interacción entre las carga eléctricas y ese cambio lleva asociado una modificación del campo eléctrico que hay en todo el espacio.

Algo similar ocurre con el campo magnético que describe, en esencia, la interacción entre corrientes eléctricas (cargas en movimiento) entre las que hay que incluir las corrientes electrónicas atómicas que dan origen al magnetismo natural.

#### ONDAS ARMÓNICAS

Desde un punto de vista práctico nos interesan los campos electromagnéticos que tienen una estructura periódica, ya que son los utilizados tanto para transportar energía como para propagar información. Además estos campos periódicos podemos describirlos como una superposición de ondas armónicas (teorema de Fourier), ondas de forma sinusoidal donde se reflejan claramente sus propiedades.

La expresión general de una onda armónica para el campo eléctrico viene dada por:

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \vec{E}_0(\vec{R}) \cdot \text{sen}(\vec{k} \cdot \vec{R} - 2\pi f \cdot t + \varphi)$$

donde cada uno de los parámetros nos proporciona información. En la amplitud de la onda,  $\vec{E}_0$ , encontraremos la dirección del campo eléctrico y su valor máximo.

Si el campo se mantiene o no siempre en la misma dirección lo caracterizaremos con el concepto de polarización, que más adelante comentaremos. Además, en el valor de la amplitud encontraremos también re-

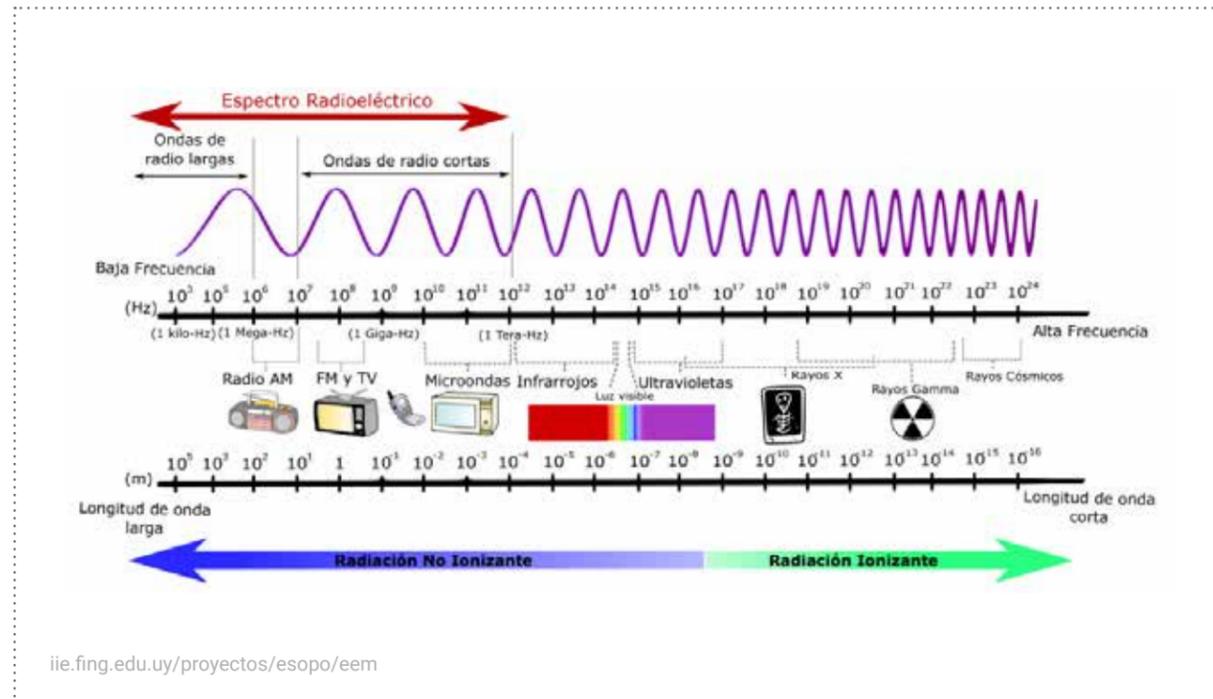
1. **James Clerk Maxwell** (13 de junio de 1831-5 de noviembre de 1879) fue un científico escocés especializado en el campo de la física matemática. Su mayor logro fue la formulación de la teoría clásica de la radiación electromagnética, que unificó por primera vez la electricidad, el magnetismo y la luz como manifestaciones distintas de un mismo fenómeno. Las ecuaciones de Maxwell, formuladas para el electromagnetismo, han sido ampliamente consideradas la "segunda gran unificación de la física", siendo la primera aquella realizada por Isaac Newton.

“La unificación completa de la descripción y comportamiento de las ondas electromagnéticas, entre las que se incluye la luz, facilitó la comprensión de las Ondas electromagnéticas”.

flejada la cantidad de energía que propaga la onda e información sobre su posible atenuación.

La frecuencia  $f$  nos dice el número de veces que el campo electromagnético oscila cada segundo, una oscilación por segundo es lo que se llama un hercio o Hertz (Hz), lo cual nos va a permitir clasificar el espectro electromagnético a la vez que discutir los posibles efectos energéticos que puede causar cada onda sobre la materia en caso de ser absorbida. Como vemos en la imagen de la página siguiente, esta frecuencia puede ser desde cero hasta más de un cuatrillón de veces por segundo (1 cuatrillón =  $10^{24}$ , ¡Un uno seguido de veinticuatro ceros!).

El espectro completo de ondas electromagnéticas incluye desde las ondas de muy baja frecuencia, del or-



▲  
**Diagrama del espectro electromagnético mostrando la frecuencia, el tipo y la longitud de onda.**

den de unas decenas de hercios donde se encuentra la propia corriente eléctrica que alimenta nuestras casas (50 Hz), hasta las posibles radiaciones de muy alta frecuencia (rayos gamma y rayos cósmicos). Entre ambos límites están todas las ondas de radio (AM y FM), las de televisión, las microondas (utilizadas en telefonía móvil, en los radares y en hornos caseros e industriales), los infrarrojos (que causan esa sensación de calor), la pequeña franja del espectro que supone la luz visible, el ultravioleta (responsable entre otros muchos efectos de la pigmentación de la melanina de nuestra piel para obtener el bronceado) y los rayos X utilizados, entre otras aplicaciones, en diagnóstico sanitario.

Cuando nos referimos a la propagación de una onda electromagnética en el vacío (el aire a presión atmosférica puede considerarse como tal en muchas ocasiones) nos encontramos que **todas** las ondas electromagnéticas se propagan con la misma velocidad, la conocida como 'velocidad de la luz'. Cuando las ondas se propagan en un medio material no lo hacen todas con la misma velocidad, ya que el medio se comporta de manera diferente frente a las diferentes frecuencias teniendo lugar una relación de dispersión, tal y como ocurre cuando incidimos con luz blanca sobre un prisma óptico.

La dirección de propagación de una onda viene contenida en la dirección del vector de ondas  $\vec{k}$ , cuyo módulo, inversamente proporcional a la longitud de onda  $\lambda$  (distancia espacial entre dos máximos consecutivos de la onda), nos permite deducir la velocidad de propagación de dicha perturbación.

La naturaleza de todas las ondas electromagnéticas es la misma y sus características energéticas pueden clasificarse en función de su frecuencia. En particular, la luz solo supone una pequeña franja del espectro, desde el rojo hasta el violeta, con la peculiaridad de que llevamos incorporados los detectores (ojos) en nuestro organismo. Detectores a través de los cuales adquirimos gran parte de información pero que no son todo lo extremadamente sensibles, por su capacidad integradora, para obtener la información completa que puede incorporar una onda luminosa.

**HABLEMOS DE ENERGÍA**

Cuando las ondas se propagan por el espacio lo hacen transportando una cantidad de energía. En principio, la cantidad de energía máxima viene limitada por las propiedades del medio por el que se propaga la onda, y se verá reflejada en el valor máximo de la

amplitud del campo eléctrico que soporta el medio (o del magnético, recordemos que no son independientes). La limitación viene asociada a que campos eléctricos intensos interactúan con el medio material aumentando la absorción de la onda. Si dicho campo es muy elevado puede provocar, durante su propagación, ionizaciones atómicas y/o moleculares, con la consiguiente ruptura y modificación de la estructura del medio. Cuando se trata de transportar cantidades de energía grandes, se suele hacer en longitudes pequeñas, y se utilizan sistemas confinados (*guías de onda*) que permitan esa utilidad (por ejemplo del generador a la antena, hornos industriales, etc.)

Debemos considerar que la onda transporta la energía en forma de paquetes (*cuantos o fotones*) de energía. En 1905, Albert Einstein demostró con el efecto fotoeléctrico (premio Nobel en 1921 por este hecho) la hipótesis de Max Planck sobre la cuantificación de la energía. La energía de cada uno de esos paquetes viene dada por  $E = h \cdot f$  ( $h$  es la conocida constante de Planck de valor  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J/s y  $f$  la frecuencia de la onda). En consecuencia aquí nos encontramos con que la frecuencia sí es muy relevante. Cada paquete de energía es indivisible y es, por tanto, la cantidad de energía que absorberá un átomo o molécula del medio.

Si tenemos en cuenta que la densidad atómica (número de átomos por unidad de volumen) es muy elevada, y que los propios átomos reaccionan rápidamente a esa absorción de energía, resulta que los procesos que involucran la absorción de dos fotones por el mismo átomo, en un pequeño intervalo de tiempo, son prácticamente imposibles. Como consecuencia, y desde el punto de vista de la posible interacción onda-materia, las radiaciones se clasifican como ionizantes o no ionizantes. Las primeras son aquellas que cada fotón, o paquete mínimo de energía que transporta la onda, tiene energía suficiente para producir la ionización del átomo o molécula arrancándole un electrón. Este fenómeno puede producirse si la energía del fotón es superior a unos pocos electronvoltios, lo que fija que

la frecuencia de la radiación sea superior a los  $10^{15}$  Hz (mil billones de Hz) y que dentro del espectro electromagnético sitúa este tipo de radiación en el rango del ultravioleta o frecuencias superiores.

Las radiaciones, con frecuencias inferiores a la anterior, son incapaces de producir la ionización y por tanto la alteración de las moléculas biológicas tipo ADN o similar. Entre este tipo de radiaciones obviamente se encuentra la luz visible, infrarrojos, microondas, etc. Su efecto principal, debido a la absorción de la energía, es el calentamiento del medio y, en algún caso, pueden ser necesarias para activar algún otro tipo de reacción química, como la comentada anteriormente de la pigmentación de la melanina.

La exposición a radiaciones ionizantes (ultravioleta lejano, rayos X,...) sí que entraña un cierto riesgo de alteración molecular aunque, si la dosis es pequeña, obviamente es un efecto probabilístico y también lo será la probabilidad de efectos nocivos, siendo necesario valorar, en cada caso, los beneficios conseguidos frente a los riesgos asumidos al utilizarlas. En algunos casos, será necesario establecer dosis máximas de exposición en un intervalo temporal para minimizar los riesgos pero, en la actualidad, sería por ejemplo impensable renunciar al poder diagnóstico de, entre otras radiaciones, las radiografías sanitarias y/o industriales. Radiaciones de este tipo (rayos X) generadas por un acelerador (normalmente lineal) se utilizan también para los tratamientos de radioterapia de haz externo.

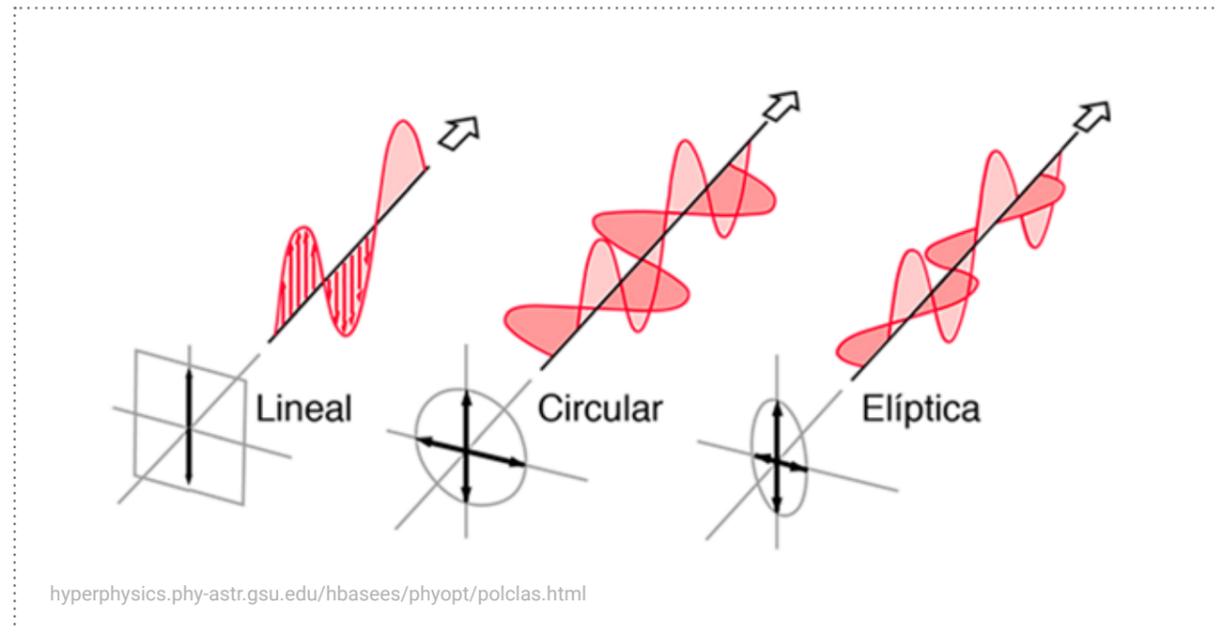
Su misión es destruir el tumor cancerígeno resultando ser una aplicación destructiva pero beneficiosa. La radiación no distingue entre células benignas y malignas, por lo que es necesario determinar con precisión la posición y tamaño del tumor y, si es posible, aplicarla en forma de multihaz, desde diferentes direcciones, que converjan sobre el tumor para que la densidad de energía solo supere los límites 'mortales' en la zona del tumor cancerígeno y no en las células adyacentes.

En nuestro entorno cotidiano, probablemente uno de los mayores usos de las ondas electromagnéticas es la transmisión de información; para ello debemos codificar la onda de alguna manera que luego podamos decodificar para extraer la información transmitida.



◀  
**Torre España,  
Madrid.**

“En nuestro entorno cotidiano, probablemente uno de los mayores usos de las ondas electromagnéticas es la transmisión de información”.



Las señales de radiofrecuencia y las microondas son las frecuencias más usadas, cuando hablamos de propagación libre en el espacio, y el infrarrojo y las microondas cuando hablamos de propagación guiada.

Quizás en este momento debemos recuperar el concepto de polarización. Hemos dicho anteriormente que la amplitud de la onda,  $E_0$ , nos daba información de la dirección de vibración del campo eléctrico. Si esta dirección de oscilación del campo eléctrico permanece constante, diremos que la onda está polarizada linealmente en la dirección dada. Sin embargo es posible que cambie durante el proceso de propagación, si la dirección del campo gira conforme la onda se propaga, manteniendo la amplitud constante en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación, diremos que tiene una polarización circular (el vector amplitud campo eléctrico barre círculos conforme se propaga la onda), mientras que hablaremos de polarización elíptica si la amplitud del campo eléctrico oscila entre un valor máximo y otro mínimo durante esa propagación. En este caso barrerá una elipse y de ahí que la llamaremos polarización elíptica.

▲  
**Tipos de polarización de las ondas (descomposición de la onda en dos ondas planas perpendiculares en el caso de la polarización circular y elíptica).**

**“En nuestro entorno cotidiano, probablemente uno de los mayores usos de las ondas electromagnéticas es la transmisión de información”.**

La observación de las antenas convencionales para sintonizar la televisión terrestre nos sorprende con la disposición horizontal de los elementos de la misma, no por capricho sino para captar mejor la señal de TV que suele tener polarización lineal en la dirección horizontal. Las antenas lineales de radio de los aparatos receptores suelen alargarse en la dirección vertical por la misma razón que ya sabrá discernir el lector. Si nos fijamos en las polarizaciones circulares, nos daremos cuenta de que tenemos dos sentidos de giro del campo eléctrico, dando lugar a polarización levógira o dextrógira. Probablemente el lector ya conozca que la visión en tres dimensiones es posible porque vemos el mismo objeto desde dos posiciones próximas pero diferentes, la posición de los ojos. Para poder visualizar una película en 3D necesitaremos pues rodar dos películas con dos cámaras próximas. Luego en la proyección es necesario asegurarnos de que cada ojo vea su película correspondiente. Esa selección se consigue proyectando cada una de las películas con polarización diferente, y seleccionando con el correspondiente polarizador (lámina que solo deja pasar la luz con una polarización determinada) la película que ve cada ojo, acción que se consigue con las típicas gafas. La interpretación subjetiva de nuestro cerebro hará el resto del trabajo y percibiremos la película en 3D. Se utilizan gafas con polarizadores circulares, levógiro en un ojo y dextrógiro en el otro, porque si fuesen polarizadores lineales cualquier leve inclinación de la cabeza, para apoyarla en la cabeza de la pareja o simplemente esa pequeña cabezada inoportuna, dificultarían el objetivo perseguido.

Poco hemos hablado del campo magnético en una onda electromagnética, esto es debido a que, como hemos citado anteriormente, siempre está asociado al campo eléctrico y presentando un comportamiento similar. Cuando hablamos de ondas electromagnéticas propagándose en medios ilimitados, siempre tenemos que el campo eléctrico y el magnético son perpendiculares y, a su vez, son perpendiculares a la dirección de propagación (se dice que forman un triédro dextrógiro ya que responden a la orientación habitual de los ejes de coordenadas). Por eso decimos que las ondas electromagnéticas son transversales, pero es prudente recalcar que esto no ocurre siempre cuando consideramos una propagación confinada, por ejemplo en una guía de ondas metálica donde pueden aparecer campos eléctricos y magnéticos que no sean perpendiculares ni entre sí, ni a la dirección de propagación.



No podemos terminar sin dedicar unas líneas a dos situaciones ampliamente conocidas, el retraso en la imagen y sonido en las retransmisiones, generalmente deportivas, vía satélite y el uso de los cables coaxiales en los laboratorios de investigación y medida o en la transmisión de señales.

Todos hemos 'sufrido' a la hora de ver una retransmisión deportiva, o de cualquier otro tipo, que si simultaneábamos el televisor con el transistor el sonido de este último iba del orden de un segundo, o incluso más, por delante de la imagen y sonido del primero. Los satélites de telecomunicaciones (Astra, Hispasat, etc) están anclados a la Tierra en órbitas geoestacionarias para girar solidariamente con ella y cubrir siempre la misma zona de cobertura. Dichas órbitas se encuentran a una distancia aproximada de 36.000 km sobre la superficie terrestre. En una retransmisión, la señal (onda electromagnética en el rango de las microondas) suele realizar el viaje de ida y vuelta al satélite dos veces (foco de la noticia-satélite-centro de realización-satélite-receptor doméstico), una distancia aproxima-

da de 144.000 km que a la velocidad 'c' de las ondas electromagnéticas supone un tiempo de 0,48 segundos, a lo que habrá que sumarle algunas décimas de segundo más debidas al procesado digital de la señal. La señal de radio en propagación terrestre apenas recorrerá unos centenares de kilómetros, que en el peor de los casos propagándose a la misma velocidad 'c' le supondrá escasamente uno o dos milisegundos.

Finalmente debemos dedicarle unas líneas al cable coaxial, dos conductores cilíndricos coaxiales, uno normalmente macizo dentro de otro hueco, siendo el externo normalmente una malla de hilos metálicos para conferirle cierta flexibilidad. Es el tipo de cable que propaga la señal desde la antena de TV hasta el receptor y a su vez el tipo de cable más usado en los laboratorios de investigación y medida.

Sus propiedades intrínsecas, de apantallar el interior de lo que ocurre en el exterior y también el exterior de lo que ocurre en el interior, lo convierten en el cable ideal tanto para evitar interferencias en la señal que propaga

como para que esta genere 'ruido' hacia el exterior. En este caso se trata de propagación guiada y los campos están confinados y se propagan en su interior entre ambos conductores. Una vez fijado el aislante que rellena el espacio entre los dos conductores, hay dos características que condicionan su uso: que la potencia transmitida a lo largo del cable sea máxima y/o que la atenuación en la propagación de la señal sea mínima. Si pensamos en propagar una onda TEM (transversal electromagnética), ambas propiedades dependen del cociente entre los radios de los dos cilindros (externo e interno). La primera propiedad, con dieléctrico aire o equivalente, se consigue con un cociente entre radios de 1,65 y la segunda con 3,65 y eso, trasladado a la impedancia del cable que también depende de dicho cociente, supone que la máxima transferencia de potencia se consigue para cables con impedancia de 30  $\Omega$  y la mínima atenuación para 77,5  $\Omega$ . Por esa razón, los cables de antena de TV utilizan cables similares a los del segundo tipo (impedancia 75  $\Omega$ ), la señal es débil e interesa se atenúe lo mínimo posible antes de alcanzar el receptor. En sistemas que debamos soportar una

gran transferencia de potencia, para alimentar una antena que debe radiar luego esa energía a todo el espacio por ejemplo, habrá que utilizar los primeros. ¿Y en el laboratorio? En condiciones generales utilizaremos una solución intermedia, cociente entre radios igual a 2,3 e impedancia igual a 50  $\Omega$ , que supone una atenuación solo superior en un 10 % a la mínima y una transferencia de potencia posible de casi el 86 % de la máxima.

Probablemente el lector echará de menos otras referencias a radares meteorológicos o de vigilancia, láseres de corte industrial o quirúrgicos, radiaciones de electrodomésticos, interferencias entre señales, toda la problemática de compatibilidad electromagnética, etc. Todo ello no será más que una justificación adicional del título del artículo.

Juan Pablo Martínez Jiménez  
Dpto. Física Aplicada  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Zaragoza

#### Cables coaxiales.



#### Luz blanca atravesando un prisma.

