

Antenas: Elementos Indispensables de las Telecomunicaciones

Jaume Anguera y Aurora Andújar

Resumen — Desde que el físico escocés James Clerk Maxwell postuló en 1865 la existencia de ondas electromagnéticas y que en 1888 el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz demostró experimentalmente su existencia, la ingeniería de antenas ha evolucionado para satisfacer las siempre crecientes necesidades de enviar y recibir información a través del aire y poderse telecomunicar. En el artículo, se explican los parámetros básicos de antenas, qué papel juegan los materiales conductores y dieléctricos que las componen, para posteriormente presentar herramientas de análisis tanto computacionales como experimentales. Finalmente, se muestran algunas aplicaciones donde la antena es un elemento indispensable.

Palabras clave—antenas, telecomunicación, ondas electromagnéticas

I. INTRODUCCIÓN

El interés del ser humano para comunicarse a largas distancias se remonta a épocas remotas. Algunas muestras las encontramos con fines militares con el objetivo de avisar de las acciones del enemigo. El ingenio es tal que aparte de telecomunicarse (*tele*, del griego, *lejano*), se añade encriptación al mensaje. Por ejemplo, en el siglo II A. C., Aeneas Tacticus ideó un telégrafo hidráulico utilizado en la primera guerra Púnica (Fig. 1). En dicho sistema, el emisor y el receptor abrían unas válvulas en un recipiente en base a las señales con las antorchas. Mediante una varilla situada en el recipiente se podía descifrar el mensaje. Es una muestra de no solo telecomunicarse sino además añadir un encriptado a la información.



Fig. 1 Izquierda) telégrafo hidráulico inventado por Aeneas Tacticus en el siglo III a. C. utilizado en la 1ª Guerra Púnica. Limitado a línea de visión directa y condiciones meteorológicas estables; derecha) Torre de las chimeneas, Corea del Sur

Otro ejemplo con el mismo fin, lo encontramos en Corea del Sur con el sistema de alarma conocido como Bongdon (Fig. 1). El código empleado era: en condiciones normales, solo había encendida una chimenea; se encendían dos si el enemigo se acercaba a la frontera o a la costa; tres si el enemigo había llegado a la frontera o a la costa; si la había cruzado, 4; si combatían, las 5 estaban encendidas. Durante el día se utilizaba el humo para transmitir el código y por la noche, el fuego [1].

Entre los avances a destacar, se encuentra el del ingeniero militar canario Agustín Betancourt en 1798 llegando a conseguir un proyecto que logró una instalación telegráfica óptica entre Madrid y Aranjuez, aunque el proyecto era mucho más ambicioso y que no pudo completarse por crisis financiera del momento [2].

Acercándonos en el tiempo, nos encontramos en 1836 la revolución introducida por el telégrafo inventado por el americano Samuel Morse (Fig. 2). La gran diferencia con respecto a los anteriores es la posibilidad de comunicarse aunque no exista visión directa entre emisor y receptor. El inconveniente: se necesita cablear. Parecía pues interesante combinar la ventaja de los sistemas de telecomunicación sin hilos y sin tener la necesidad de visión directa entre emisor y receptor.

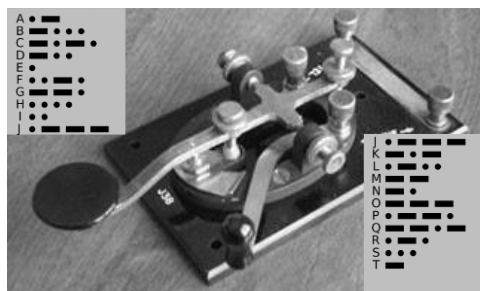


Fig. 2 Telégrafo inventado por el americano Samuel Morse en 1836

Para encontrar un punto de inflexión trascendente tenemos que trasladarnos a finales del siglo XIX donde la teoría propuesta por el escocés James C. Maxwell iba a ser la catalizadora de la revolución de la telecomunicación sin hilos.

II. PIONEROS

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) publicó por primera vez las ecuaciones que hoy llevan su nombre en el *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* en 1865 [3]-[5]. Con sus ecuaciones, Maxwell resumió el trabajo previo de Oersted, Gauss, Ampère, Faraday. Introdujo el término conocido como corriente de desplazamiento, un matiz de suma trascendencia, pues con dicho término ligó los fenómenos eléctricos con los magnéticos de tal forma que demostró la existencia de ondas electromagnéticas a nivel teórico (Fig. 3).

Las ecuaciones de Maxwell son la pieza clave para el análisis de las ondas guiadas y radiadas¹ estando presentes en las herramientas de cálculo numérico para poder analizar por ordenador entornos complejos de antenas como por ejemplo antenas embarcadas en aviones (Tabla 1).

$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Ley de Divergencia para el campo eléctrico
$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0$	Ley de Divergencia para el campo magnético
$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}$	Ley de Faraday
$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \int_S \frac{d\vec{D}}{dt} \cdot d\vec{S}$	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt}$	Ley de Ampère-Maxwell

Tabla 1 Ecuaciones de Maxwell en forma integral i diferencial: mediante su manipulación matemática se analizan las ondas guiadas y radiadas

¹ Una onda guiada es una onda que se mantiene confinada en un espacio limitado, por ejemplo, una onda de luz (onda electromagnética) propagándose por el interior de una fibra óptica. Una onda radiada, por el contrario, no está confinada, sino que se propaga por el aire u otro medio para llegar a una antena receptora

Por su parte, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemán, demostró experimentalmente en 1888 la existencia de ondas electromagnéticas a partir de un dipolo (hilo conductor) cargado con esferas metálicas. Maxwell, aunque teorizó sobre las ecuaciones de propagación de ondas electromagnéticas, no dejó indicado ningún método para generarlas. Es más, murió sin ver la brillante demostración experimental de Hertz que sirvió para que se aceptara la teoría de Maxwell de forma universal.

Es notable destacar que previo a todo el trabajo de Maxwell y Hertz, Francisco Salvá y Campillo (1751-1828), médico, físico e inventor catalán en un artículo titulado "La telegrafía de chispas como invento de origen español" escrito el 16 de diciembre de 1795, promulgaba que no es necesaria ninguna cuerda para comunicarse entre dos puntos distantes: "los físicos eléctricos podrán disponer en Mallorca una superficie o cuadro grande cargado de electricidad, y otro en Alicante, privado de ella, con un alambre que desde la orilla del mar llegue cerca de la tal superficie. Otro alambre que desde la orilla de la mar de Mallorca se extienda y haga tocar el cuadro, que se supone allí cargado de electricidad, podrá completar la comunicación entre las dos superficies; y corriendo el fluido eléctrico por la mar, que es un conductor excelente, desde la superficie positiva dará con su estallido el aviso que se requiere". Años más tarde, Guglielmo Marconi (1874-1937), ingeniero italiano, ganador del Premio Nobel de física, realizó la primera transmisión transatlántica de ondas electromagnéticas entre Gales y Terranova, cubriendo un total de 3400 kilómetros iniciando así la era de las telecomunicaciones comerciales [6].



Fig. 3 a) El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) publica por primera vez las ecuaciones que hoy llevan su nombre en el *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* en el año 1865; b) Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemán que demostró en el año 1888 la existencia de ondas electromagnéticas a partir de un dipolo cargado con esferas metálicas; c) Francisco Salvà Campillo (1751-1828), médico, físico e inventor catalán. En 1795 promulgó que no es necesaria ninguna cuerda para comunicarse entre dos puntos distantes; d) Guglielmo Marconi (1874-1937). Ingeniero italiano, premio Nobel de física. Realizó la primera transmisión transatlántica de ondas electromagnéticas entre Gales y Terranova, cubriendo un total de 3400 km

III. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Con el objetivo de entender qué es una antena y el gran abanico de aplicaciones que de ella se derivan, se introduce en esta sección una serie de conceptos básicos.

A. Antena

La definición formal de antena según el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) es “dispositivo capaz de emitir y recibir ondas electromagnéticas” [7]. ¿Y qué es una onda electromagnética? Para definirlo de forma sencilla primero ilustremos qué es una onda. Una onda gráficamente hablando, una magnitud que se mueve por el espacio. Por ejemplo, una onda acústica, es una variación de presión que avanza de un emisor hacia un oyente. Luego una onda electromagnética es una magnitud, intensidad eléctrica y magnética, que avanza por el espacio. Esta onda, por ejemplo, ha sido creada por una antena y lleva a caballo información que viaja por el espacio y que llega a un receptor.

B. Frecuencia

Uno de los conceptos íntimamente ligado a las antenas es la frecuencia pues esta determina el tamaño físico de la misma. La frecuencia de una onda electromagnética puede entenderse utilizando un símil acústico, es decir, empleando la frecuencia de una onda acústica. Imaginemos un piano de cola (Fig. 4). Un *do* producido por una cuerda larga produce un sonido de baja frecuencia (sonido agudo). En cambio, un *do* producido por una cuerda corta produce un sonido de alta frecuencia (sonido grave). Las frecuencias se miden en Hertzios en honor a Hertz (Fig. 3), por ejemplo, el sonido de una onda acústica *la* del diapasón es de 440 Hertzios (en el aire), abreviado como 440Hz.

La gran conclusión de este sencillo ejemplo tan conocido por todos es que la frecuencia determina el tamaño de la cuerda. Así pues, si se desea que un instrumento de cuerda emita sonidos de baja frecuencia, deberá tener cuerdas largas y, por el contrario, si se desea que emita sonidos de alta frecuencia, deberá tener cuerdas cortas. Por tanto, el tamaño de la cuerda es inversamente proporcional a la frecuencia. Lo mismo sucede con las antenas. Una vez fijada la frecuencia a la que debe trabajar, el tamaño de la antena queda determinado. Por ejemplo, si una estación de radiodifusión de radio comercial FM emite a una frecuencia de 100MHz² tendrá una antena de un tamaño mayor que una antena de una estación comercial de televisión que emita a 600MHz pues en este segundo caso la frecuencia es mayor y el tamaño de la antena será menor en términos generales.

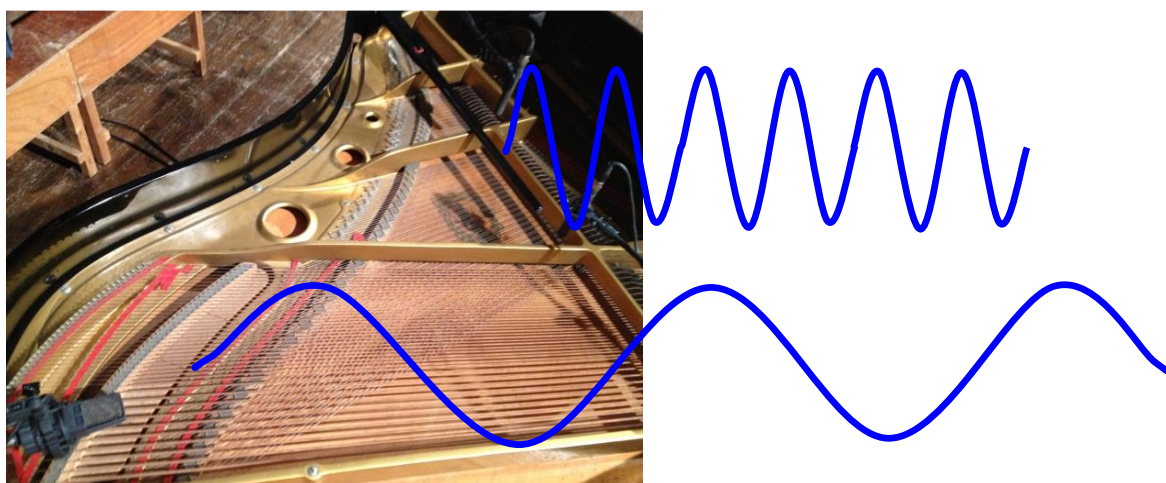


Fig. 4 Las cuerdas largas producen sonidos graves (baja frecuencia – longitudes de onda larga) en comparación a las cuerdas cortas que emiten sonidos agudos (alta frecuencia – longitudes de onda corta). La longitud de onda es la separación entre dos crestas (máximos) de la onda

² 1MHz equivale a 1000000Hz

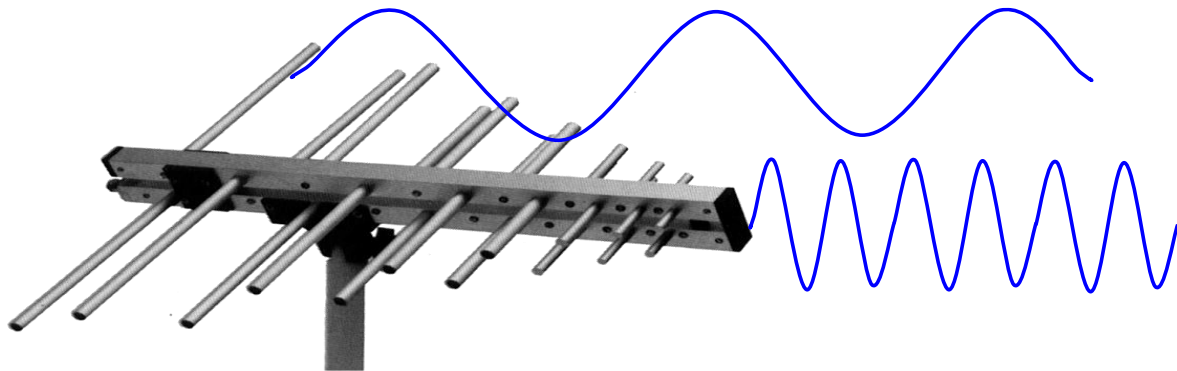


Fig. 5 Antena formada por varios hilos conductores de diferente longitud (antena conocida como logoperiódica). Al igual que un piano, los hilos conductores de mayor longitud radian ondas de menor frecuencia que los hilos cortos. El mecanismo de excitación se escapa del alcance del artículo

A modo de ejemplo y mimetizando el piano, se encuentra la antena logoperiódica (Fig. 5). Cada tramo recto es un conductor capaz de excitar³ una frecuencia siguiendo la analogía acústica del ejemplo del piano de cola. De este modo, este tipo de antena es capaz de radiar y recibir en un gran margen de frecuencias. Se trata de un tipo de antena útil para mediciones de la radiación electromagnética producida de forma no deseada por dispositivos electrónicos como por ejemplo impresoras, batidoras, etc. Al no saber la frecuencia de dicha onda electromagnética emitida por el equipo bajo medida, es necesario una antena capaz de poder recibir en un gran abanico de frecuencias (antena de banda ancha). Imaginemos lo incómodo que sería que cada vez que funcionase la batidora, la onda emitida de forma no deseada por el circuito electrónico interfiriese con el televisor provocando una imagen borrosa. A la disciplina que trata sobre la medición de fuentes de ruido electromagnético emitidas por dispositivos electrónicos y a las técnicas para mitigarlas se le denomina EMC (compatibilidad electromagnética).

Y para finalizar, de forma genérica, el rango de frecuencias se divide en ondas de radio, microondas, terahercio, infrarrojo, visible (las ondas de luz), ultravioletas y rayos X y se conoce como espectro electromagnético. En el campo de antenas se abarca desde las ondas de radio hasta el visible (Fig. 6).

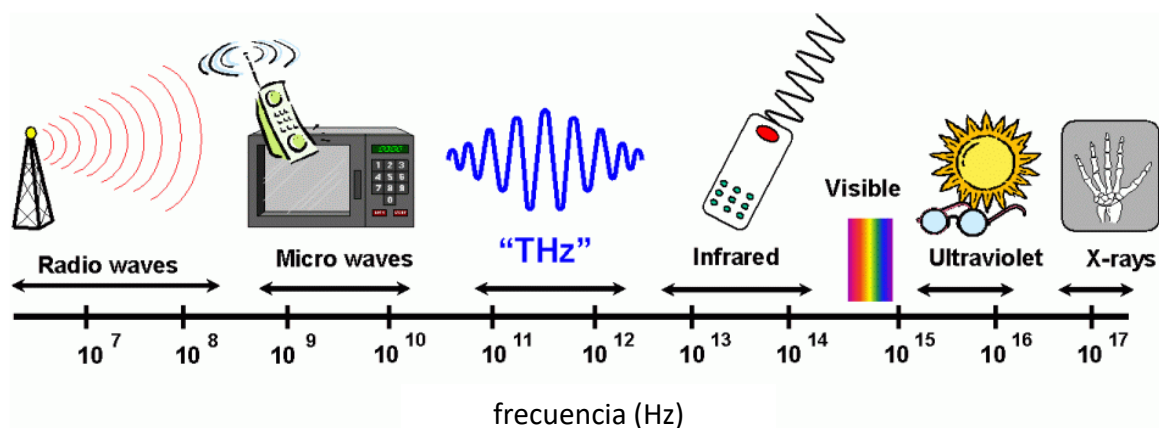


Fig. 6 Espectro electromagnético

C. ¿Luz más luz?

“¿Luz más Luz? Oscuridad”⁴. Esta frase antagónica a primera vista es sumamente trascendental para entender muchos de los fundamentos de propagación de ondas y, por tanto, de cómo radian las

³ Estrictamente el conductor no genera ondas, sino que impone unas condiciones de contorno para que se puedan generar a una determinada frecuencia

⁴ F. Maraña, profesor de física de Ingeniería de Telecomunicación, Universitat Ramon Llull

antenas. Imaginemos una onda, que por simplicidad y sin pérdida de generalidad sea una ola marina que viaja hacia la derecha (Fig. 7a, b). Y sea otra ola de la misma altura que viaja en sentido contrario. Existe un instante en el tiempo y un punto en el espacio en que ambas olas se encuentran y producen una ola de altura doble (Fig. 7c). Después de ese instante, cada ola sigue su recorrido (Fig. 7d).

Sea el mismo ejemplo, pero ahora considerando que la ola que se propaga desde la derecha tiene una amplitud negativa (Fig. 8a). Existe un instante en el tiempo y en el espacio que existe una cancelación total (Fig. 8b). Después de ese instante, cada ola sigue su camino (Fig. 8c).

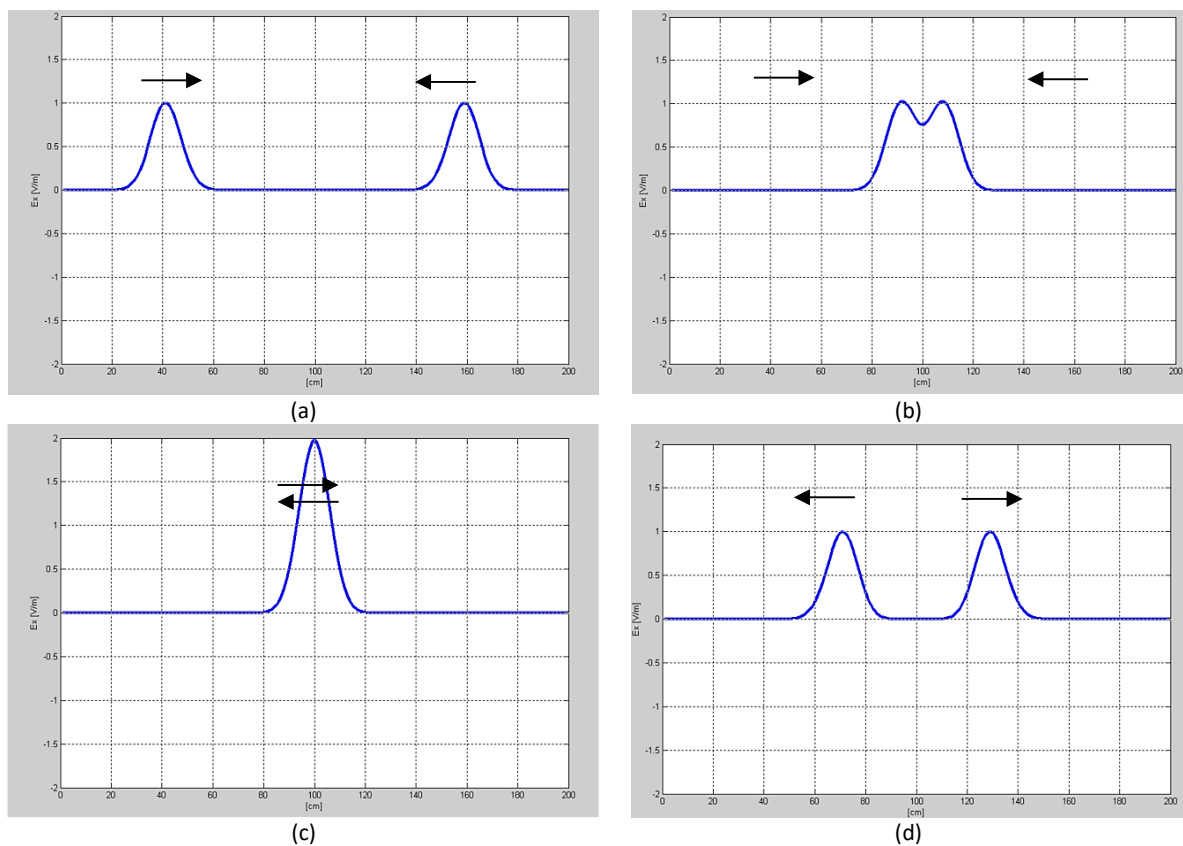


Fig. 7 a) Ondas propagándose en sentidos contrarios; b) interferencias de ondas al encontrarse; c) coincidencia de las ondas en el mismo espacio; d) ondas después de la superposición

La conclusión que en términos generales se deriva de este ejemplo es que si de alguna forma conseguimos manipular la amplitud de las ondas y el tiempo en que son creadas, se puede conseguir que en unas determinadas direcciones del espacio haya amplitudes máximas debido a la suma constructiva de las ondas, en otras mínimas, y en otras direcciones un estado intermedio. Esto resulta útil para el caso de que la radiación electromagnética producida por una antena no se desee transmitir por igual en todas las direcciones del espacio, sino que se quiera ponderar la distribución de potencia de forma que haya unas direcciones en que se radie más y en otras menos. Por ejemplo, imaginemos una antena en una autopista que tenga que dar servicio únicamente a los usuarios de la misma. Si la antena se diseña de forma adecuada siguiendo el principio aquí explicado, es posible que la potencia se distribuya principalmente en el área de la autopista sin emitir potencia fuera de ellas lo que supone un ahorro de consumo al no enviar potencia en direcciones no deseadas.

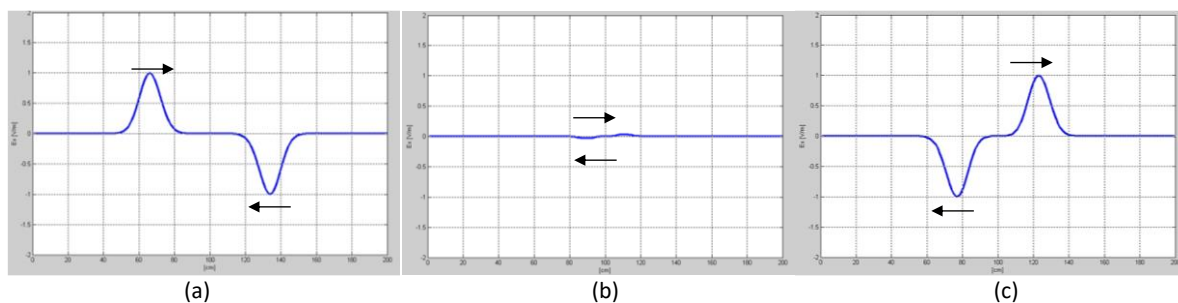


Fig. 8 a) Ondas propagándose en sentidos contrarios y con amplitudes opuestas; b) interferencia destructiva; c) las ondas siguen su camino

D. Polarización

Las ondas acústicas como las producidas por nuestra voz es lo que se denomina una magnitud escalar, es decir, un número. Este número puede significar la presión de la onda. Más presión equivale a más volumen. Este concepto de escalar se diferencia del de vectorial que podemos entender como una magnitud que además depende de la dirección. Imaginemos una situación de dos personas, uno habla y otro escucha. La persona que escucha va a oír lo mismo independientemente de que el emisor hable situado vertical u horizontalmente (Fig. 9). Esto es precisamente porque la onda acústica es una magnitud escalar, un número, presión, que es lo que percibe finalmente el receptor, independientemente de la posición horizontal o vertical del emisor.

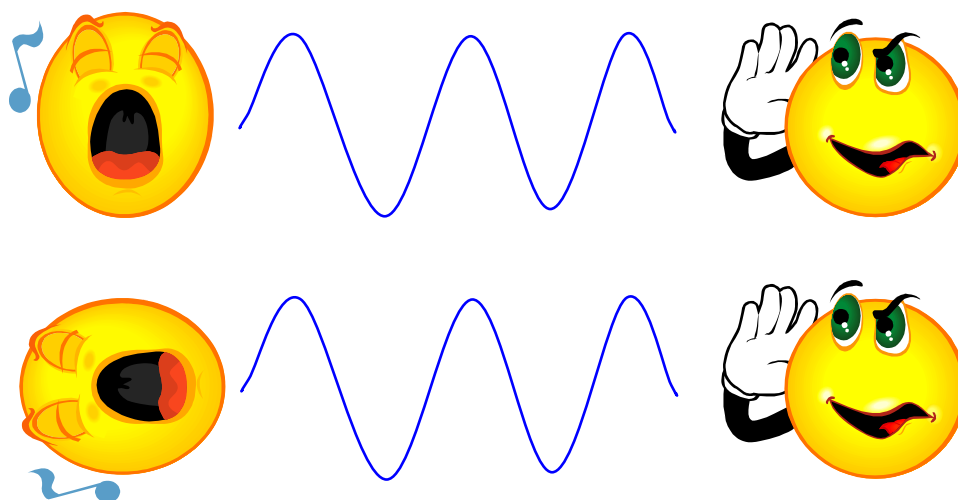


Fig. 9 La recepción de una onda acústica es independiente de la orientación del emisor

Para las ondas electromagnéticas, la situación cambia radicalmente pues ahora sí que la onda tiene un carácter vectorial, es decir, el usuario recibirá la onda únicamente si está con su receptor alineado en el mismo sentido que las ondas. Para ilustrar este ejemplo nos referimos a la Fig. 10. En el caso *a*, el emisor emite una onda electromagnética que se propaga hacia el receptor como una onda orientada en sentido vertical. Si el receptor tiene una antena sensible a esta dirección, será capaz de captar dichas ondas. Análogamente, si el emisor emite ondas electromagnéticas en sentido horizontal como en el caso *b*, el receptor podrá captarlas si tiene una antena sensible a recibir ondas en dicha dirección. Si el receptor tuviese una antena sensible a la recepción de ondas verticales como refleja el caso *c*, no sería capaz de recibir nada. A este fenómeno en que la onda puede oscilar en una dirección determinada se le denomina polarización. Es importante subrayar que nada tiene que ver la dirección de propagación de la onda con la dirección de la polarización (Fig. 10). Por ejemplo, en el caso de la Fig. 10a, la dirección de propagación es de emisor a receptor y la dirección de la polarización es vertical.

La polarización tiene utilidad por ejemplo para enviar más información y para crear un sistema robusto. En cuanto al primero, imaginemos un área geográfica que por simplicidad del ejemplo supondremos una pequeña sala (Fig. 11). En esta pequeña sala ubicamos cuatro personas. El objetivo es que las personas 1 y 2 quieran hablar de un tema en particular, independientemente de la 3 y 4 que están hablando de otro asunto. Si la comunicación fuese por vía acústica, la información que envía la persona 1 a la 2, podría ser recibida por la 3 y por la 4. Del mismo modo, la información enviada por la persona 3 podría ser recibida por la 1, 2 y 4. Esto produce por un lado interferencia, pues si el 1 y 3 emiten señales al mismo tiempo, los receptores 2 y 4 reciben las dos al mismo tiempo no entendiendo el mensaje deseado. Naturalmente, la información tampoco es confidencial porque el usuario 2 podría escuchar que dice el 3 en caso de que el 1 no estuviese hablando. Esta situación es fácil de entender si nos trasladamos a un restaurante donde a medida que entra más gente, el volumen de las conversaciones sube. Esto es debido a que para no oír lo de las mesas vecinas, tengamos que subir el volumen para que el que está más cerca de nosotros perciba la voz.

Para las ondas electromagnéticas la situación es totalmente diferente gracias a que las ondas electromagnéticas pueden polarizarse, es decir, se les puede decir en que orientación oscilen. Volviendo el mismo ejemplo, si asumimos que el usuario #1 tiene una antena capaz de emitir y recibir ondas electromagnéticas polarizadas en la dirección vertical, no va a recibir nada de la información del #3 que emite ondas en sentido horizontal. Para este caso, el usuario #2 únicamente recibe información del #1 y el #4 del #3 evitando la interferencia y asegurando la confidencialidad de la información.

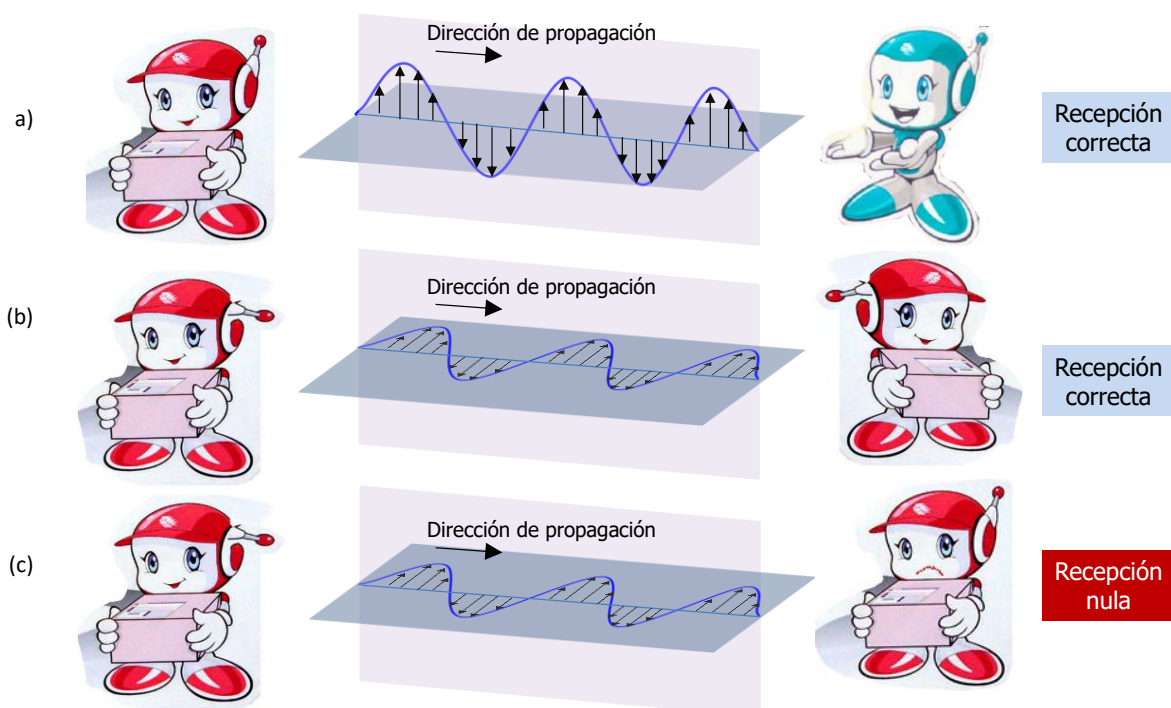


Fig. 10 a) Emisor emitiendo una onda electromagnética polarizada verticalmente. La recepción es correcta dado que el receptor tiene una antena sensible a dicha polarización; b) Caso análogo al anterior pero ahora con polarización horizontal; c) el emisor emite una onda polarizada horizontalmente, pero en este caso el receptor no recibe nada puesto que la antena es sensible únicamente a la polarización vertical

Obsérvese que en el caso de la Fig. 11, utilizando la misma frecuencia de operación, se puede enviar información por la polarización vertical y otra por la horizontal. Si los usuarios 3 y 4 tuviesen una antena operando a otra frecuencia, podrían operar con la misma polarización sin llegar a interferirse. Esta opción sin embargo ocupa más frecuencias del espectro electromagnético y en algunas situaciones se opta por la primera opción.

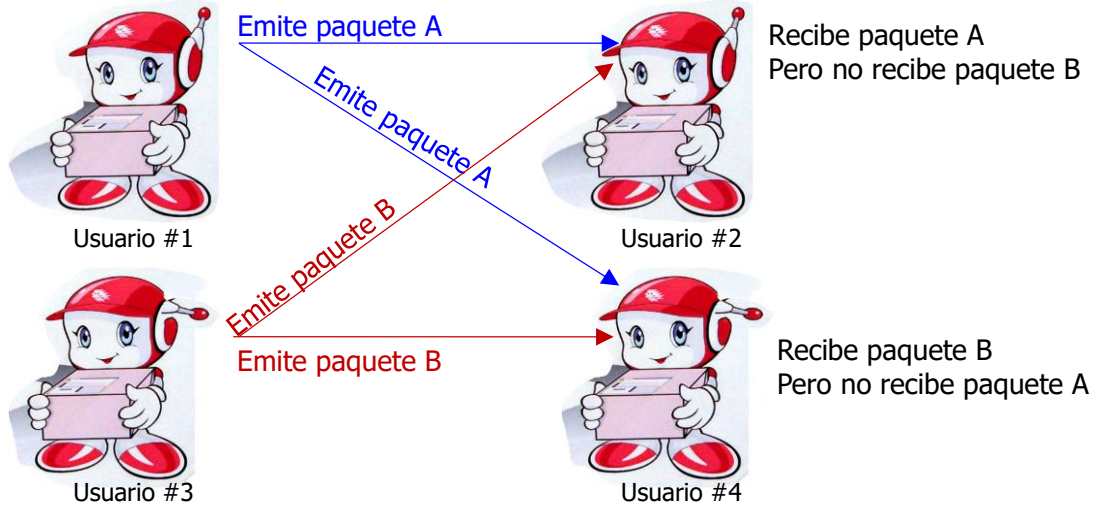


Fig. 11 El usuario #1 se comunica únicamente con el usuario #2 pues sus antenas son capaces de emitir y recibir la misma polarización (vertical); el usuario #4 a su vez únicamente recibe información del usuario #3 pues sus antenas son capaces de emitir y recibir la misma polarización (horizontal); ni el usuario #2 recibe del #3, ni el #4 del #1 por ser las antenas receptoras sensibles a una polarización que es perpendicular a la del transmisor

Trasladémonos ahora a una situación como las comunicaciones móviles (Fig. 12). La pregunta que cabe formularse es: ¿qué sucede si la antena de estación base de telefonía móvil situada en el tejado de un edificio es sensible a una polarización vertical y un usuario que hablando por su móvil y por tanto enviando información a dicha estación base, no tiene su antena emitiendo con la misma polarización? De hecho, el usuario cuando habla puede estar sujetando el teléfono en un gran abanico de posiciones, cada una de ellas provoca que las ondas que emite vayan desde una polarización vertical a la horizontal pasando por todas las intermedias dependiendo de cómo esté orientado la antena del terminal móvil (Fig. 12). Para evitar que la estación base no reciba nada, se diseñan antenas avanzadas que son capaces de recibir cualquier polarización. Por ejemplo, en la estación base existe un tipo de antena capaz de recibir ondas electromagnéticas polarizadas verticalmente, horizontalmente y en cualquier estado intermedio con lo que el receptor es robusto al usuario el cual va cambiando la orientación de su antena de forma dinámica.

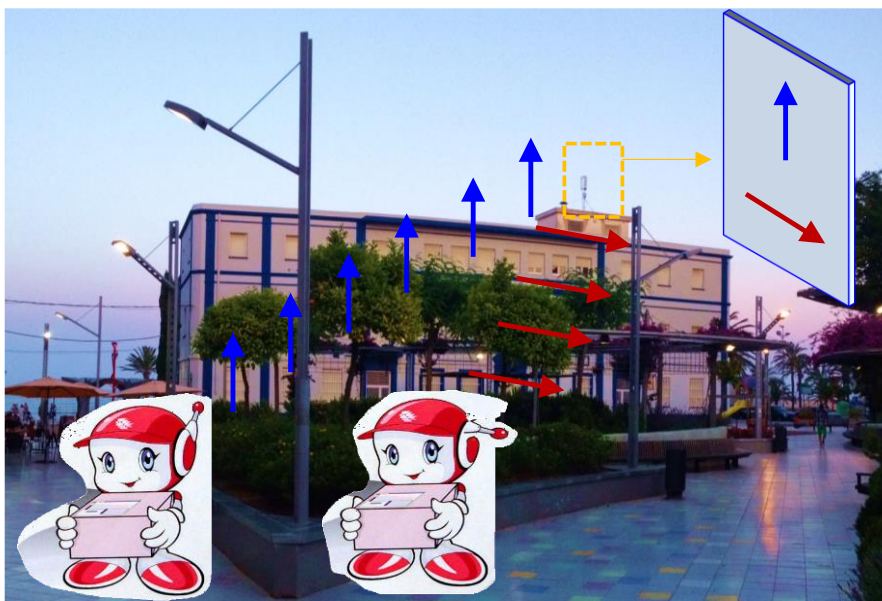


Fig. 12 En entornos de comunicación móvil, las antenas situadas en los tejados de los edificios son sensibles a poder recibir cualquier polarización dado que la onda emitida por el usuario puede estar polarizada en cualquier orientación

E. Propagación omnidireccional

Una antena es un dispositivo que radia/recibe la potencia al/del espacio siguiendo un patrón que depende de la dirección. A modo de ejemplo, realizando un símil acústico, se puede imaginar que nuestra boca es una antena transmisora. La voz emitida es recibida por un oyente de forma distinta dependiendo de la posición en la que se encuentre con respecto al transmisor. Si el oyente se sitúa enfrente, la potencia acústica recibida será mayor que si se sitúa, por ejemplo, a la misma distancia, pero detrás. Si el oyente describiese un círculo teniendo como centro el emisor, y fuese anotando en una carta polar la potencia acústica recibida, daría como resultado un patrón de potencia recibida en función de la dirección. A este patrón se le denomina diagrama de radiación. En las antenas sucede prácticamente lo mismo, con la diferencia que la potencia acústica es ahora potencia electromagnética. Por tanto, el diagrama de radiación de una antena define la forma de radiar/recibir la potencia en función de la dirección.

Según cómo se diseñen las antenas, estas pueden radiar la potencia de forma igual en todas las direcciones de espacio. Uno de los casos más sencillo de radiación es la radiación omnidireccional que como su nombre indica es la capacidad de una antena de radiar por igual en todas las direcciones del espacio (estrictamente, en todas las direcciones que correspondan a un plano). Para visualizar la radiación omnidireccional, recurramos a un ejemplo en el que un niño se encuentra en un estanque con el agua en reposo. En un instante, el niño arroja una piedra en el centro del estanque con lo que origina lo que todos alguna vez hemos visto, una propagación de la onda describiendo un círculo (Fig. 13). Es precisamente esto lo que una antena puede realizar, producir una onda electromagnética que se propague por igual en todas las direcciones del espacio. Las antenas de hilo conductor conocidas como monopolos o dipolos producen este tipo de radiación. La aplicación de este tipo de radiación la tenemos en radiodifusión de FM comercial donde una antena situada en lo alto de una montaña o edificio es capaz de radiar potencia de forma omnidireccional al espacio lo cual es útil pues ofrece cobertura a todos los usuarios a su alrededor (Fig. 13).

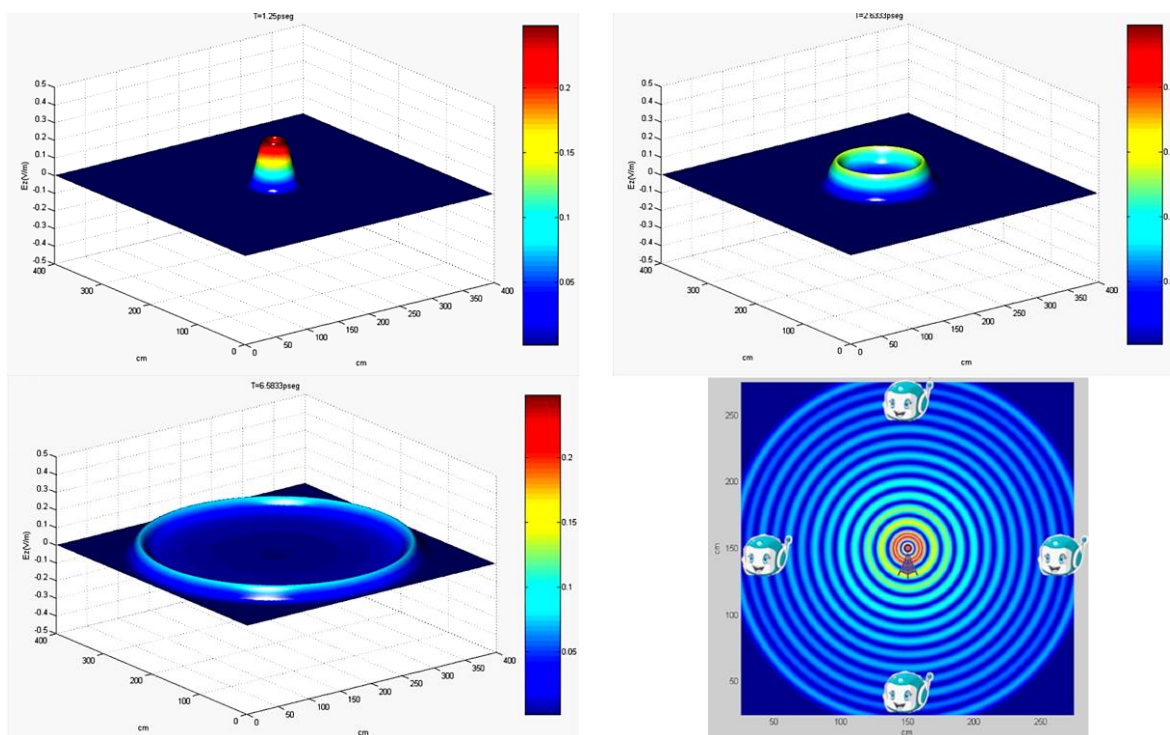


Fig. 13 Diferentes instantes de la propagación de una onda omnidireccional. El carácter omnidireccional de radiación de una antena tiene su utilidad con el receptor puede estar en cualquier dirección con respecto a la antena transmisora.

Nota: la amplitud de la onda está asociada a un código de colores, rojos, más amplitud y azules, menos amplitud. Los colores rojos reflejan más potencia; los amarillos y verdes, potencia intermedia, y los azules potencia muy débil

F. Propagación direccional

En muchas aplicaciones de telecomunicación se requiere que la potencia al espacio se distribuya en una determinada dirección en vez de en muchas en particular. Imaginemos el ejemplo de una comunicación Tierra-satélite. La antena en el satélite debe radiar únicamente hacia la Tierra y no hacia otros lugares, de no ser así, se desperdicia potencia en direcciones donde no hay nadie. Esta capacidad de concentrar la potencia tiene un efecto positivo en el receptor pues radiando la misma potencia, el receptor percibe como si el emisor emitiese más potencia. Volviendo al símil acústico. Imaginemos que una persona le habla a otra. La voz la oye la persona justo en frente y con la misma intensidad aproximadamente, una persona situada a la misma distancia, pero a su derecha. Si ahora la persona se coloca las manos en la boca y habla con la misma intensidad, la persona justo en frente percibirá que la voz le llega con más volumen, aunque la potencia del emisor sea la misma. Por el contrario, la persona justo a la derecha va a recibir mucho menos. En los dos casos, la potencia acústica del emisor es la misma pero no la percepción en cada usuario.

A la capacidad de una antena para concentrar la radiación, se le denomina directividad. Una antena con alta directividad es aquella capaz de apuntar la radiación en una determinada dirección. Por el contrario, una antena de baja directividad, es aquella que radia en muchas direcciones con la misma intensidad. De aquí se concluye que una antena omnidireccional presenta poca directividad.

La pregunta es pues clave: ¿cómo puede una antena conseguir que la potencia se radie en una determinada dirección y poco en otras? Existen varios mecanismos como puede ser el de dotar a la antena de una cierta geometría capaz de concentrar la potencia en una determinada dirección. Otros mecanismos consisten en utilizar varias antenas y jugar con el concepto de *luz más luz*. Nos centramos en este último por ser el que más grados de libertad ofrece para colocar el máximo de radiación en una determinada dirección.

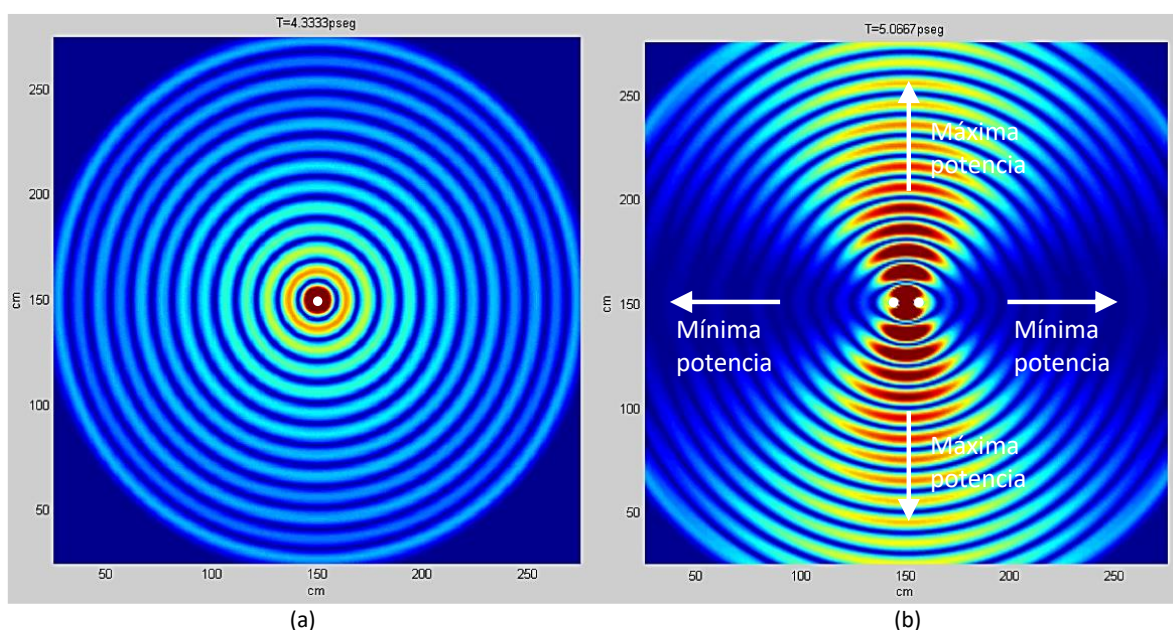


Fig. 14 a) Propagación omnidireccional; b) propagación direccional donde se radia más hacia en unas direcciones (donde se encuentra el receptor de interés) y muy poco en otras. Los círculos indican la antena emisora (una para el caso a) y dos para el caso b)

De forma simplificada y volviendo al ejemplo del niño del estanque. Supóngase que ahora el niño tiene dos piedras de idéntico tamaño y que las lanza al mismo tiempo sobre el estanque de forma que una la deja caer con la mano derecha y la otra con la izquierda y sigue repitiendo el experimento con una cierta frecuencia. ¿Qué sucede? Obviando el efecto de la distancia entre las manos (la distancia tiene un efecto que no se trata en esta divulgación), la onda resultante presenta una amplitud mayor

en la dirección perpendicular al eje imaginario que une las dos gotas de agua mientras que en la dirección en el eje que une a las dos gotas, la ola tiene amplitud nula (Fig. 14). Y abstrayendo a más de dos gotas, ¿qué sucedería? Dejamos al lector que responda. ¿Cómo se explica este resultado de forma sencilla? En la dirección donde hay ola máxima, ha habido la suma de dos olas que tienen la misma amplitud y signo, dando como resultado *luz más luz*, es decir, más luz, más amplitud de la ola, más intensidad. En cambio, en la dirección donde hay un mínimo, lo que ha sucedido es que existe una suma de dos olas, una ola positiva y otra ola negativa, es decir, *luz menos luz*, dando oscuridad, es decir, apenas existe perturbación en esa zona del estanque.

Para acabar de enfatizar la importancia que se deriva de la capacidad de las antenas de poder concentrar la potencia en determinadas direcciones, pensemos en la siguiente situación. Un emisor, en este caso, un profesor (ejerce las funciones de antena emisora) con el objetivo de ilustrar, dispone de ocho caramelos y que en un círculo alrededor del profesor hay distribuidos ocho alumnos cada 45° . Imaginemos en un primer caso que la radiación sea omnidireccional (Fig. 14a), es decir, que reparte los ocho caramelos de forma igual cada 45° , de forma que cada alumno (antena receptora) recibe únicamente un caramelo. Imaginemos que el profesor sea capaz ahora de concentrar la radiación y que todos los caramelos (8) que dispone los transmita al alumno de enfrente. De hecho, es su objetivo, radiar únicamente en una dirección y nada en otras. El profesor ha radiado ocho caramelos, igual que en el primer caso, pero la potencia recibida, es decir, los caramelos recibidos por el alumno de enfrente han sido ahora ocho en lugar de uno. Y el resto de alumnos, han recibido cero. Obsérvese por tanto que en el primer caso (antena omnidireccional), si se desease que el alumno de enfrente recibiese ocho caramelos, ¡el profesor debería radiar sesenta y cuatro caramelos! Con esto estaría recibiendo el alumno de interés los ocho deseados, pero se estarían radiando en otras direcciones no deseadas. Por tanto, la capacidad de concentrar la potencia es útil para enviar información de manera más efectiva al no transmitir potencia en otras direcciones no deseadas con el consecuente ahorro energético.

Un ejemplo de aplicación de propagación directiva lo tenemos en las antenas de estación base de comunicaciones móviles. Estas son capaces de concentrar la potencia radiada en determinadas direcciones del espacio de forma que una estación base de un tejado ofrece cobertura a unos usuarios cercanos y otra estación base puede dar cobertura a otros usuarios situados en un área cercana de forma que no haya interferencias (Fig. 15).

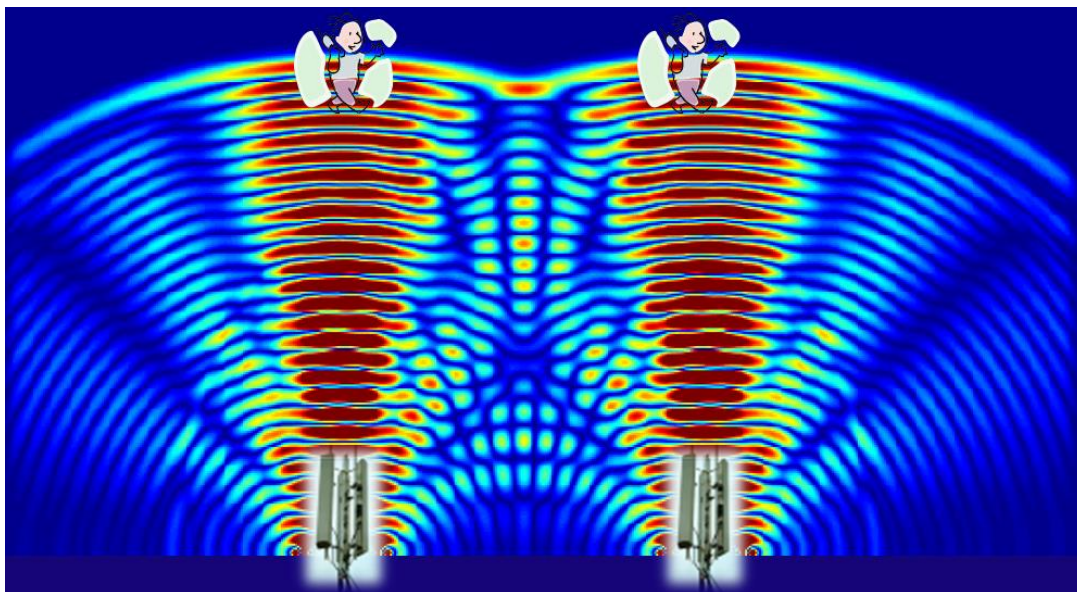


Fig. 15 Cada estación base de telefonía móvil presenta una concentración de la potencia en una determinada dirección de forma que es capaz de radiar potencia en un área y muy poca en otra lo que viene indicado por los colores: color rojo significa mayor potencia, color azul, potencia muy débil

Analicemos el ejemplo de forma más detenida. Imaginemos un terreno que está dividido en celdas hexagonales a modo de panel de abejas (Fig. 16). A cada celda se le asigna una frecuencia en la que puede operar (el número en cada hexágono). Por ejemplo, imaginemos que la celda #1 pueda trabajar a una frecuencia de 890MHz, la celda #2 a una frecuencia diferente, por ejemplo, 900MHz. Esto garantiza que la información asociada a la frecuencia 1 que transmite la BTS#D interfiere poco en las celdas adyacentes pues en ella hay usuarios que van a operar en otras frecuencias. Con esto se puede reutilizar una estación base que opera a la misma frecuencia que BTS#D como por ejemplo la BTS#A, B y C. Estas tres estaciones base están operando en la misma frecuencia que la BTS#D con lo que la información que envían puede interferir a los usuarios de la BTS#D. Sin embargo, debido al carácter direccional de las antenas en la estación base, esto no es así. Por ejemplo, tanto la antenna de BTS#A y B tienen un diagrama que apunta en su máxima intensidad hacia su propia celda #1, sin embargo, la capacidad de radiar en otras direcciones es muy baja, es decir, la BTS#A radia poco hacia la celda #1 de la BTS#D. De esta forma, aunque la BTS#A esté estableciendo una comunicación con un móvil de su celda #1, esa información que está contenida en la misma frecuencia que la comunicación que establece la BTS#D con un usuario de su celda #1, no supone ningún problema de interferencia pues la señal que llega de BTS#A a la celda #1 de BTS#D es débil en comparación con la señal que emite la BTS#D a un móvil de su celda #1. Imaginemos por un momento que podría ocurrir si la antenna de BTS#A no fuese direccional, que fuese omnidireccional. Entonces la señal que emite la BTS#A hacia la celda #1 de la BTS#D no sería tan débil y podría suponer una fuente de interferencia, es decir, no podría reusarse esa frecuencia a menos que la distancia de la BTS#A aumentase. Esto es precisamente lo que ocurre en radiodifusión FM que emplea antenas omnidireccionales. Una emisora que emite a una frecuencia f_0 tiene una cierta área de cobertura dentro de la cual no puede haber otra emisora operando en la misma frecuencia f_0 . Para que otra emisora FM pueda operar en f_0 , debe estar alejada varias decenas de kilómetros para no interferir.

Gracias a este carácter direccional de las antenas es posible reusar mejor el espectro electromagnético y dar más servicio a los usuarios de telefonía móvil.

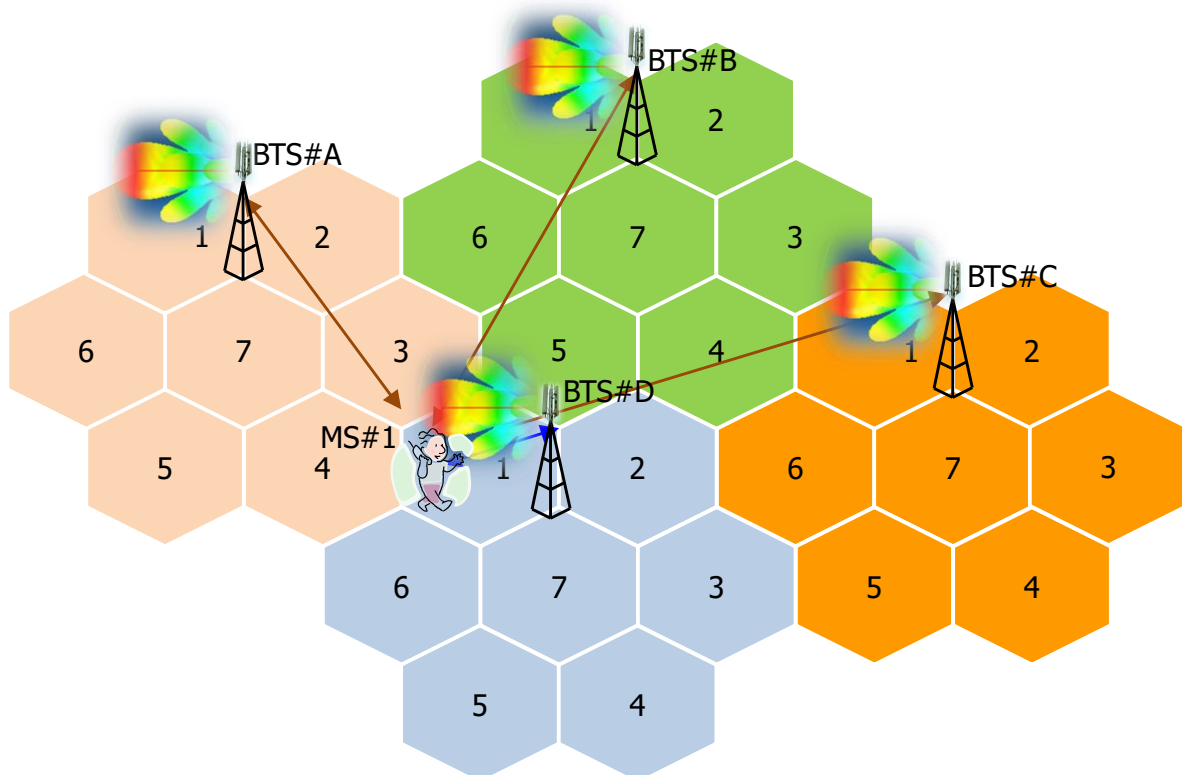


Fig. 16 El empleo de antenas direccionales permite un mejor reuso del espacio para ofrecer mejor cobertura a los usuarios

Aunque para conseguir antenas con diagramas directivos es necesario colocar diversas antenas en lo que se denomina una agrupación de antenas, existen de todas formas ciertas geometrías de antena que son capaces de concentrar la radiación en una determinada dirección del espacio. Entre la más conocida se encuentra el reflector parabólico (Fig. 17). No es ningún capricho estético que su perfil sea parabólico, sino que es justamente ese perfil el que permite concentrar la potencia en una determinada dirección del espacio.

Es precisamente el reflector parabólico una de las antenas ampliamente utilizadas para aplicaciones de radioastronomía (Fig. 18). Sus grandes dimensiones están siguiendo el mismo principio anterior, a mayor tamaño del reflector, más directivo, es decir, mayor capacidad de concentrar la radiación en una determinada dirección del espacio y, por tanto, capaz de detectar potencia electromagnética de fuentes muy lejanas a la Tierra.

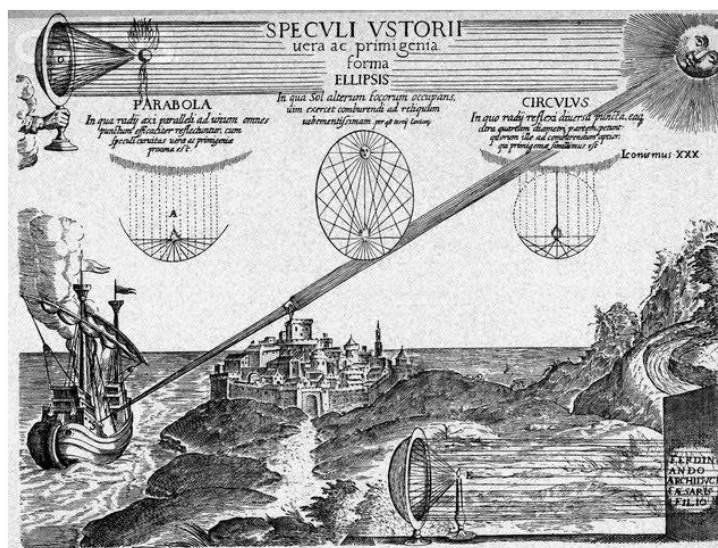


Fig. 17 La leyenda cuenta que Arquímedes (287-212 a. C.) para defender su ciudad natal (Siracusa) utilizó espejos para concentrar los rayos del Sol y poder quemar la flota enemiga romana

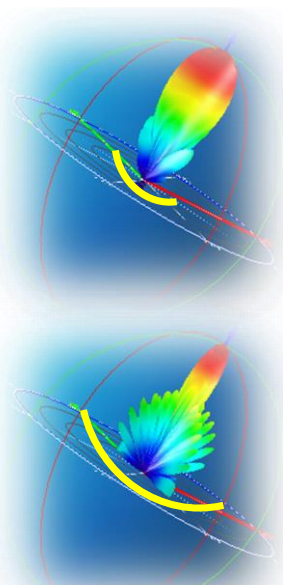


Fig. 18 Reflector parabólico de 70 metros de diámetro en Goldstone, California: antena de elevada directividad capaz de recibir señales muy débiles de fuentes lejanas de nuestro espacio. Cuanto mayor es el tamaño del reflector⁵, más capacidad para recibir señales del espacio exterior

⁵ Estrictamente, cuanto mayor es el tamaño físico en relación a la longitud de onda

G. Multifrecuencia

En muchas aplicaciones es necesario operar en bandas frecuenciales diferentes con el objetivo de ofrecer servicio a gran número de usuarios. Por ejemplo, en telefonía móvil, debido a la gran demanda de usuarios para utilizar el servicio de comunicación, el sistema antiguamente utilizado, el GSM900 que abarcaba de 890MHz a 960MHz, quedó saturado. Recordemos que de forma simplificada cada usuario tiene asignada una frecuencia y un pequeño conjunto alrededor de ella para poder enviar y recibir información. Y refinando un poco más, para comunicarse del móvil a la estación base se utiliza una parte de dicho espectro (890MHz a 915MHz) conocido como enlace ascendente y otra parte del espectro para enviar información de la estación base al móvil (de 925MHz a 960MHz) conocido como enlace descendente. Así pues y de forma simplificada, hay 25MHz para un conjunto de usuarios en una celda. Si cada usuario necesita por ejemplo 200KHz para enviar información, el número máximo de usuarios que de forma simultánea pueden estar utilizando el servicio es de $25000000/200000=125$ usuarios. Si ahora tenemos que por ejemplo una celda es de un cuarto de kilómetro cuadrado (unos 500 metros de lado de un cuadrado), arroja la cifra de 125 usuarios en dicho espacio. ¿Y si quieren comunicar más? Pues se debe asignar más frecuencias. Esto es precisamente lo que resolvió el sistema GSM1800, idéntico al GSM900, pero en el espectro de 1710MHz a 1880MHz. Más frecuencias, más usuarios posibles. ¿Y si ahora los usuarios no solo quieren enviar voz y texto, sino que además quieren enviar/recibir mucha más información como videos? Dado que más información equivale a ocupar más frecuencias, se debe ampliar y mejorar los sistemas existentes. Esto es lo que resuelve el sistema 4G.

Con todo esto es necesario disponer de antenas que sean capaces de distribuir la potencia al espacio de forma muy similar para ambos sistemas de comunicación ubicados en bandas diferentes del espectro electromagnético. Y la labor no es sencilla, pues cuando una antena se diseña para que opere a una frecuencia f_1 , el comportamiento a una frecuencia doble es por lo general diferente (Fig. 19). Cabe recorrer a técnicas de diseño de antenas multifrecuencia [9]-[10].

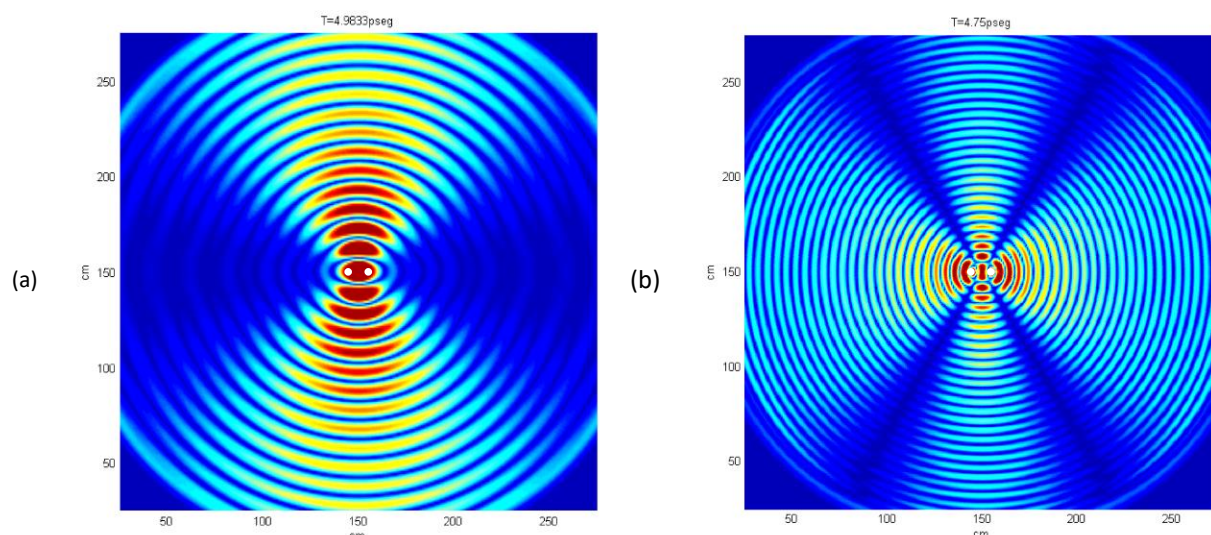


Fig. 19 a) Radiación producida por dos antenas a una frecuencia f_1 (símil: un niño lanzando dos piedras iguales a un estanque en el mismo instante, una piedra la lanza con la mano derecha y la otra con la izquierda); b) mismo caso anterior pero ahora el niño lanza las piedras de forma más rápida, a una frecuencia doble a la anterior, $2 \cdot f_1$. Las fuentes vienen representadas por los círculos blancos centrales

H. Apuntamiento

Trasladémonos por un momento a un mundo infantil. Cuenta la leyenda que en tiempos remotos vivían en armonía tribus de monos con dos orejas y otros con una. La situación cambió cuando apareció el gran depredador (Fig. 20). Este, antes de atacar, emitía un estrepitoso rugido que alertaba a los

monos. Sin embargo, únicamente los monos con dos orejas eran capaces de huir en la dirección correcta pues sabían distinguir de dónde provenía el rugido. Los monos con una oreja, sin embargo, no podían discernir la localización del rugido y permanecían inmóviles presos de pánico hasta ser víctimas del depredador. He aquí la explicación de la extinción de los monos mono-oreja.

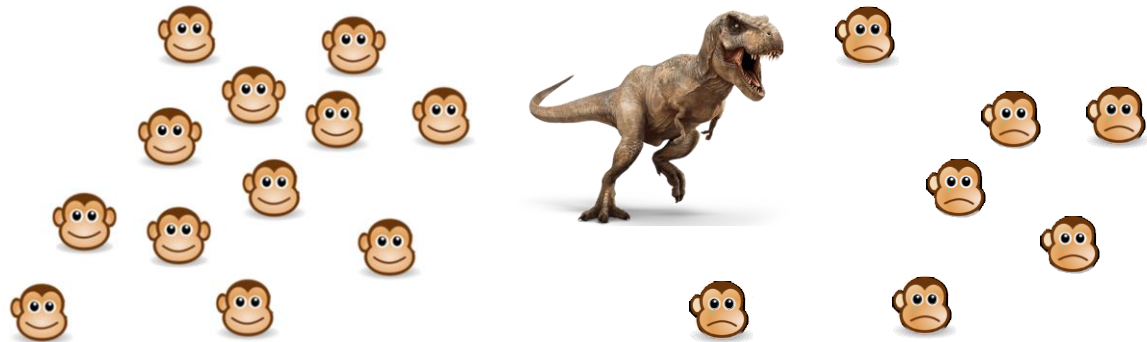


Fig. 20 Izquierda) Coexistencia de la tribu mono-oreja con los bi-oreja; Derecha) En presencia del gran depredador, la tribu bi-oreja es capaz de detectar la localización del rugido depredador huyendo como consecuencia en la dirección correcta; sin embargo, la tribu mono-oreja no es capaz de localizar la procedencia del sonido, quedando inmóviles al no saber por dónde deben huir

Esta explicación pone de manifiesto la ventaja de los monos con dos orejas y tiene su razón en que, al tener dos orejas, su cerebro es capaz de determinar la posición de la fuente sonora (el rugido del depredador en este caso), gracias al retraso temporal que existen en la llegada de la información a una oreja y a la otra (Fig. 21). Por ejemplo, si el depredador está justo delante de nosotros, el rugido llega por igual a cada oreja. Este desfase nulo entre las dos ondas es procesado por el cerebro, el cual nos informa que el depredador está justo en frente. Sin embargo, si el depredador se sitúa por delante hacia nuestra derecha, antes llega el rugido a la oreja #1 que a la #2 (Fig. 21). En función de su posición, el desfase temporal es diferente, pudiendo el cerebro estimar la dirección del rugido. Para los monos de una oreja, este desfase no existe, y, por tanto, si un depredador está delante o en la derecha, el sonido es percibido por igual. Es precisamente este mismo principio de desfase de ondas, el utilizado en el diseño de antenas para poder detectar la dirección de llegada de una señal electromagnética o bien, emitir señales en la dirección deseada.

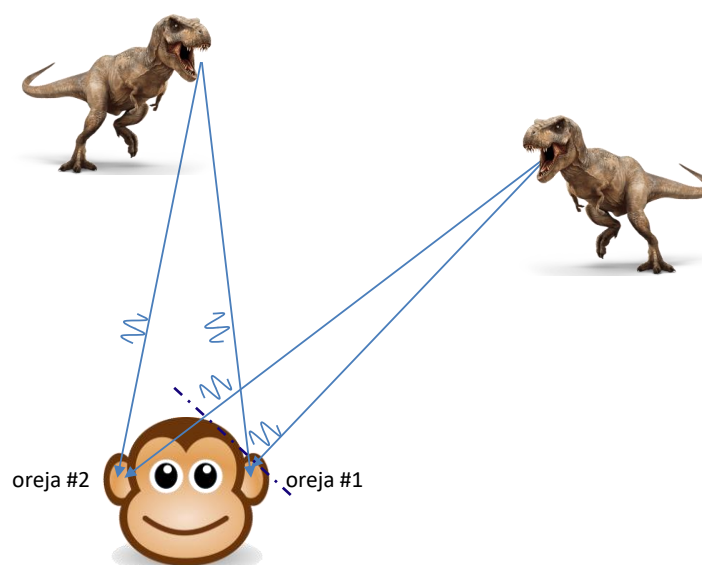


Fig. 21 Cuando el depredador se encuentra en frente del mono, el rugido emitido por el depredador llega en el mismo instante a una oreja que a la otra; cuando el depredador se encuentra en un lateral, primero llega el rugido antes a una oreja que, a otra, habiendo por tanto un desfase en la información que llega a cada oreja

Veamos otro ejemplo con el estanque y el niño que experimenta y observa. El mismo niño en el estanque decide dar un paso más allá en sus experimentos de forma que primero lanza la piedra que tiene en la mano derecha y luego, un instante más tarde, la de la izquierda y repite el experimento de forma sucesiva con una cierta frecuencia. ¿Qué sucede ahora? Si el retardo cumple unas determinadas condiciones, puede suceder que haya *luz más luz* en la dirección del eje imaginario que une las piedras o bien que haya *luz-luz* en la dirección perpendicular (Fig. 22). ¿Conclusión del experimento? El retardo provoca que el máximo de radiación pueda dirigirse en la dirección deseada. Abstrayendo a otros retardos, es posible encontrar otros retardos en que la dirección del máximo esté en la dirección que uno desee. Traducido a antenas. Controlando el desfase temporal con la que se transmite la información por cada antena, es posible enviar la información a una determinada dirección del espacio.

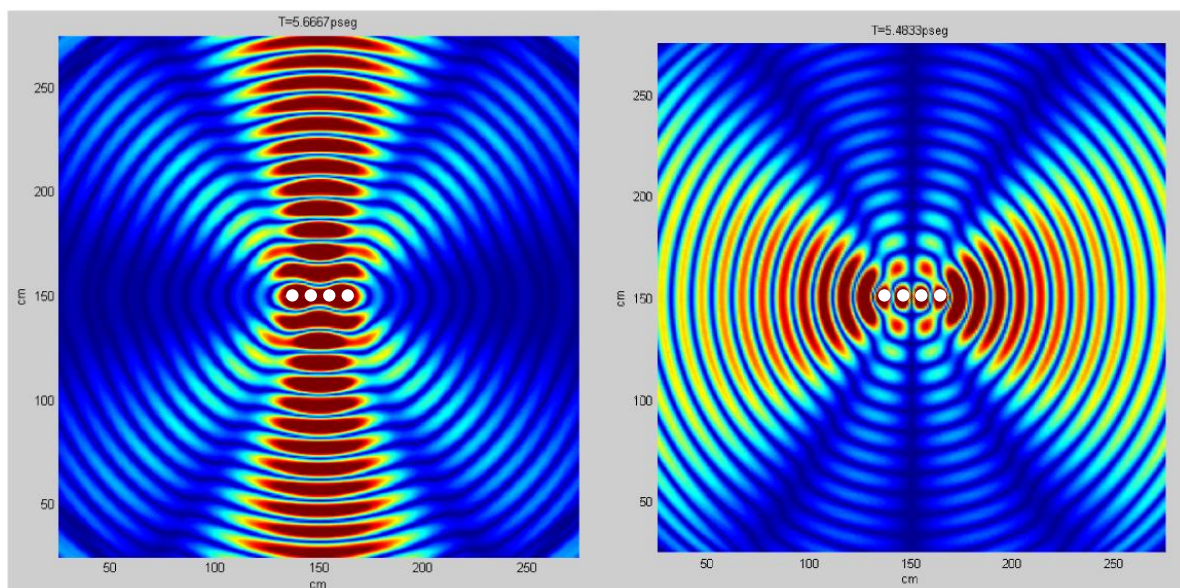


Fig. 22 Izquierda) Radiación producida por cuatro antenas radiando en fase (no hay desfase temporal); derecha) radiación producida por cuatro antenas radiando con desfase temporal. En cada caso el máximo de potencia (colores rojos) está en direcciones diferentes. Las antenas están indicadas por los círculos en el centro

Llegados hasta aquí la pregunta que cabe formularse es: ¿y qué podemos hacer con esto?, ¿qué aplicaciones existen que se beneficien de poder manipular la dirección de máxima radiación? Entre muchas destacar dos. La primera en entornos de propagación de telefonía móvil. Supongamos un área geográfica en que una antena de estación base ofrece servicio. Una forma de minimizar las interferencias es que la antena de la estación base sea inteligente y que pueda manipular el diagrama de radiación de forma que el máximo apunte hacia el usuario deseado. Esto significa que la potencia de la estación base está principalmente dirigida al usuario en cuestión y viceversa, es decir, que la potencia que emite el móvil del usuario es captada principalmente por dicha antena de estación base captando además muy poco de otras direcciones. Si imaginamos ahora otros usuarios interferentes en el entorno, la antena es capaz de minimizar la potencia recibida por esos usuarios mediante nulos en el diagrama de radiación que apunten en dicha dirección de los usuarios interferentes (Fig. 23). De esta forma, aunque dichos usuarios estuviesen trabajando a la misma frecuencia que el usuario útil, la antena de estación base captaría exclusivamente la señal del usuario útil. Realizando un símil, es como si en una sala de grandes dimensiones con mucha gente hablando, un compañero desea hablar con nosotros. Como el resto utiliza la misma frecuencia (frecuencias de audio), nuestra oreja capta todo, tanto la información útil que deseamos recibir, más las otras voces que en este caso son ruido. Una forma sencilla es colocar la mano en la oreja para intentar recibir mejor del usuario útil y minimizar las voces que llegan de otras direcciones.

Otra aplicación de la posibilidad de manipular la dirección de máxima radiación, la tenemos en el radar (*RA*dio *D*etectio*N* And *R*ang*i*ng). Imaginemos un aeropuerto en que una antena de un sistema radar debe ser capaz de detectar los aviones que se aproximan al aeropuerto. Para ello dispone de una antena la cual es capaz de poder barrer la dirección del máximo de radiación en muchas direcciones del espacio. Para cada dirección del espacio se emite un pulso electromagnético, una señal de corta duración que viaja por el aire. Si esa señal se encuentra con un avión, se refleja y regresa de vuelta a la antena. Esa señal es un indicativo que en la precisa dirección en que se ha enviado el pulso original hay un avión. Se puede saber la dirección de forma precisa, tanto más, cuanto más directiva sea la antena, pues es capaz de focalizar mejor la potencia. Por otro lado, se puede saber la distancia al conocer el instante en que se emite el pulso y el tiempo en que ha tardado en regresar. Sabiendo que espacio es igual a velocidad por tiempo, y que la velocidad es la de la onda electromagnética en el espacio libre que es aproximadamente de 300.000 km/s, se puede obtener a qué distancia se encuentra el avión además de su posición.

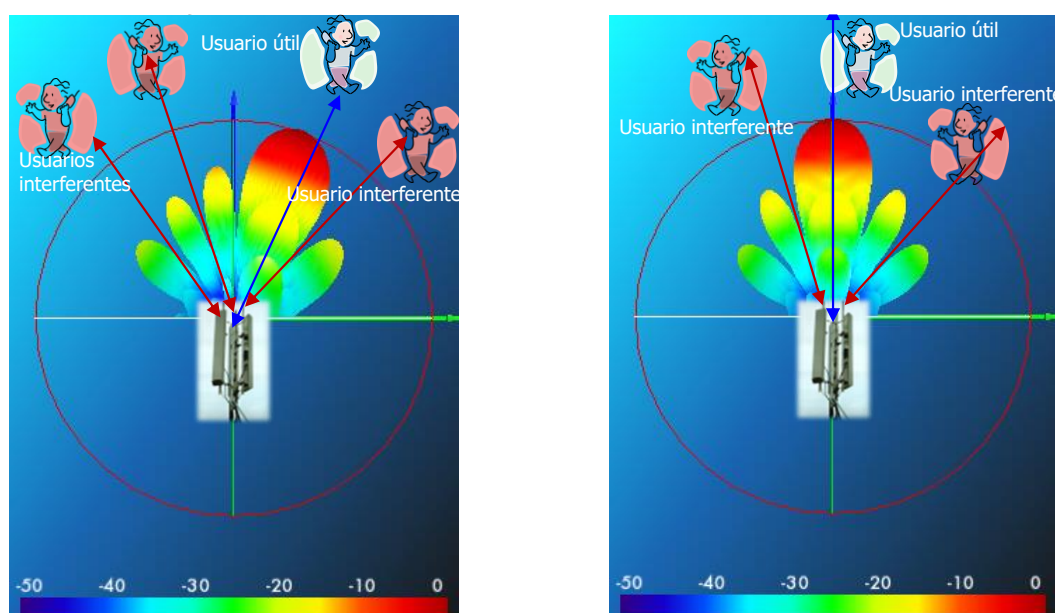


Fig. 23 Izquierda) manipulando la amplitud de las ondas radiadas por las diferentes antenas que componen la agrupación de antenas, es posible sintetizar una forma de radiar de forma que el máximo de potencia se sitúe hacia el usuario útil y a su vez no se reciba nada de los usuarios interferentes que operan en la misma frecuencia. Derecha) si además no solo se modifica la amplitud de cada antena de la agrupación sino el instante en que radia (fase de excitación), es posible que el máximo de radiación apunte en la dirección deseada

Siguiendo con el principio de manipulación de la dirección del máximo de radiación, presentamos un último ejemplo mediante una de las antenas más conocidas, la antena Yagi-Uda. Dicha antena fue inventada en 1926 por los japoneses Yagi y Uda y es por antonomasia la antena utilizada hasta el momento en nuestros tejados para la recepción de señales de televisión (Fig. 24). La antena sigue un diseño basado en una ingeniosa separación entre los diferentes elementos (dipolos o tramos conductores rectilíneos) que la componen gracias a la cual, es posible que la dirección de máxima recepción de señal esté ubicada en una dirección. Es precisamente esta dirección la que apunta a la estación de radiodifusión de televisión ubicada en algún punto elevado cercano al lugar donde nos encontramos. Seguimos con el ejemplo del niño en el estanque para entender de forma cualitativa el principio de funcionamiento de la antena en cuanto a la ubicación de la dirección de máxima radiación. Imaginemos que cada segmento conductor que compone la antena Yagi-Uda es una piedra que el niño lanza al estanque. Imaginemos además que el niño lanza de forma desfasada en el tiempo cada una de las piedras. E imaginemos ahora además otro grado de libertad: el niño lanza cada piedra al estanque desde alturas diferentes con el objetivo de controlar la intensidad de la ola; a mayor altura,

más intensidad de la ola. Debidamente diseñado el experimento se podría conseguir una perturbación en el estanque de forma que la ola máxima estuviese en una dirección particular. Es en esta dirección donde las diferentes olas producidas por cada una de las piedras se suman de forma constructiva siguiendo el principio de *luz más luz* (Fig. 25). En otras direcciones, hemos conseguido además que las diferentes olas se sumen de forma destructiva (*luz menos luz, oscuridad*). De esta forma funciona la antena Yagi-Uda siendo capaz de emitir/recibir ondas electromagnéticas de una dirección, en particular, alineada con el eje de la antena, y de radiar/recibir muy poco en otras direcciones. Por esta razón vemos todas las antenas Yagi-Uda de nuestros tejados apuntando hacia un mismo lugar, el lugar donde se encuentra la estación de radiodifusión de señal de televisión.



Fig. 24 La antena Yagi-Uda inventada por los japoneses Hidetsugu Yagi (en la fotografía) y Shintaro Uda en el año 1926 donde se observa la agrupación de diversos segmentos conductores dispuestos paralelamente

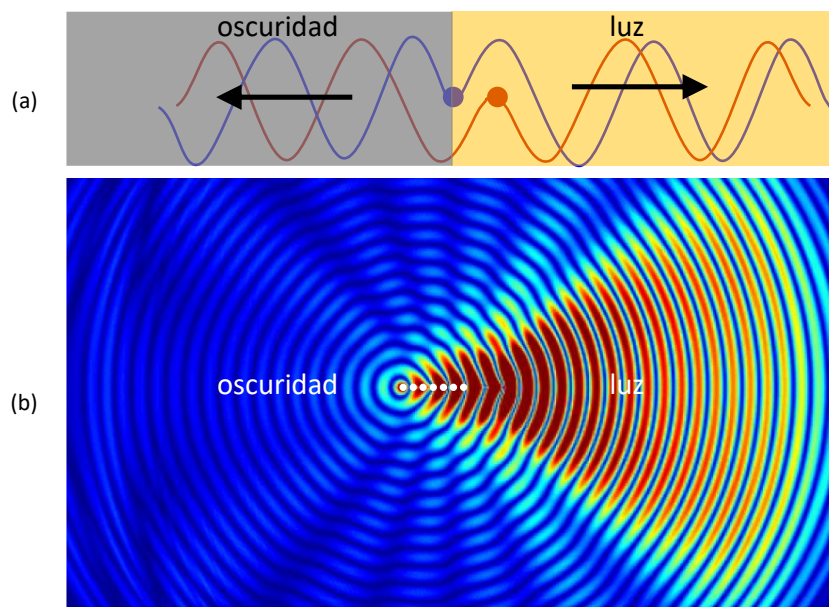


Fig. 25 a) Ejemplo de interferencias entre dos antenas; hacia la dirección de la derecha, las amplitudes de las ondas están en fase. Se trata de una suma constructiva dando como resultado mayor amplitud. Sin embargo, hacia la izquierda, las ondas interfieren de forma destructiva dando como resultado oscuridad (radiación insignificante); b) Ejemplo de radiación formado por siete antenas (indicadas por los círculos) con la misma amplitud, pero cada una excitada en tiempos diferentes (símil: un niño tirando siete piedras del mismo tamaño separadas una cierta distancia entre ellas en un estanque y lanzadas en instantes diferentes). El patrón de radiación resultante es similar al caso a, las siete ondas producidas por cada una de las antenas se suman constructivamente hacia la dirección de propagación de la derecha y la suma es destructiva en la izquierda.

Obsérvese que la antena Yagi-Uda es similar en cuanto a geometría a la antena logo-periódica (Fig. 5). Sin embargo, la diferencia es que en la antena logo-periódica se desea que cada segmento conductor transmita a una determinada frecuencia. El hecho de añadir tantos tramos rectilíneos es precisamente para conseguir operación en muchas frecuencias. Por el contrario, la antena Yagi-Uda,

dado que los segmentos conductores son prácticamente iguales, se persigue operar en una determinada frecuencia y el hecho de tener tantos segmentos operando a la misma frecuencia tiene como objetivo aumentar la directividad, es decir, la capacidad de concentrar la potencia en una determinada dirección del espacio

Finalmente, la antena Yagi-Uda, como las antenas en general, en la dirección donde son capaces de radiar más potencia, es también en la dirección donde son capaces de recibir más, pues las antenas en términos generales son elementos recíprocos. En el caso de las antenas Yagi-Uda de nuestros tejados, son antenas utilizadas únicamente como elementos receptores y no emisores.

IV. INTERACCIÓN CON MEDIO MATERIALES

Una vez vistos los principios de funcionamiento fundamentales de las ondas electromagnéticas producidas por antenas, describimos los elementos que constituyen las antenas y qué papel relevante tiene en la radiación de ondas electromagnéticas.

Dos son los elementos generales que constituyen las antenas: conductores y dieléctricos (Fig. 26).

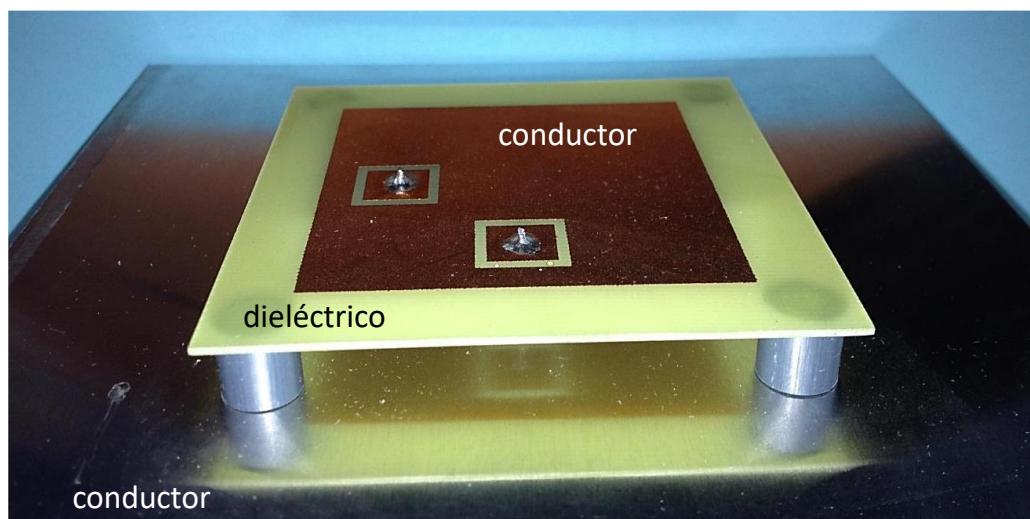


Fig. 26 Antena microstrip. En su configuración básica está formada por un conductor o plano de tierra y otro conductor denominado parche dispuesto paralelo sobre el primero a una cierta distancia. Entre medio de los dos, se sitúa un dieléctrico tanto con finalidades electromagnéticas como mecánicas. Obsérvese los dos puntos de excitación con el objetivo de generar dos ondas electromagnéticas polarizadas en sentido horizontal y vertical útiles para entornos multi-propagación

A. Conductores

En primer lugar, los conductores, como por ejemplo aluminio, dotan no solo a la estructura de robustez mecánica, sino que además son relevantes para la conformación de la radiación.

Siguiendo el ejemplo del niño en el estanque, podemos decir que el conductor es para las ondas electromagnéticas lo que el cemento lo es para las olas del estanque, es decir, son capaces de encauzar la radiación para obtener un determinado diagrama de radiación. En el ejemplo de la antena Yagi-Uda, descrito en la sección anterior, cada uno de los segmentos es un conductor cuya dimensión y su distancia a cada segmento vecino determinan que la antena sea capaz de radiar de una determinada forma.

Continuando con el símil del estanque, imaginemos que el niño lanza ahora una piedra no en el centro del estanque, sino a una cierta separación cercana a la pared. Dependiendo de su distancia a la misma, es posible que la ola que genera la piedra que lanza el niño tenga un máximo en la dirección perpendicular a la pared o bien en otras direcciones (Fig. 27). Esto mismo se traslada a antenas donde ahora se substituye la pared, por un conductor. De esta forma, dependiendo de la forma y ubicación del conductor, permite obtener un determinado diagrama de radiación.

Otro aspecto de los conductores es su calidad como tales. Entre la gran lista de conductores (ej. cobre, aluminio, oro, hierro), los hay más adecuados para el diseño de antenas pues es conveniente que la potencia sea radiada y no sea utilizada para calentar el conductor ya que esto se traduce en potencia no radiada al espacio y por tanto no útil. Es como si el niño del estanque hubiese construido la porción mencionada en vez de cemento, de un material blando que, en vez de conformar la radiación, la hubiese absorbido sin generar propagación por el estanque. Por tanto, no solo la geometría de los conductores es extremadamente importante en el diseño de antenas sino además su calidad la cual viene caracterizada por parámetros como conductividad que quedan fuera del objetivo de este artículo.

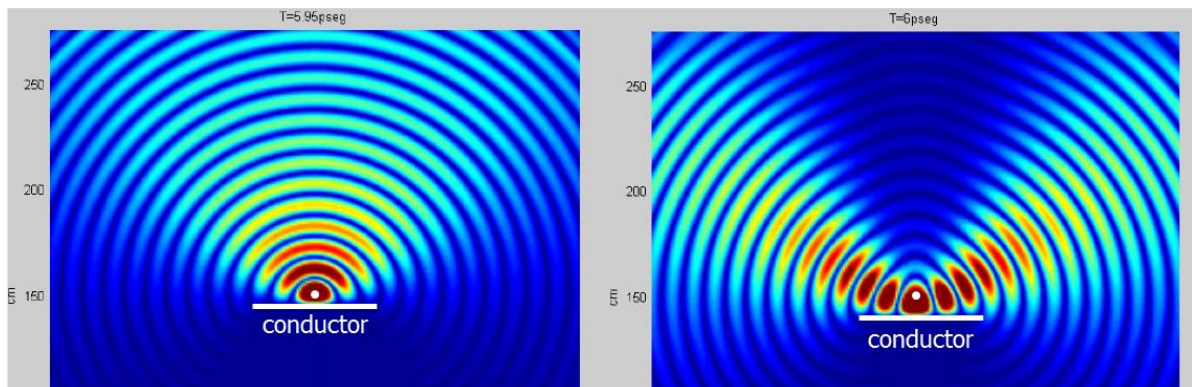


Fig. 27 Los conductores juegan un papel relevante en el diseño de antenas puesto que permiten que se pueda variar la forma de radiar al espacio de la forma deseada. Izquierda) máximo de potencia radiada en la dirección perpendicular al conductor. Derecha) mínimo de radiación en la dirección perpendicular al conductor. El círculo indica la posición de la fuente

B. Dieléctricos

Otro de los elementos fundamentales en el diseño constitutivo de las antenas son los dieléctricos. Sin entrar en su definición formal siguiendo conceptos de teoría de electromagnetismo, podemos ver a estos materiales como un complemento a los conductores, es decir, son capaces de guiar a las ondas electromagnéticas, pero si bien los conductores son opacos, los dieléctricos son translúcidos. Podemos entender de una forma sencilla que es un dieléctrico siguiendo el ejemplo del niño en el estanque. Imaginemos que el niño lanza una piedra en el centro del estanque. Sin ninguna porción de cemento alrededor (conductor para las ondas electromagnéticas), la perturbación generada se propaga igual en todas las direcciones (Fig. 14). Hemos visto anteriormente que, colocando ciertos elementos, es posible guiar a la perturbación para que genere un cierto diagrama de radiación. Del mismo modo un dieléctrico colocado de forma adecuada y con una forma determinada sería capaz de guiar a dicha perturbación para que la radiación fuese directiva como la antena Yagi-Uda. Ese dieléctrico en el símil del estanque podría ser una porción de líquido con unas características de densidad diferente al líquido del estanque. Es precisamente la densidad de esta porción de dieléctrico y su forma que determinan que pueda guiar las ondas de una forma determinada.

Christiaan Huygens fue uno de los primeros científicos en observar que un medio denso es capaz de curvar una onda electromagnética, en este caso la luz [11]. Huygens realizaba observaciones con su telescopio que apuntaba hacia la luz que proyectaba un faro. El telescopio estaba ajustado para que pudiese observar de forma puntual la luz que emitía el faro distante. A pesar de que el telescopio estaba calibrado, observó que durante ciertos días tenía que volverlo a calibrar, es decir, reposicionar la orientación del telescopio para poder observar correctamente la luz emitida por el faro (Fig. 28). Después de los repetidos experimentos y sus observaciones, determinó que aquellos días en que la atmósfera estaba más densa, debía cambiar la orientación del telescopio. Con ello determinó que,

dependiendo de la densidad del aire, la trayectoria de la luz se modificaba, es decir, la luz cuando viaja por un medio más denso experimenta una variación de su trayectoria.

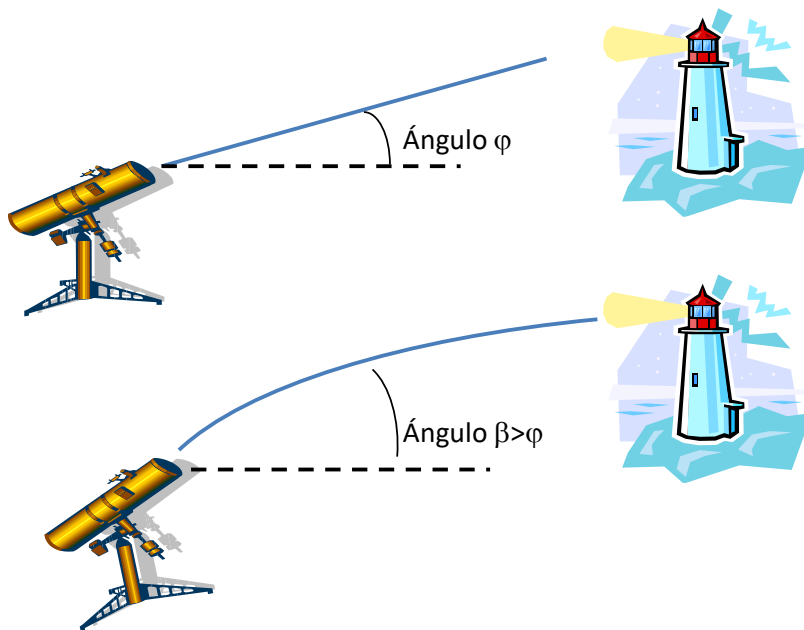


Fig. 28 La luz ve curvada su trayectoria dependiendo del medio por el cual viaja. En el caso inferior donde la trayectoria de la luz se ha curvado, la percepción del usuario es que el faro se encuentra más alto que en el caso donde la trayectoria es rectilínea

Una de las demostraciones más sencillas y visuales que tenemos sobre este fenómeno de la deformación de la trayectoria recta de la luz es cuando observamos un objeto debajo del agua (Fig. 29). Debido a que hay un cambio de medio entre el agua y aire, es decir, el agua es más densa que el aire, la trayectoria se desvía tal como indica la figura dando como resultado que la percepción de la posición del pez sea para un observador externo diferente a la que realmente es dentro del agua (Fig. 29).

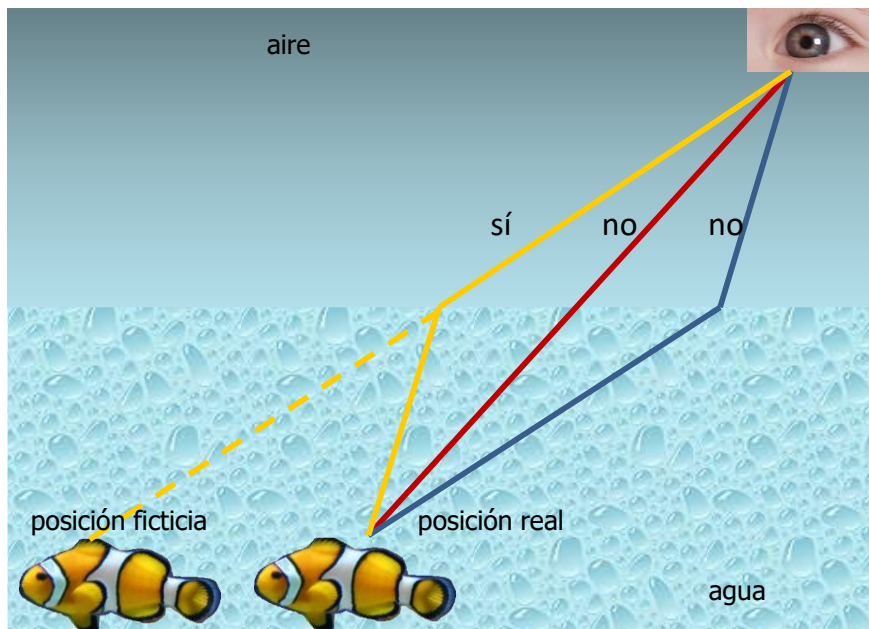


Fig. 29 La luz ve modificada su trayectoria al cambiar de medio, por ejemplo, al pasar del agua al aire. Este cambio de trayectoria produce que el objeto bajo el agua se observe desde el exterior en una posición ficticia

Estas observaciones están en consonancia con lo que se conoce como principio de Fermat el cual postula que el camino que sigue la luz o cualquier onda electromagnética entre A y B no es el más corto si no el más rápido. Como la luz y cualquier onda electromagnética se propaga más lentamente a medida que aumenta la densidad del medio (Fig. 30), de los tres rayos indicados en la Fig. 29, existe

un camino, el marcado *sí*, que es el más rápido y es justamente el que toma la luz para viajar del punto donde se ubica el pez a los ojos del niño fuera del agua.

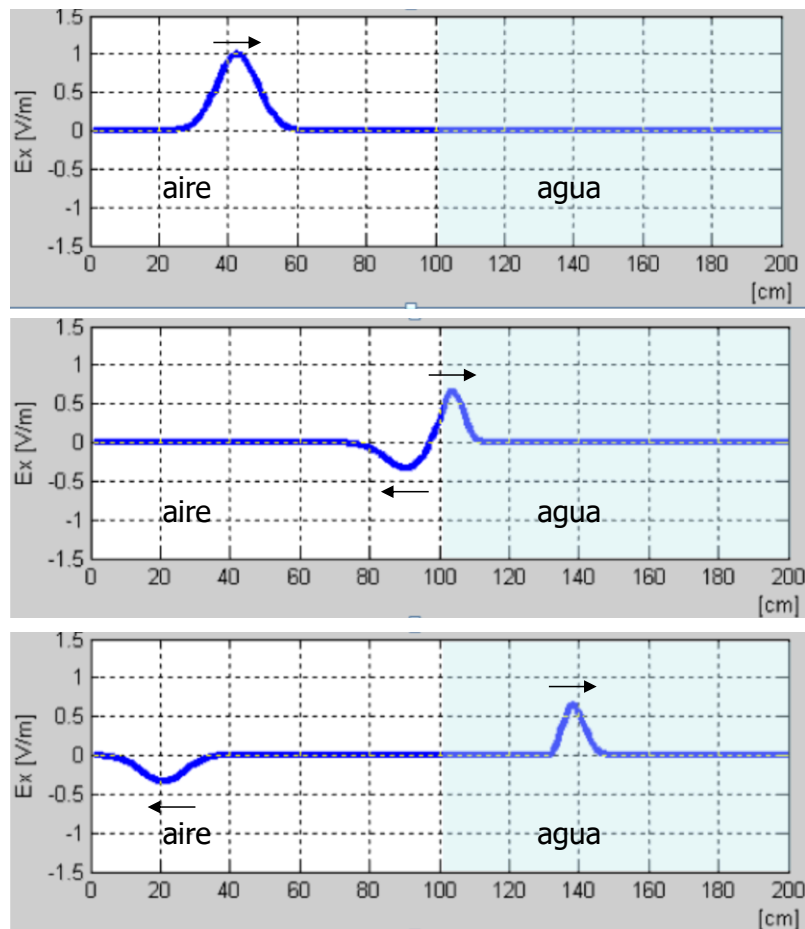


Fig. 30 La velocidad de propagación de una onda electromagnética depende de la densidad (permitividad y permeabilidad) del medio por el que viaja. La velocidad es más lenta en un medio con mayor permitividad y/o permeabilidad. Dado que el agua presenta una mayor permitividad que el aire, la velocidad es menor. Se observa un pulso electromagnético que viaja por el aire e incide en el agua. Al llegar al interfaz aire-agua, una parte del pulso inicial se refleja de vuelta al aire y otro se transmite al agua el cual viaja más lentamente

Como conclusión, el hecho de incluir materiales dieléctricos, es decir, materiales más densos que el aire, permite que la radiación electromagnética pueda ver modificar su trayectoria. Las aplicaciones de este fenómeno dan como resultado la posibilidad de diseñar antenas que sean capaces de concentrar la potencia electromagnética hacia unas determinadas direcciones gracias al uso de dieléctricos y no únicamente con conductores.

En la Fig. 31 se demuestra precisamente este efecto. Por un lado, tenemos la propagación de una onda omnidireccional, es decir, como si siguiendo con el ejemplo del niño en el estanque, lanzase una piedra en el centro del mismo. En la otra situación, se añade una estructura dieléctrica con una cierta geometría y ciertos valores de este parámetro que caracteriza al dieléctrico (permitividad), de forma que esa radiación original se concentra en una dirección principal y por tanto dando resultado más potencia en una dirección (aumento de la directividad). Este tipo de antenas denominadas antenas altamente directivas, son útiles para aplicaciones como por ejemplo la radioastronomía donde se tiene que diseñar antenas capaces de recibir señales extremadamente débiles de puntos muy alejados en el espacio (Fig. 32).

Con el objetivo de combinar las ventajas de conductores y dieléctricos, pueden combinarse ambos en el diseño de antenas.

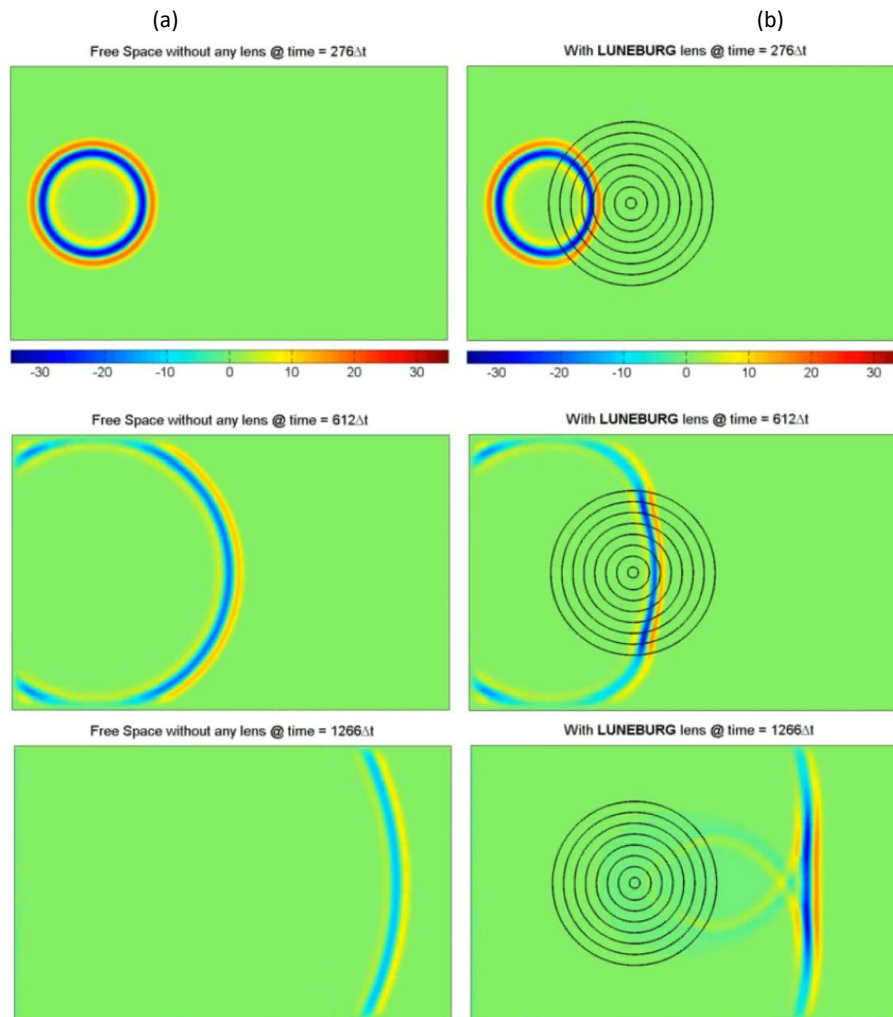


Fig. 31 a) Propagación de una onda electromagnética en el aire de forma omnidireccional; b) propagación de una onda electromagnética cuando atraviesa un medio con múltiples capas dieléctricas colocadas con el objetivo de focalizar la potencia en una dirección particular aumentando la directividad del sistema radiante [12]



Fig. 32 Agrupación de antenas tipo lente (material dieléctrico) con la finalidad de captar potencia de fuentes muy lejanas en el espacio exterior [13]

V. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO

Los fenómenos eléctricos y magnéticos y su relación entre ellos fueron enunciados por Gauss, Coulomb, Oersted, Ampère y Faraday principalmente. Estos fenómenos fueron unificados en un conjunto de ecuaciones por James Clerk Maxwell quien elaboró una completa teoría electromagnética basándose en dichas ecuaciones, las que hoy en día se conocen como las ecuaciones de Maxwell. Las ecuaciones de Maxwell describen los fenómenos eléctricos y magnéticos a nivel macroscópico. Lo que para la mecánica clásica significa las leyes de Newton, lo son las ecuaciones de Maxwell para los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Desde que en el 1865 Maxwell postuló lo que hoy en día conocemos como las ecuaciones que llevan su nombre, ha habido diversas técnicas para resolverlas mediante unas determinadas condiciones de contorno. Antes de la solución con métodos numéricos mediante ordenador, el problema se afrontaba de una manera analítica, lo que solo permitía resolver situaciones canónicas, es decir, problemas con geometrías simples, etc. donde las ecuaciones más las condiciones de contorno presentaban una solución matemática sencilla. Para problemas con geometrías más complicadas, el problema se aborda de una manera numérica, cosa que solo fue posible con la llegada de los ordenadores (Fig. 33).

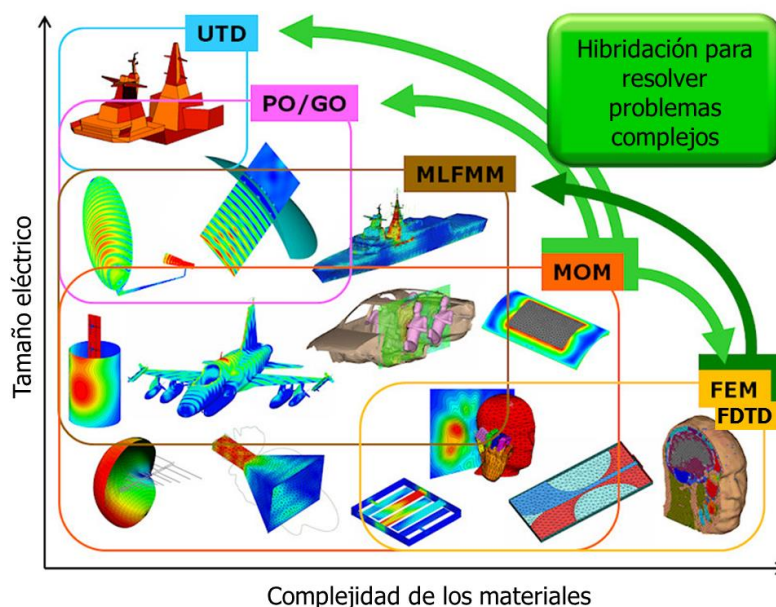


Fig. 33 Los métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de Maxwell permiten resolver un gran abanico de situaciones que engloban geometrías complejas, así como la presencia de diferentes materiales constitutivos. UTD: Uniform Theory of Diffraction; PO/GO: Physical Optics/Geometrical Optics; MLFMM: Multilevel Fast Multipole Method; MOM: Method Of Moments; FEM: Finite Element Method; FDTD: Finite Difference Time Domain. Gentileza de FEKO

Para los ingenieros de telecomunicación encargados de diseñar sistemas de antenas, existen diversos métodos numéricos integrados en programas de simulación electromagnética los cuales permiten analizar problemas de gran complejidad (Fig. 34-Fig. 35). Por ejemplo, es posible hoy en día diseñar y analizar antenas en presencia del cuerpo humano como es el caso de las antenas de telefonía móvil donde es necesario comprender como, por un lado, la cabeza humana afecta al comportamiento de la antena y, por otro lado, como la potencia radiada afecta al cuerpo humano. Esto está permitiendo a los diseñadores de antenas crear antenas más robustas a los efectos de alteración de las prestaciones que el cuerpo humano produce sobre la antena y además reducir la absorción de potencia por parte de este.

Otras ventajas del uso de los métodos numéricos se encuentran en el diseño de antenas embarcadas en aviones y barcos. Dado que realizar prototipos y medidas en estos entornos es costoso,

se requiere una fase preliminar mediante simulación con el objetivo de simplificar las pruebas que se lleven a cabo de forma experimental en una fase posterior. Imaginemos la siguiente situación. Se debe caracterizar cómo se comportan dos modelos de antenas en veinte posiciones en el interior de un vehículo, dando por tanto cuarenta experimentos. Mediante simulación electromagnética es posible analizar cada una de ellas. La tarea de los ingenieros de antenas radica en el diseño de las antenas. Una vez están realizadas, la batería de las cuarenta pruebas es llevada a cabo por un ordenador, el cual va simulando una detrás de otra. Una vez se han procesado los datos, el equipo de ingenieros decide cuántas de las cuarenta pruebas merece la pena caracterizar en laboratorio. De esta forma se simplifica la campaña de medidas con el ahorro de tiempo y coste que ello supone. Imaginemos que, en vez de medir antenas en un coche, estas deban medirse en un barco o en un avión. La simulación, por tanto, supone un procedimiento previo a la medida que permite optimizar el proceso de caracterización del diseño de antenas en cuanto a reducción tiempo y ahorro económico.

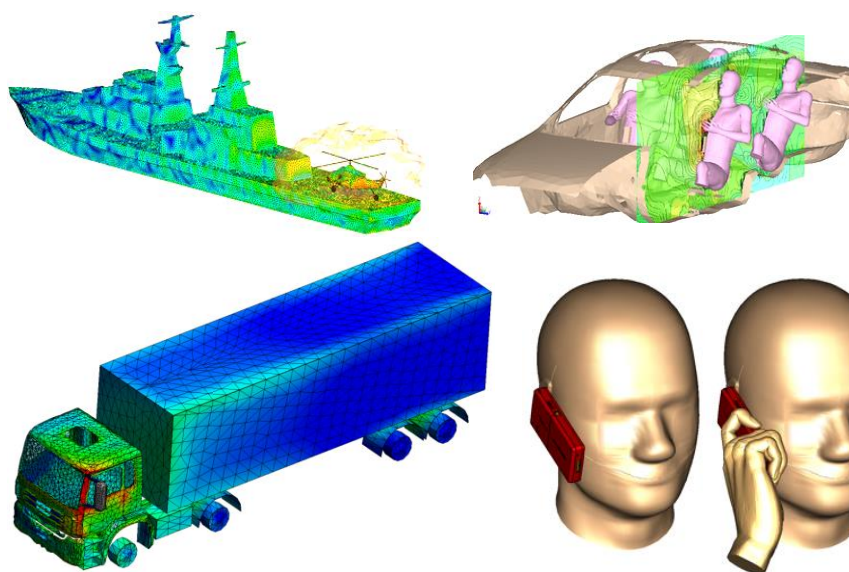


Fig. 34 Mediante simuladores electromagnéticos es posible analizar sistemas radiantes en medio complejos

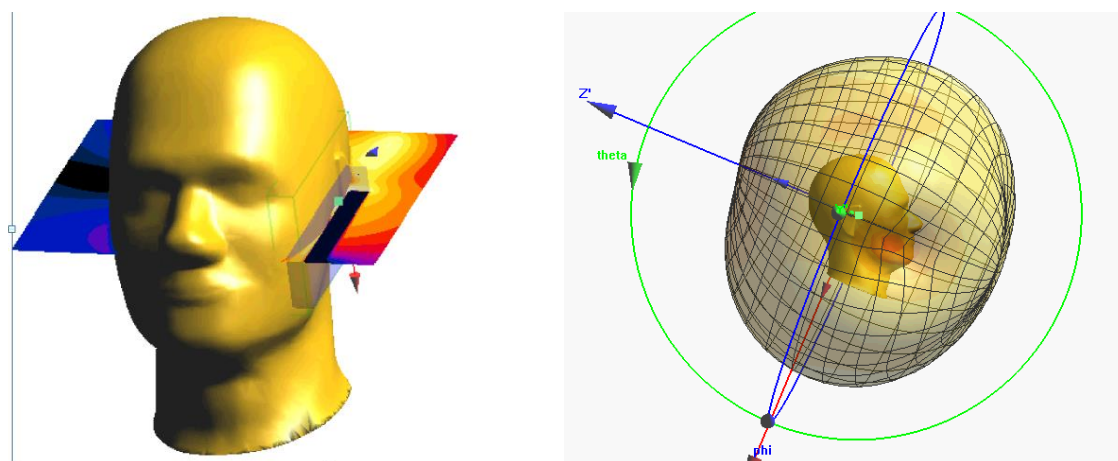


Fig. 35 Los simuladores electromagnéticos permiten analizar cómo se comportan las antenas integradas en dispositivos móviles en presencia del cuerpo humano

Aparte de las herramientas de simulación numérica, la ingeniería de antenas tiene a su abasto equipos de medida capaces de caracterizar los parámetros fundamentales de las antenas. Es importante resaltar aquí que tanto las herramientas de simulación y medida son complementarias. Las herramientas de simulación por un lado sirven para una primera caracterización del sistema radiante

a considerar. En una fase posterior más experimental, las medidas sirven para corroborar los resultados que se han obtenido mediante simulación numérica y de esta forma comprobar que todo el proceso sea correcto. No es conveniente basarse únicamente en resultados de simulación pues puede darse la situación en que no se modele adecuadamente la realidad. En cuanto a los resultados obtenidos mediante medición experimental, si bien más cercanos a la realidad que los obtenidos mediante simulación, estos deben complementarse mediante la simulación numérica. De alguna forma corroboran que todo proceso de medida está en consonancia con lo esperado pues podría darse el caso que el sistema de medida tuviese algún elemento que pudiese falsear la medida. Simulación y medida van por tanto de la mano resultando un binomio inseparable.

Los equipos de medida de antena son altamente sofisticados requiriendo circuitos electrónicos de alta frecuencia, así como de equipos computerizados para el procesado de datos y su posterior representación.

Uno de los equipos primordiales para el diseño y análisis de antenas es un analizador de redes. Básicamente, el equipo permite medir parámetros circuitales lo que permite saber cómo debe conectarse una antena a las etapas de radiofrecuencia (Fig. 36). Esto resulta indispensable para que la potencia que emite la etapa final se traspase a la antena y no se pierda potencia por reflexiones indeseadas. Asimismo, cuando la antena capta potencia del aire, debe asegurarse que dicha potencia se traspasa a los circuitos receptores pudiendo extraer de esta forma la máxima potencia del aire. Es indispensable en esta faceta un conocimiento de lo que se conoce como electrónica de alta frecuencia o circuitos de microondas para poder diseñar la antena con la electrónica que la acompaña.

De todas formas, este equipo no puede medir cómo dicha potencia se radia al espacio para cada dirección. Para ello es necesario otro equipo conocido como cámara anecoica.

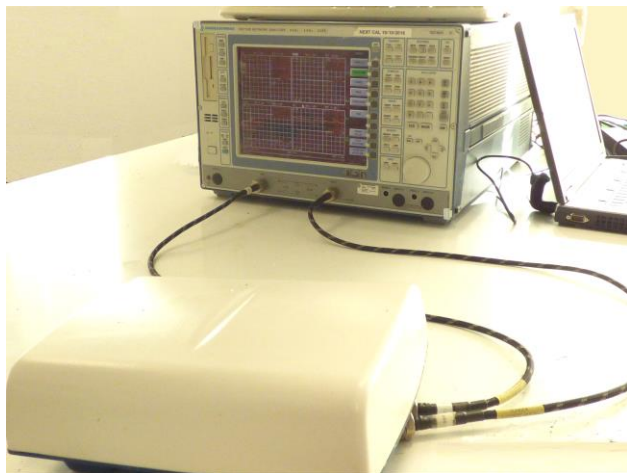


Fig. 36 Analizador de redes el cual resulta indispensable para realizar lo que se conoce como adaptación de impedancias lo cual es de suma relevancia para que la potencia del transmisor llegue a la antena y que la potencia asociada a la onda electromagnética que proviene del aire y es captada por la antena, se entregue a los circuitos electrónicos que forman la etapa de recepción de la señal

Otro de los equipos indispensables en un laboratorio de diseño de antenas es una cámara anecoica. Esta cámara permite la medida de la potencia transmitida al espacio por una antena entre otros parámetros electromagnéticos. La cámara está totalmente forrada con material conductor de cierto grosor que mitiga enormemente la potencia de una onda electromagnética que del exterior pueda penetrar en el interior de la cámara causando medidas erróneas. Estas fuentes externas son por ejemplo la propia potencia transmitida por los teléfonos móviles del personal del laboratorio o bien la proveniente de estaciones cercanas de telefonía móvil. En este sentido, la puerta de acceso a la cámara tiene que estar cuidadosamente diseñada puesto que cualquier grieta puede ser suficiente para que la potencia de fuentes externas penetre en el interior de la cámara falseando las medidas. ¿Os habéis fijado que generalmente cuando entráis en un ascensor, la cobertura del móvil disminuye? Aquí tenemos la respuesta.

Por lo que al interior de la cámara se refiere, encontramos la antena o el sistema con la antena integrada a medir y otra antena sonda encargada de captar la potencia que transmite la antena en

diferentes direcciones del espacio. Con el objetivo de que la potencia emitida por la antena bajo prueba no llegue a las paredes conductoras y se refleje hacia la sonda creando múltiples señales y por tanto errores, el interior de la cámara está cubierto con un material absorbente a las ondas electromagnéticas con una cierta geometría piramidal que no es un capricho estético, sino que tiene la finalidad de evitar reflexiones, evitando ecos, de aquí el nombre de cámara anecoica, del griego sin eco. Finalmente, toda esta cámara lleva añadido un sistema de medida, adquisición de datos y procesamiento (Fig. 37).

Como la medida de antenas generalmente engloba información en tres dimensiones, es decir, como radia la potencia una antena en cualquier dirección del espacio, significa explorar diferentes puntos de una esfera imaginaria que englobe a la antena. Esta medida puede abordarse mecánicamente, es decir, mediante una sonda que vaya recorriendo diferentes puntos de dicha esfera y adquiriendo datos de la potencia que radia la antena para cada dirección del espacio. Este procedimiento es costoso en tiempo pues requiere mover mecánicamente una sonda alrededor de una esfera lo cual puede conllevar horas de medida. Actualmente, se han sofisticado estos métodos en el sentido que la potencia radiada por una antena es explorada mediante una combinación de barrido mecánico y barrido eléctrico. Tal y como se refleja la Fig. 37a, existe un arco el cual tiene a su alrededor distribuidas diferentes sondas (aspas en el arco de la Fig. 37a) y en el centro de este arco se dispone la antena o dispositivo con la antena integrada (ej: ordenador con antenas en su interior). Cuando la antena emite potencia, las diferentes sondas dispuestas en el arco la van recibiendo de forma que se tiene de manera instantánea la potencia que radia la antena en un plano. Posteriormente, la plataforma que sustenta al dispositivo efectúa un giro mecánico de unos cuantos grados (10°) y se repite otra vez la adquisición mediante el arco. De esta forma, una vez la plataforma ha efectuado un giro de 180° se ha podido medir de manera rápida la información en tres dimensiones de cómo la antena radia la potencia al espacio. A partir de dicha información es posible no solo saber cómo radia la potencia la antena la potencia al espacio sino otros parámetros que caracterizan a la antena tales como polarización, directividad, eficiencia, etc. [8].

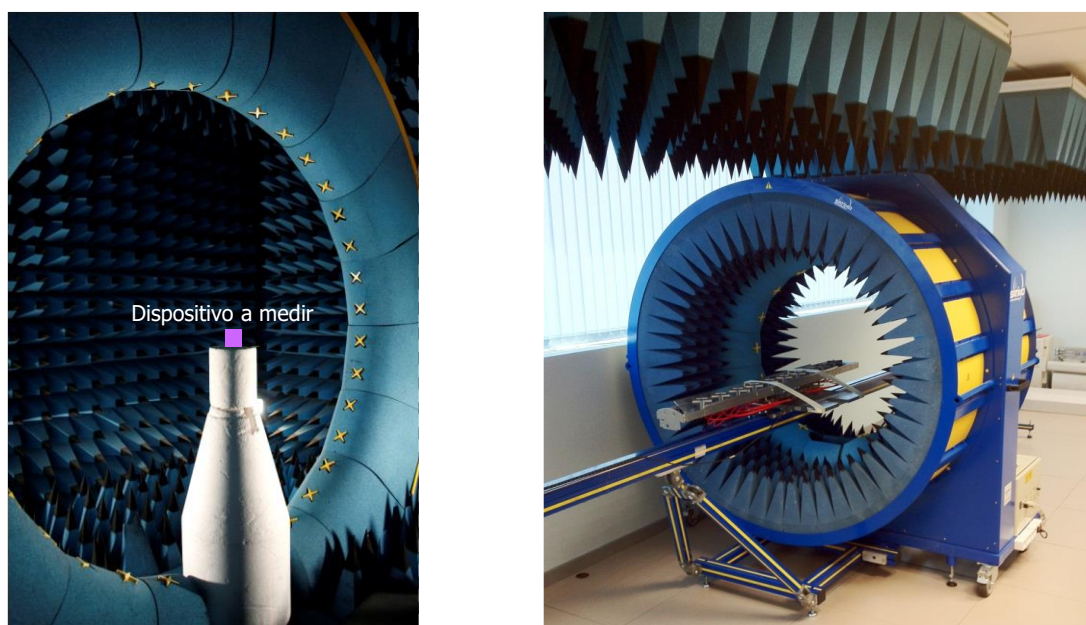


Fig. 37 Cámaras anecoicas para la medida de parámetros de radiación. Izquierda) sistema de medida en donde el sistema radiante a medir se coloca en el centro del arco. Las sondas ubicadas en el arco en forma de aspa permiten medir cómo radia la antena en un plano; mediante rotación de la plataforma que sustenta a la antena a caracterizar, es posible medir la antena en otro plano (imaginemos diferentes cortes en una esfera, donde cada corte es una medida efectuada) y con ello tener medidas todas las direcciones del espacio. Derecha) sistema similar adecuado para medir antenas de dimensiones mayores como por ejemplo agrupaciones de antenas de estación base de telefonía móvil.

En la figura Fig. 37 encontramos otro ejemplo. En este caso está pensado para antenas de grandes dimensiones. Si bien la anterior cámara es útil para dispositivos de tamaño reducido, a la hora de medir antenas como las de estación base de telefonía móvil (antenas de dimensiones alrededor de los dos metros de longitud) sería necesario un arco de mayores dimensiones. Para evitarlo, el sistema de la figura Fig. 37 consta de un arco que va adquiriendo información a medida que la antena se va introduciendo en el mismo como si se tratase de un tac usado en el campo de la medicina. Así pues, con este equipo es posible medir antenas de grandes longitudes (2 o 3 metros) sin la necesidad de tener una cámara de grandes dimensiones con el coste económico que implica.

Algunas cámaras anecoicas, se diseñan para incorporar el efecto del cuerpo humano (Fig. 38) pues es interesante saber cómo la potencia se distribuye al espacio cuando el usuario está sujetando el teléfono para llamar. De este modo, se puede caracterizar de una manera práctica cómo se comportará el sistema radiante en una situación real. Otras cámaras, presentan grandes dimensiones pues están construidas para medir antenas instaladas en satélites, coches y aviones (Fig. 38).

Debido al constante aumento del mercado de la telefonía móvil y dispositivos inalámbricos portátiles, existen cámaras anecoicas donde se puede medir las características de radiación de una antena teniendo en cuenta el entorno de propagación. En efecto, en un entorno de propagación como el de las comunicaciones móviles, una antena de estación base de telefonía móvil situada en un tejado emite potencia en una dirección particular del espacio pero que esta llega al usuario no sólo en una dirección, sino que puede llegar en algunas ocasiones por diferentes caminos debido a reflexiones en edificios, automóviles, etcétera. Para tener en cuenta este entorno de propagación multi-camino, los ingenieros han ideado una cámara anecoica capaz de recrear un entorno de propagación con múltiples caminos y de esta forma caracterizar la antena de una forma más cercana a la realidad (Fig. 39).



Fig. 38 Cámaras anecoicas para la medida de antenas integradas en dispositivos móviles teniendo en cuenta el cuerpo humano; para antenas integradas en satélites, coches y aviones. Cámara de Satimo y ESA (European Space Agency)

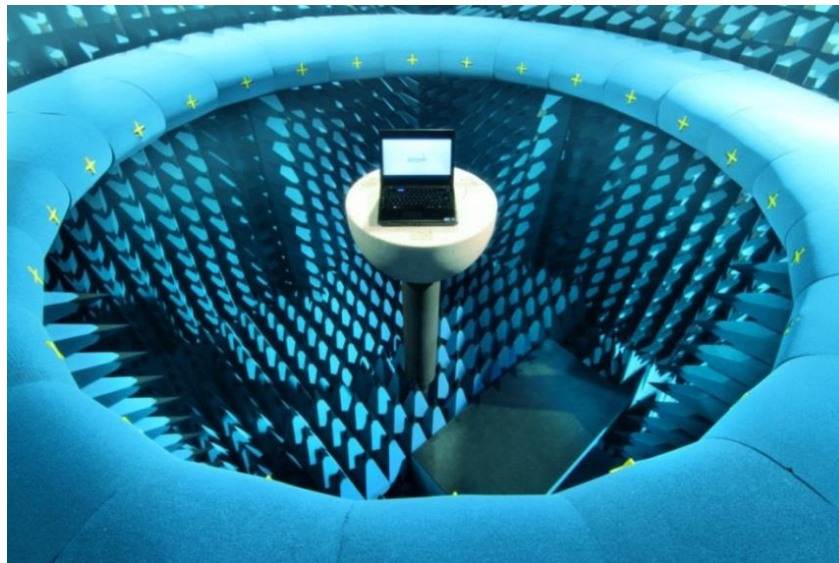


Fig. 39 Cámara anecoica de la empresa Satimo para medir antenas cuando el dispositivo donde se encuentran las antenas integradas está en un entorno multi-propagación como por ejemplo una oficina. Las ondas electromagnéticas del exterior inciden al dispositivo por diferentes direcciones debido a reflexiones en paredes, techos, vehículos del exterior, etc.

Otros equipos útiles para la caracterización de antenas es lo que se denomina SAR (*Specific Absorption Rate*, tasa de absorción específica). Estos equipos miden la cantidad de potencia absorbida en el interior de un tejido humano como por ejemplo la cabeza humana, cuando un teléfono móvil está operando en contacto con el cuerpo humano⁶. Consta por una parte de un robot de alta precisión el cual dispone de una sonda en el extremo de un brazo (Fig. 40, Fig. 41). Por otro lado, disponemos de un maniquí humano el cual se rellena de un líquido que emula las características electromagnéticas del tejido humano a las frecuencias de operación del sistema a medir. El dispositivo con antena integrada se coloca en la mejilla de la cabeza si se trata por ejemplo de caracterizar una antena de un teléfono móvil. Una vez el teléfono con antena está transmitiendo potencia, el brazo robot con la sonda se incorpora dentro del líquido para poder escanear diferentes puntos en el interior del cuerpo humano y poder de esta forma calcular la potencia que se absorbe en la cabeza. A partir de estas medidas, se extrae el SAR. Para que un teléfono móvil pueda comercializarse, el SAR debe estar por debajo de un límite establecido, en caso contrario, no llega al mercado. Por ejemplo, uno de los límites establece que el SAR sea inferior a 2mW/gr promediados en diez gramos de tejido humano.



Fig. 40 Equipo de medida de SAR formado por un brazo robot articulado provisto de una sonda en su extremo, capaz de medir el campo eléctrico en el interior de una cabeza maniquí llena de líquido que emula el cerebro humano a las frecuencias de interés

⁶ A la disciplina encargada de estudiar los efectos de absorción de potencia electromagnética en el cuerpo humano se le denomina dosimetría electromagnética

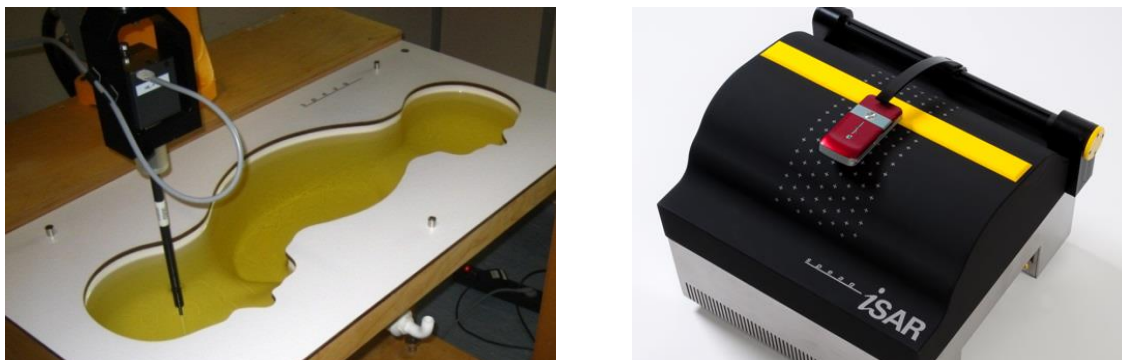


Fig. 41 Izquierda) detalle de un sistema de medida SAR mostrando la sonda encargada de medir el campo eléctrico en el interior de la cabeza cuando en la mejilla hay colocado un teléfono móvil activado (emitiendo potencia); derecha) sistema compacto de medida SAR donde en lugar de utilizar una sonda que va barriendo diferentes puntos, existe una matriz de sondas capaces de medir el campo emitido por el teléfono móvil y poder calcular asimismo el SAR. Gentileza de María del Mar Miñana de la empresa Schmid & Partner Engineering AG en Suiza

Aparte de este robot para medir SAR, dentro del campo de la dosimetría electromagnética se ha sofisticado los maniqués para poder caracterizar cómo una antena radia en presencia del cuerpo humano y a su vez como el cuerpo humano altera las características de radiación de una antena. Así pues, existen maniqués de cabeza, de manos, de torsos e incluso de cuerpo entero (Fig. 42).

Existen otros equipos para la caracterización de antenas, pero los divulgados aquí son de los más representativos e ilustran que para la caracterización de antenas se necesita personal altamente cualificado como por ejemplo ingenieros de telecomunicación.

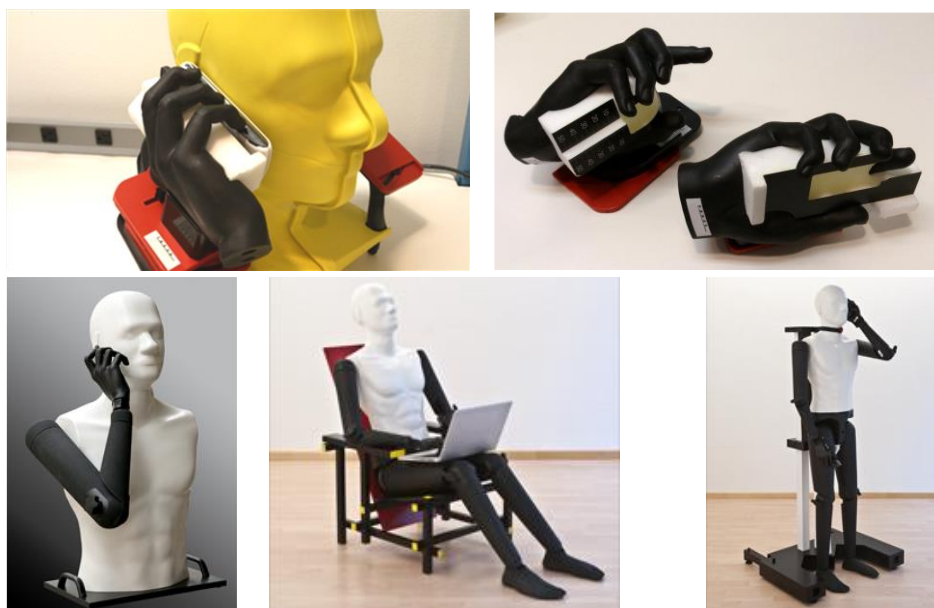


Fig. 42 Maniqués humanos contruidos con materiales que emulan el comportamiento humano a las frecuencias de interés. Con ellos es posible analizar cómo se comportan las antenas en condiciones de uso

VI. APLICACIONES

En esta sección se presentan algunas de las aplicaciones y avances en el campo del diseño de antenas.

Un área interesante de trabajo es el de antenas sintetizadas mediante algoritmos genéticos. Un algoritmo genético es un proceso de optimización inspirado en la evolución natural de las especies. Mediante estos algoritmos se consiguen diseñar antenas de una forma casi totalmente automatizada [13]-[15]. Para ilustrarlo utilizemos un símil músico. Para un pianista experto resulta fácil reproducir

una partitura. A este proceso se denomina análisis. Trasladado al campo de las antenas, se traduce como el procedimiento para calcular cómo radia una antena en base a su geometría, dimensiones y materiales. Si ahora al pianista experto se le pregunta que a partir de una música que escucha, sintetice la partitura, el problema le va a resultar mucho más arduo. Este proceso se denomina síntesis. Traducido al campo de las antenas es resolver qué geometría, dimensiones y materiales debe tener la antena para que se comporte de una determinada forma. El problema es complejo. Una de las formas de abordar este problema es mediante la utilización de algoritmos de optimización como por ejemplo los genéticos. De una forma simplificada, este algoritmo consta de diversas etapas. En primer lugar, partimos de una población inicial creada de forma aleatoria. Esta población, podría tratarse de cuatro antenas creadas de forma aleatoria. Cada una de ellas se analiza mediante un simulador electromagnético. Se compara las prestaciones de cada una con la especificación requerida y se ordenan de mejor a peor. Siguiendo un proceso de selección natural, podemos descartar los dos elementos peores de esta población. Para conseguir nuevos individuos para la población, a partir de los dos individuos mejores se combinan características de una antena con la otra para crear un par de hijos. Estos hijos o antenas pueden tener unas prestaciones peores, iguales o mejores que los padres. Para incluir nuevo material genético, la naturaleza incluye un operador que se denomina mutación, el cual consiste en alterar de forma aleatoria alguna característica de algún individuo. En este caso se altera la geometría de alguna de las antenas obteniendo uno individuo que a su vez puede ser peor, igual o incluso mejor. Si este nuevo elemento mutado es mejor, dará lugar a descendencia. De esta forma, en cada iteración, la población tiene unas características iguales o mejores que sus antecesores. A medida que el tiempo avanza, se está convergiendo hacia la solución deseada, es decir, se tenderá a una antena que tendrá unas características de radiación similares o iguales a las especificadas. Se observa que las antenas sintetizadas mediante algoritmos genéticos responden a formas no intuitivas y que en el ejemplo han sido diseñadas para que radien de forma similar en dos bandas de frecuencia diferente (Fig. 43) [16]-[17]. Aunque este proceso puede parecer totalmente automatizado, siempre tiene que intervenir el ingenio del ingeniero para poder diseñar de forma adecuada el algoritmo genético.

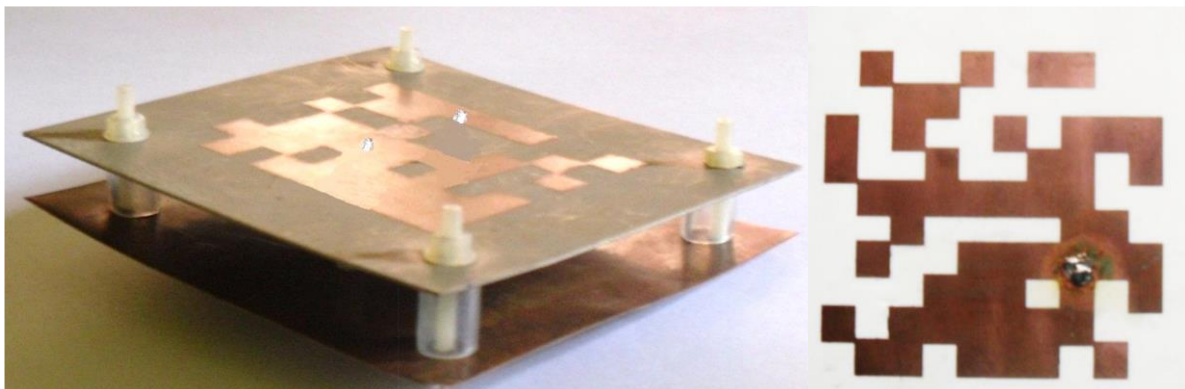


Fig. 43 Antenas tipo microstrip cuyas geometrías han sido obtenidas mediante algoritmos genéticos. Gentileza de la Dra. J.Jayasinghe del Department of Electronics, Wayamba University of Sri Lanka

Otro campo interesante en el diseño de antenas es la utilización de la geometría fractal [18]-[19]. De forma simplificada fractal es un objeto irregular, del latín *fractus* que significa roto. Los más conocidos son los fractales auto-semejantes. Un fractal auto-semejante es aquel que presenta copias del objeto a diferentes grados de escala. Gracias a la auto-semejanza es posible diseñar antenas de forma que sean capaces de radiar de una forma similar en diferentes frecuencias lo cual hemos visto anteriormente era un problema complejo. Tiene su aplicación en diversos campos. Uno de ellos es las antenas de estación base de telefonía móvil en la que, al existir diferentes sistemas de comunicación, es necesario antenas que radien similarmente en sus diferentes frecuencias (Fig. 44).

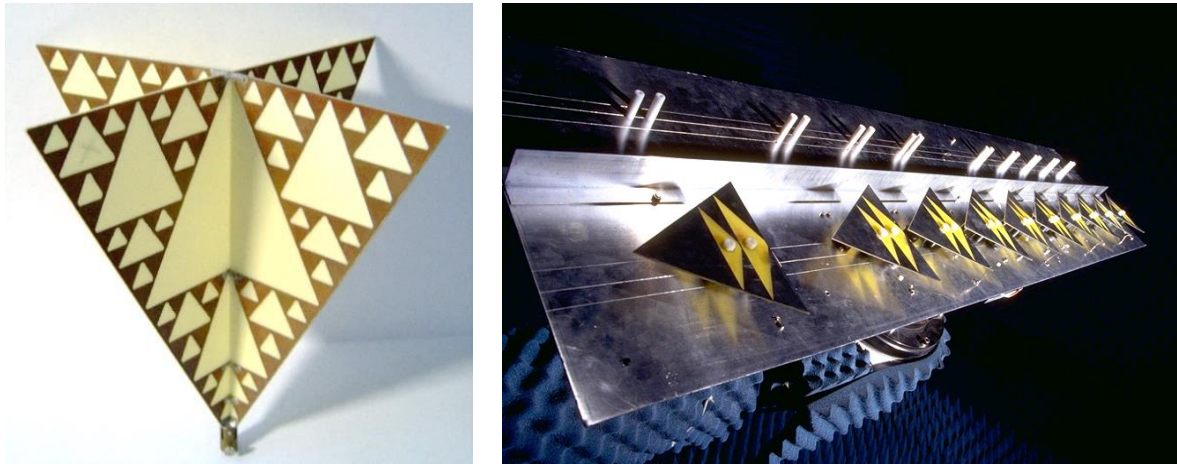


Fig. 44 Antenas inspiradas en geometrías fractales como el triángulo de Sierpinski

Un campo interesante de aplicación es el de diseño de antenas integradas en el cuerpo humano tales como en el interior del ojo, antenas encapsuladas listas para ser ingeridas, antenas en marcapasos, incluso antenas integradas en dientes (Fig. 45). Estas antenas implantadas se utilizan para biotelemedicina: monitorización de enfermedades vía radiofrecuencia [20]-[23].

Dado que las antenas integradas radian en un entorno complejo, es necesario conocer cómo este influye en las características de radiación a su vez que es necesario disponer de técnicas para miniaturizar las antenas y que sean fácilmente integrables en lugares tan ingeniosos como en el interior de un diente [23]. Entre las diferentes aplicaciones tenemos el control de la presión arterial, y glaucoma. Incluso antenas integradas en ropa con los mismos fines conviven entre nosotros [24].

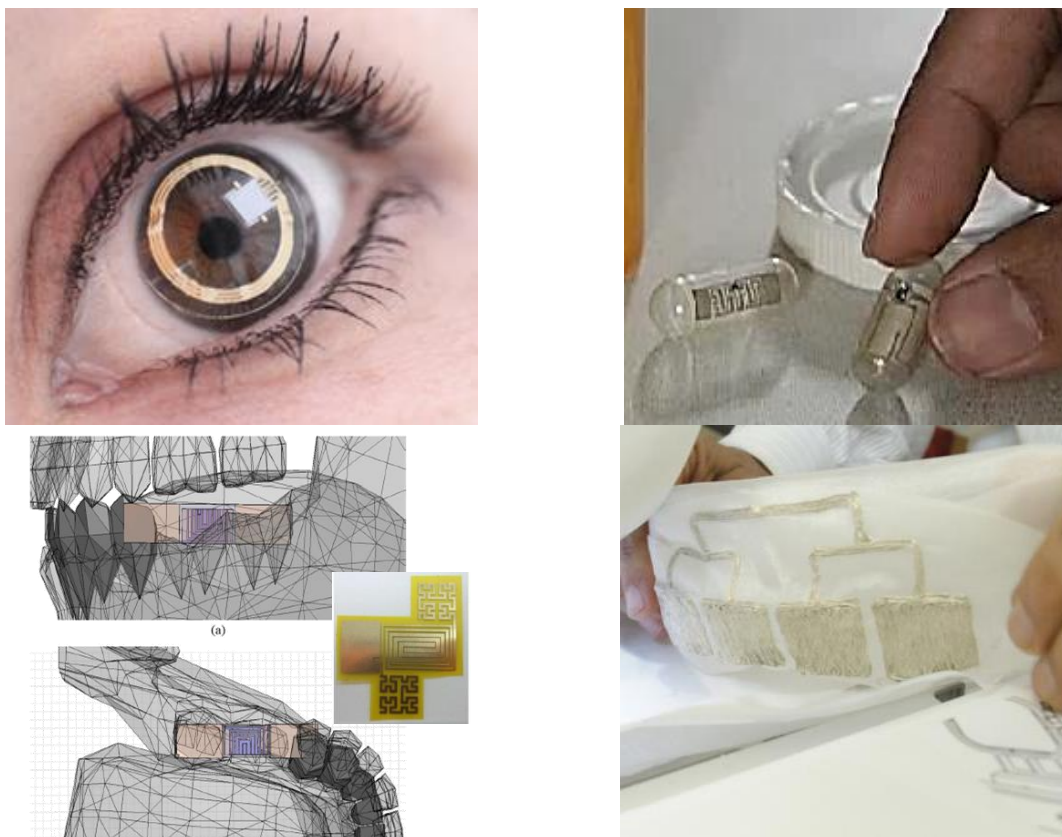


Fig. 45 Antenas integradas en el ojo, en capsulas para ser ingeridas, en dientes con el objetivo de monitorizar nuestra salud y antenas integradas en ropa

Actualmente vivimos envueltos de múltiples sistemas de comunicación no sólo los típicos de televisión y radio sino todos los de comunicaciones móviles. De esta forma existe potencia electromagnética en nuestro entorno que de alguna forma puede reaprovecharse. El objetivo es aprovecharla para alimentar dispositivos electrónicos sin la necesidad de recurrir a baterías. Esta aplicación tiene sus bases cuando el científico croata Nikola Tesla demostró que era posible alimentar un campo de bombillas mediante la radiación de una antena a una distancia [25]. En la actualidad, se encuentran aplicaciones tales como RFID (*Radio Frequency IDentification*) los cuales consisten en antenas que se pueden integrar en diferentes utensilios como ropa, comestibles, etc., de forma que cuando un emisor les envía una onda electromagnética para que se identifiquen, son capaces de extraer potencia de dicha onda y de este modo alimentar una pequeña batería y responder con un código que identifica a ese objeto (Fig. 46). De esta forma, la antena y la electrónica asociada al RFID no consume potencia alguna, sino que la aprovecha del exterior pues no sería práctico tener baterías en cada objeto [26].

Hemos comentado a lo largo del artículo que con el objetivo de transmitir información se necesitan frecuencias asociadas a la misma. Si la información a transmitir es voz o texto, se necesita poco ancho de banda (pocas frecuencias para llevar dicha información). Por el contrario, si la información a transmitir tiene más contenido, como por ejemplo vídeo, es necesario mayor ancho de banda (más frecuencias). Como el espectro electromagnético es limitado, existen técnicas que pueden enviar y recibir más información sin la necesidad de aumentar excesivamente el número de frecuencias. Esta técnica consiste en añadir más antenas tanto en el equipo emisor como en receptor. Mediante técnicas sofisticadas de diseño de antenas y procesado de la señal, este sistema con múltiples antenas (MIMO: *Multiple Input Multiple Output*) es capaz de poder enviar/recibir información como videos e imágenes sin la necesidad de un uso excesivo de frecuencias (Fig. 46).

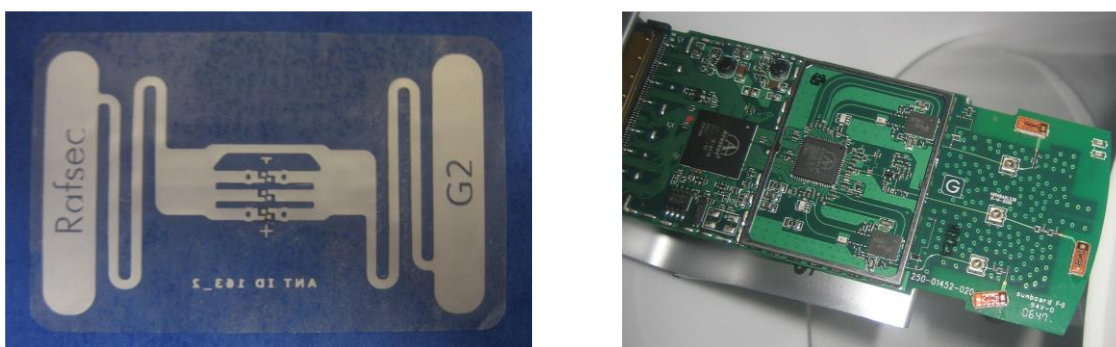


Fig. 46 Izquierda) antena de RFID impresa sobre una película adhesiva fácil de colocar en consumibles; derecha) sistema con múltiples antenas - MIMO (en color naranja). Gentileza de Ignion, Barcelona

Las antenas, aparte de tener que radiar de la forma correcta, deben presentar cualidades mecánicas tales como por ejemplo robustez, ligereza, poco coste, no degradables a las inclemencias del tiempo. Entre algunos avances en el campo, encontramos las antenas fabricadas con esponjas metalizables [27]-[30]. Consiste en una esponja sintetizada químicamente la cual presenta un peso ligero a la vez que conjuga dureza considerable (Fig. 47). Además, puede ser tratada para depositar conductor en su superficie y de esta forma poder diseñar antenas de poco peso lo cual las hace útiles para antenas embarcadas.

Es interesante viajar hacia el corazón de una antena de estación base de telefonía móvil. Como se ha comentado en apartados anteriores (III-F), para conseguir concentrar la radiación electromagnética, hay que aumentar las dimensiones de la antena. Para conseguir concentrar la radiación en una dirección determinada, se utilizan diversas antenas en lo que se denomina agrupación de antenas (Fig. 48). Al igual que el ejemplo del niño del estanque que podía lanzar las piedras de forma síncrona o bien con cierto desfase, lo mismo ocurre en este tipo de antenas en la que la excitación de cada antena

dependiendo del instante de tiempo, permite que la radiación se dirija hacia una u otra dirección. En situaciones de alta densidad de usuarios, es posible apuntar hacia el suelo y, por el contrario, en situaciones con menos usuarios, se puede apuntar hacia el horizonte para cubrir un sector de superficie mayor.

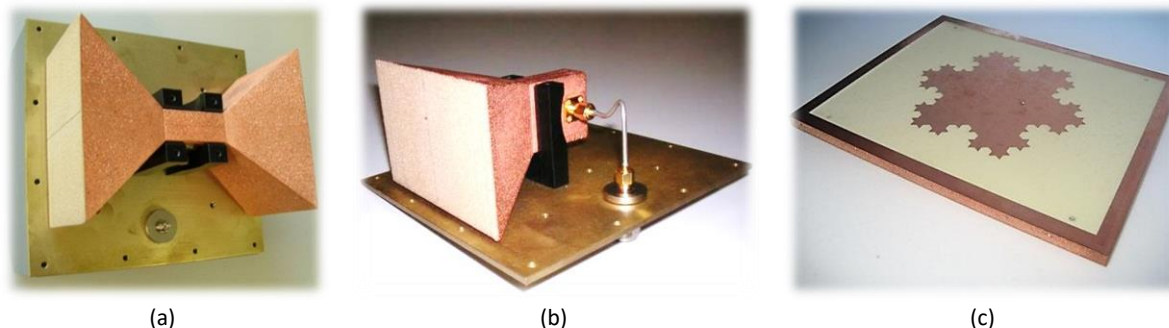


Fig. 47 Antenas construidas mediante esponjas metalizables; a) bocina de doble apertura; b) bocina; c) antena microstrip inspirada en el fractal de Koch. Gentileza del Prof. Jean-Pierre Daniel de la empresa Advanten, Rennes – France

Vemos aquí que el diseño de antenas no solo abarca el campo de ingeniería de antenas sino también circuitos de microondas y por supuesto diseño mecánico pues las antenas deben tener materiales rígidos robustos, no degradables con el tiempo y que presenten además buenas características radioeléctricas [31].

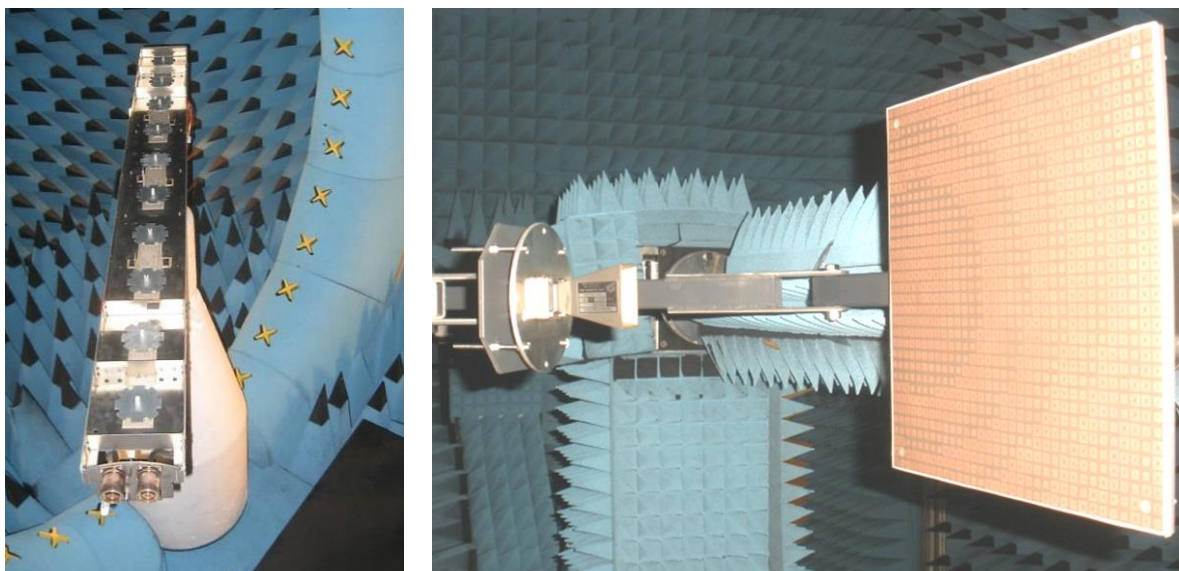


Fig. 48 Izquierda) antena de estación base donde se observan las diferentes antenas microstrip que componen la agrupación de antenas. Mediante la correcta excitación de cada elemento, se puede obtener la forma de radiar deseada; gentileza de Fractus, Barcelona; derecha) Reflectarray, antena de perfil plano en contraposición al reflector parabólico. Gentileza del profesor Felipe Cátedra de la Universidad de Alcalá de Henares y de la empresa Fasant en Guadalajara

Los metamateriales son otro campo atractivo dentro del diseño de antenas [32]-[33]. El nombre meta-material proviene del griego *meta*, *más allá*. Los metamateriales consisten en sintetizar materiales que presentan propiedades no presentes en la naturaleza como por ejemplo permitividades y permeabilidades negativas. De esta forma, se abre una ventana que permite el diseño de antenas con características de materiales que no existen en la naturaleza. Pongamos un ejemplo, un rayo de luz al pasar del aire al agua se curva ligeramente (Fig. 49). En cambio, si el segundo medio en vez de ser agua fuese un agua metamaterial se produciría una inversión de este fenómeno. A este fenómeno se denomina inversión de la ley Snell. Mediante los metamateriales se dispone de otra vía para diseñar

antenas de pequeñas dimensiones y directivas, así como circuitos de microondas miniatura entre algunas de las ventajas más relevantes.



Fig. 49 Izquierda) el vaso de la izquierda muestra la distorsión real creado por el agua; en el vaso de la derecha, se ilustra un caso imaginario en el que el agua tuviese características de metamaterial y su efecto sobre la deformación de la imagen; derecha) agrupación periódica de tramos rectilíneos conductores y espiras con el objetivo de sintetizar permeabilidades y permitividades negativas en una determinada frecuencia

Las antenas se integran cada vez en entornos complejos. Hace tiempo era común ver antenas en el exterior de un vehículo como por ejemplo la típica antena de hilo para la recepción de FM. Actualmente, un vehículo, está diseñado además para recibir en muchos otros sistemas de comunicación como por ejemplo en telefonía móvil. Si las antenas no se hubiesen integrado, se verían hoy en día coches con varias antenas en el techo. Actualmente están integradas en lugares del coche como por ejemplo los marcos y los espejos retrovisores (Fig. 50). Es importante mencionar que no únicamente las antenas son útiles para los usuarios de los vehículos, sino que además permiten que los vehículos se conecten entre sí con el objetivo de compartir alertas de accidentes, estado del tráfico, etc.



Fig. 50 Izquierda) antena integrada en el retrovisor; derecha) antena integrada en la ventana lateral. Gentileza de la empresa Ficosa International, Advanced Communications BU, Barcelona

Un ejemplo futurista lo tenemos en una antena integrada en lo que podría ser un objeto de decoración. Como hemos visto, los materiales dieléctricos son capaces de conformar la potencia radiada de una determinada manera. De esta forma sería posible que un objeto de decoración fuese moldeado, no a la voluntad del artista, sino a la voluntad del diseñador de antenas para que una vez se introduzca una antena en el objeto, pudiese radiar el conjunto de una forma determinada (Fig. 51). Se podría tener de esta forma, un jarrón adornando nuestro hogar que ejerciese además las funciones de antena de Wi-Fi sin la necesidad de disponer exclusivamente de una antena dedicada a ello.

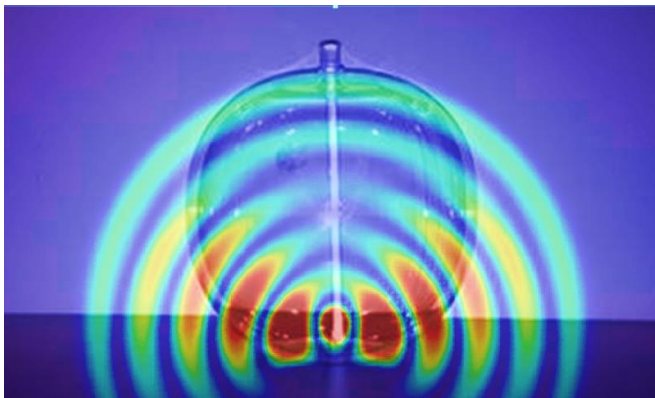


Fig. 51 Mediante una pequeña sonda se genera una onda electromagnética que, gracias a la forma del jarra, la potencia radiada se distribuye de la forma deseada en una habitación

Uno de los campos, por no decir en el que más éxito está teniendo las antenas, es el campo de la telefonía móvil y dispositivos portátiles [35]-[36]. Las cifras son astronómicas, más de dos mil millones de dispositivos móviles vendidos al año. Teniendo en cuenta que cada dispositivo móvil puede llegar a tener entre cuatro a cinco antenas, la cifra es impresionante: unos diez mil millones de antenas cada año. Esto empuja a los equipos de investigación a trabajar de una forma dinámica con el objetivo de diseñar antenas pequeñas capaces de operar en diferentes bandas de comunicación y de ser eficientes ante la presencia del cuerpo humano además de ser mecánicamente sencillas para ser integradas fácilmente en los nuevos dispositivos de telefonía móvil. Las formas que adoptan estas antenas responden a estas necesidades puesto que el espacio dentro del teléfono móvil es reducido (Fig. 52).



Fig. 52 Antenas comerciales de teléfonos móviles. Las formas responden a requisitos de funcionamiento: tienen que ser lo suficientemente pequeñas para integrarse en el teléfono y deben operar en varios sistemas de telecomunicación de telefonía móvil

Con la aparición de nuevos estándares de comunicación, es necesario incluir diversas antenas dentro de un dispositivo *wireless*⁷. Con las técnicas actuales, el problema es complejo pues se necesita miniaturizar las dimensiones de las antenas. A raíz de esto ha aparecido una nueva tecnología de antenas inventada en el 2007 por los autores del presente artículo, que pasa por eliminar las antenas actuales por unos elementos de unas dimensiones unas diez veces más pequeña. Dichos elementos son denominados *antenna boosters* siendo capaces de excitar la propia estructura conductora del dispositivo móvil para que el propio dispositivo sea la antena [37]-[42]. Como este elemento

⁷ Dispositivo Wireless o inalámbrico es aquel en el que la transmisión de información está soportada por ondas electromagnéticas

básicamente no funciona como una antena como tal sino que transfiere las características de radiación a la estructura conductora del dispositivo, se denomina tecnología de Antena Virtual (Virtual Antenna™ Technology) y supone un cambio radical en el diseño de antenas para satisfacer las exigentes demandas de prestaciones de los dispositivos *wireless* (Fig. 53).

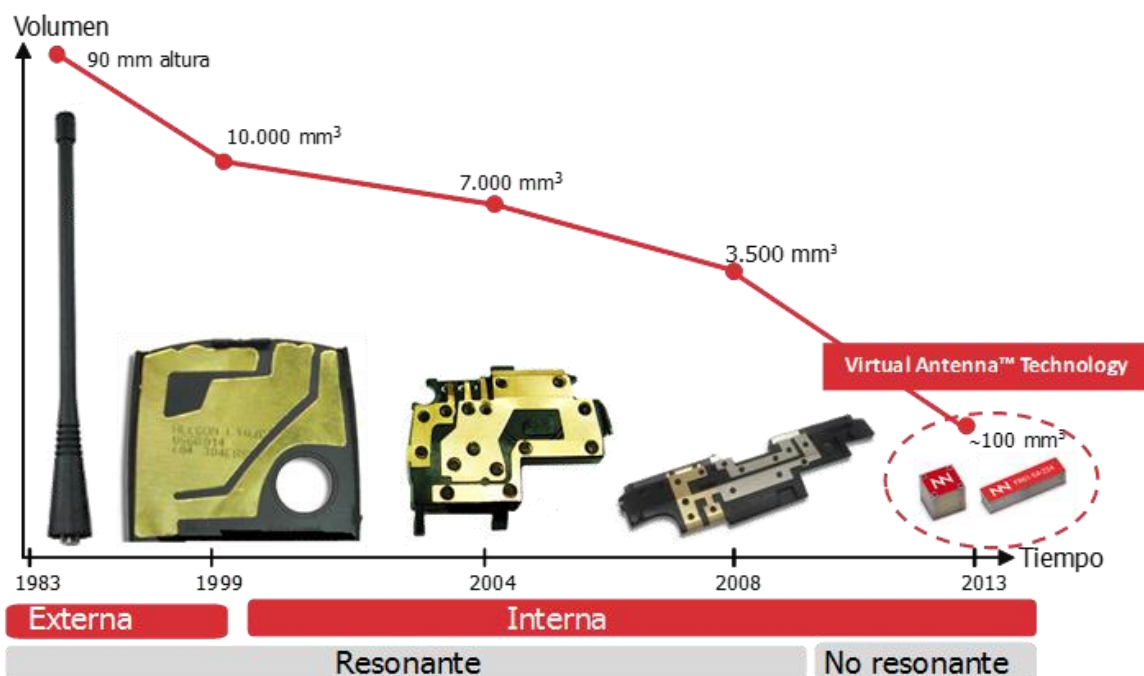


Fig. 53 Evolución de antenas para dispositivos móviles, desde las antenas externas a las internas, donde Virtual Antenna™ Technology destaca por su miniaturización [43]

A parte de su alto grado de miniaturización, otra gran ventaja de Virtual Antenna™ Technology es que no es necesario diseñar una antena diferente para cada dispositivo como sucede con el mostrado en la Fig. 52. El mismo *antenna booster* se puede utilizar para diferentes tamaños de dispositivo y en diferentes bandas frecuenciales. Finalmente, un *antenna booster* adopta la forma de un componente tipo chip lo que permite que pueda ser integrado de forma automatizada.

A día de hoy, la tecnología está presente en dispositivos como sensores de agua, luz, gas, parkings, dispositivos de comunicación móvil, módulos de radiofrecuencia, etc.

VII. CONCLUSIONES

James Clerk Maxwell culmina en 1865 en las ecuaciones que llevan su nombre el trabajo previo de muchos científicos de la talla de Gauss, Ampère y Faraday añadiendo además un término fundamental para demostrar la existencia de ondas electromagnéticas. Con dichas ecuaciones se demuestra además que la velocidad de propagación de una onda electromagnética depende de la densidad del medio (permitividad y permeabilidad) y que, para el caso del aire, esta resulta ser cercana a los 300.000 km/s. Años más tarde, en 1888, Hertz demuestra su existencia de manera experimental y con la primera transmisión de información en 1901 entre Gales y Terranova realizada por Marconi, se da comienzo a la revolución *wireless*.

A lo largo del artículo se han presentado algunos de los parámetros básicos de antena, a destacar frecuencia de operación, polarización y directividad. La frecuencia de operación es relevante pues determina en general el tamaño de una antena: a mayor frecuencia, menor puede ser el tamaño de una antena. En cuanto a la polarización se ha visto su utilidad para poder aprovechar el espectro

electromagnético siendo útil para enviar información por un estado de polarización y otra información por el estado perpendicular, ubicadas ambas en el mismo margen frecuencial. En cuanto a la directividad, se ha visto que las antenas son capaces de transmitir/recibir ondas electromagnéticas y por tanto información, en determinadas direcciones del espacio. Para ciertas aplicaciones, se requiere antenas directivas capaces de concentrar la potencia hacia un receptor y de esta forma no enviar potencia a otras zonas de no interés.

El análisis de antenas se aborda tanto desde el dominio computacional como el experimental siendo los dos necesarios y complementarios. Con el avance de la velocidad de computación y altas capacidades de memoria, los ordenadores actuales son capaces de calcular problemas complejos de radiación como antenas integradas en dispositivos móviles teniendo en cuenta el cuerpo humano hasta antenas embarcadas en aviones.

Las aplicaciones donde la antena es un elemento indispensable van en aumento, desde las propias antenas integradas en los miles de millones de dispositivos móviles, antenas para explorar nuestro mundo exterior, hasta las antenas ubicadas en el interior del cuerpo humano. Antenas para conectar personas, personas con cosas y cosas con cosas. Y queda aún mucho por investigar y desarrollar donde la antena jugará un papel determinante como lo viene haciendo hasta el momento.

VIII. AGRADECIMIENTOS

- A la Fundació Caixa Vinaròs.
- A las empresas de tecnología Fractus e Ignion, Barcelona.
- A María del Mar Miñana de la empresa Schmid & Partner Engineering AG en Suiza por la cesión de material sobre simulación Semcad y medidor de SAR.
- A la empresa FEKO por el material sobre radiación en estructuras complejas.
- A la empresa MWV (MicroWave Vision) por el material sobre cámaras anecoicas tipo Stargate.
- Al Dr. Francisco Cortés e Ismael Bel de la empresa Telnet Redes Inteligentes, Zaragoza por la cesión de material sobre sistema de medida compacto.
- A la Dra. J. Jayasinghe del Department of Electronics, Wayamba University of Sri Lanka por la cesión de material sobre antenas genéticas.
- A Ramiro Quintero, Alfonso Sanz, Enrique Martínez de la empresa FICOSA International, Advanced Communications BU por el material sobre antenas integradas en coches.
- Al profesor Jean-Pierre Daniel de la empresa Advanten de Rennes, Francia, por la cesión de material sobre antenas fabricadas con esponjas metalizadas.
- Al profesor Felipe Cátedra de la Universidad de Alcalá de Henares y de la empresa Fasant en Guadalajara por su material sobre reflectarrays.

IX. REFERENCIAS

- [1] J. Anguera, "¿Es posible viajar al pasado y al futuro y al mismo tiempo vivir el presente? Experiencias en Corea del Sur." Editorial Antinea. 2016, ISBN 978-84-945266-0-2
- [2] Foro Histórico de las Telecomunicaciones. COIT (Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación)
- [3] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", *Philosophical Transactions*, 166, 1865, pp.459-512.
- [4] J. D. Krauss, "Antennas Since Hertz and Marconi", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.33, nº2, Feb. 1985, pp.131-135
- [5] D.L. Sengupta and T.K.Sarkar, "Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the Early History of Electromagnetic Waves", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.45, nº2, April 2003, pàg.13-19.
- [6] T. K. Sarkar, R. J. Mailloux, A. A. Oliner, M. Salazar, D. L. Sengupta, "History of Wireless", *Wiley-Interscience*, Kai Chang, Series Editor, 2006.
- [7] IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, IEEE Std 145-1983.
- [8] J. Anguera y A. Perez, "Teoría d'Antenas", ISBN 978-84-935665-4-8
- [9] V. H. Rumsey, "Frequency Independent Antennas", 1957 *IRE National Convention Record*, pt.1, pp.114-118,

- [10] Y. Mushiaki, "Self-Complementary Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.34, nº6, Dec. 1992, pag.23-29.
- [11] C. Huygens, "Treatise on Light", Bibliolife.
- [12] A. D. Greenwood and J. M. Jin, "A Field Picture of Wave Propagation in Inhomogeneous Dielectric Lenses", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, No. 5, October 1999.
- [13] P. J. Hall, "The Square Kilometre Array Radio Telescope", *Proc. Workshop on Applications of Radio Science*, Beechworth (Australia), pp. 41-46, April 2000.
- [14] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, vol. 37, no. 2, p. 7-15.
- [15] J. M. Johnson, Y. Rahmat-Samii, "Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, vol.39, p.7-21.
- [16] J. W. Jayasinghe, J. Anguera, and D. N. Uduwawala, "A simple design of multi band microstrip patch antennas robust to fabrication tolerances for GSM, UMTS, LTE, and Bluetooth applications by using genetic algorithm optimization", *Progress In Electromagnetics Research M*, 2012, Vol. 27, p. 255-269.
- [17] J. W. Jayasinghe, J. Anguera, D.N. Uduwawala, "Genetic Algorithm Optimization of a High-Directivity Microstrip Patch Antenna Having a Rectangular Profile", *Radioengineering*, Vol. 22, No. 3, September 2013, pp.700-707.
- [18] C. Puente, J. Anguera, C. Borja, J. Soler, "Fractal-Shaped Antennas and their Application to GSM 900/1800", *The Journal of the Institution of British Telecommunications Engineers*. Vol.2, Part 3, July-Set. 2001.
- [19] J. Anguera, C. Puente, C. Borja, J. Soler, "Fractal-Shaped Antennas: a Review". *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, vol.2, pp.1620-1635, 2005.
- [20] Empresa Suiza Sensimed. <http://www.sensimed.ch/en/>
- [21] R. Bashirullah, "Wireless Implants", *IEEE Microwave Magazine*, December 2010 Supplement.
- [22] M. R. Yuce, T. Dissanayake, "Easy-to-Swallow Wireless Telemetry", *IEEE Microwave Magazine*, Sep. 2012, pp.90-101.
- [23] C. L. Yang, C.L.Tsai, S.H. Chen, "Implantable High-Gain Dental Antennas for Minimally Invasive Biomedical Devices", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.61, nº5, May 2013, pp.2380-2387.
- [24] G.Y. Lee, D. Psychoudakis, C. C. Chen, J. L. Volakis, "Omnidirectional Vest-Mounted Body-Worn Antenna System for UHF Operation", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.10, 2011, pp.581-583.
- [25] N. Tesla, "Apparatus for Transmitting Electrical Energy", *US Patent 1,119,732*, 1914.
- [26] G. Marrocco, "The art of UHF RFID Antenna Design: Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 50, pp. 66-79, Feb. 2008.
- [27] J. P. Daniel, H. Havot, K. Sayegrih, "Antenna Developments using Polymers and Metallized Foam", *2nd European Conference on Antennas and Propagation*, EuCAP'07, Edinburgh, UK.
- [28] French patent n° 98 08182, "Procédé de revêtement de mousse pour la fabrication d'éléments d'antennes".
- [29] French patent n° 04 02510, "Dispositif de perturbation de la propagation d'ondes électromagnétiques, procédé de fabrication et application correspondants".
- [30] J. Anguera, J. P. Daniel, C. Borja, J. Mumbrú, C. Puente, T. Leduc, N. Laeveren, P. Van Roy, "Metallized Foams for Fractal-Shaped Microstrip Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.50, nº6, Dec. 2008, pp. 20-38.
- [31] Z. N. Chen and K. M. Luk, "Antennas for Base Stations in Wireless Communications", ISBN-13: 978-0387723990
- [32] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*. P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences, USSR, 1968.
- [33] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, "Metamaterials", *Physics and Engineering Explorations*. IEEE Wiley-Interscience. 2006.
- [34] K. W. Leung, E.H. Lim, X.S. Fang, "Dielectric Resonator Antennas: From the Basic to the Aesthetic", *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, nº7, July 2012, pp. 2181-2193.
- [35] Z. Ying, "Antennas in Cellular Phones for Mobile Communications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, nº7, July 2012, pp. 2286-2296.
- [36] J. Anguera, A. Andújar, M.C. Huynh, C. Orlenius, C. Picher, C. Puente, "Advances in Antenna Technology for Wireless Handheld Devices", *International Journal on Antennas and Propagation*, Volume 2013, Article ID 838364.
- [37] J. Anguera, A. Andújar, C. Puente, and J. Mumbrú, "Antennaless Wireless Device", *Patent Appl.* WO2010/015365, July 31, 2009, and patents US8203492 (B2) ; US9130259 (B2) ; US9276306 (B2)
- [38] J. Anguera, A. Andújar, C. Puente, J. Mumbrú, "Antennaless wireless device capable of operation in multiple frequency regions", *Patent Appl.* WO2010/015364, July 31, 2009., and patents CN102084542 (B2); US8237615(B2); US8736497 (B2); US9350070 (B2)
- [39] A. Andújar, J. Anguera, and C. Puente, "Ground Plane Boosters as a Compact Antenna Technology for Wireless Handheld Devices", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.59, nº5, pp.1668-1677, May. 2011.
- [40] A. Andújar and J. Anguera, "Magnetic Boosters for Multi-band Operation", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.55, nº1, pp.65-75, January 2013
- [41] J. Anguera, A. Andújar, and C. García, "Multiband and Small Coplanar Antenna System for Wireless Handheld Devices", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.61, nº 7, pp. 3782-3789, July 2013.
- [42] J. Anguera, C. Picher, A. Bujalance, and A. Andújar, "Ground Plane Booster Antenna Technology for Smartphones and Tablets", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.58, nº6, pp.1289-1294, June 2016.
- [43] J. Anguera, A. Andújar, and C. Puente, "Antenna-Less Wireless: A Marriage Between Antenna and Microwave Engineering", *Microwave Journal*, vol.60, no.10, October 2017, pp.22-36.

X. AUTORES



JAUME ANGUERA nació en Vinaròs, España, en 1972. IEEE Fellow, Chief Technology Officer (CTO) y cofundador de Ignion y profesor titular de la Universitat Ramon Llull (URL), Barcelona. Recibió el título de Ingeniero Técnico en Sistemas Electrónicos y de Ingeniero Superior en Electrónica ambos por la URL. Recibió, asimismo, el título de Ingeniero Superior de Telecomunicación y Doctor Ingeniero de Telecomunicación ambos por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona. Su tesis doctoral recibió la máxima calificación: excelente cum-laude.

De 1997 a 1999, fue investigador en el grupo de Ingeniería Electromagnética y Fotónica del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la UPC. En 1999 fue investigador en Sistemas Radiantes (Madrid) donde estuvo involucrado en el diseño de antenas para comunicaciones móviles. Ese mismo año inicia también su etapa de profesor en la facultad de Telecomunicación y Electrónica de la URL donde imparte docencia en diversas asignaturas de

teoría y diseño de antenas, propagación electromagnética y seminarios de doctorado.

Desde el mismo año 1999 inicia también su actividad profesional en la empresa de tecnología Fractus hasta julio del 2017. En Fractus, ha dirigido proyectos de diseño de antenas en el ámbito de la telefonía móvil celular (antenas de estación base y antenas por terminales móviles) y automoción. Sus intereses de investigación incluyen: diseño de antenas miniatura multibanda, arrays microstrip y arquitecturas de alimentación, optimización de antenas mediante algoritmos genéticos, antenas impresas muy directivas, dosimetría electromagnética, sistemas de diversidad/MIMO y aplicación de la geometría fractal al diseño de antenas. El 2003-2004 trabajó en Seúl (República de Corea del Sur) donde gestionó el inicio y desarrollo del departamento de I+D de Fractus en Corea, dirigiendo proyectos de diseño de antenas miniatura y multibanda para dispositivos móviles. En Corea se ganaron numerosos proyectos con empresas coreanas como por ejemplo Samsung, LG, entre otras. Fruto de su labor en Corea, ha publicado un libro sobre experiencias coreanas.

Ha realizado contribuciones pioneras dentro del campo de las antenas siendo inventor de más de 170 patentes concedidas en USA, Europa y Asia y 30 solicitudes de patente sobre antenas miniatura y multibanda para dispositivos de comunicación móvil, muchas de las cuales han estado licenciadas a grandes empresas multinacionales. Posee además dilatada experiencia en diseño de producto donde la tecnología de antenas Fractus ha superado la cifra de más de treinta y cinco millones de antenas comercializadas en todo el mundo.

Es autor de más de 280 publicaciones en revistas científicas, congresos nacionales e internacionales (índice h=55). Ha dirigido más de 180 proyectos final de carrera. Director de cuatro tesis doctorales. Es autor de 8 libros en el campo de antenas y electromagnetismo aplicado.

El Dr. Anguera fue miembro del equipo fractal que el año 1998 recibió el European Information Technology Grand Prize por parte del "European Council for the Applied Science an Engineering and the European Commission" por su contribución a "Fractal-shaped antenna application to cellular telephony". Fue finalista a la mejor tesis doctoral en 2003 ("Fractal and BroadBand Techniques on Miniature, Multifrequency, and High-Directivity Microstrip Patch Antennas") en UMTS, premio otorgado por Telefónica Móviles España. En 2004, recibió el premio a la mejor tesis doctoral en Redes y Servicios de Banda Ancha otorgado por el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación y por la empresa ONO. El mismo año recibe el "New Faces of Engineering 2004" (IEEE, IEEE Foundation). A nivel de grupo de investigación en Fractus, ha recibido el Technology Pioneer distinción concedida por el World Economic Forum en el 2005 y el de Academiae Dilecta por la Real Academia de Ingeniería en el 2015. En el 2011 recibe el "Alé Vinarossenc" otorgado por la Fundació Caixa Vinaròs. Finalista European Patent Award 2014.

En 2007, después de un proyecto de investigación en la empresa tecnológica Fractus (Barcelona), el Dr. Jaume Anguera y la Dra. Aurora Andújar inventaron una nueva y rompedora tecnología de antena conocida comercialmente como Virtual Antenna® Technology. Esto ha dado lugar a muchas patentes, artículos científicos, tesis, conferencias, cursos y productos que catalizan la creación de una nueva empresa en la que es cofundador y CTO: Ignion para comercializar Virtual Antenna® technology. Hoy en día son ya muchos los dispositivos Wireless que llevan integrados Virtual Antenna®.

El Dr. Anguera es revisor en numerosas revistas científicas, así como de varios congresos nacionales e internacionales. Editor en International Journal of Antennas and Propagation y Electronics Letters. Ha ejercido de *session chair* y ha estado en el comité científico de numerosos congresos del área de antenas y propagación electromagnética. Ha participado en más de 20 proyectos nacionales del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, ACCIÓ (Generalitat de Catalunya) y de la Comisión Europea (Horizon 2020) muchos de ellos como investigador principal con una financiación superior a los 11 millones de euros.

Desde 2001 dirige proyectos de investigación sobre antenas pequeñas y multibanda para dispositivos móviles en el marco de colaboración entre el Departamento de Electrónica y Telecomunicación de la URL y la empresa de tecnología Fractus (2001-2017) y desde 2017 con Ignion. Los estudiantes que han elaborado sus trabajos dentro de este marco han sido galardonados con premios a los mejores trabajos de fin de carrera otorgados por el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT), por el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación (CITT), y por el programa Arquímedes del Ministerio de Ciencia e Innovación.

En el 2013, funda *ciènciaprop*®, programa de divulgación de ciencia y tecnología.

Fruto de sus aportaciones en el campo de antenas miniatura y multibanda para dispositivos de telecomunicación, es nombrado IEEE Fellow donde Virtual Antenna® es su aportación más sobresaliente.

Su curriculum vitae aparece en Who'sWho in the World y en Who'sWho in Science and Engineering.

Más información sobre el autor en: <http://users.salleurl.edu/~jaume.anguera/>



AURORA ANDÚJAR nació en Barcelona, España, 1984. Recibió el título en Ingeniería Técnica de Telecomunicación especializada en Sistemas de Telecomunicación en 2005, de Ingeniera Superior de Telecomunicación en 2007, el de Máster en Ciencias en Ingeniería y Gestión de las Telecomunicaciones en 2007 y el doctorado en el año 2013 por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España. En 2004-2005 recibió una beca de investigación en el campo de la compatibilidad electromagnética en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicación de la UPC. En 2005 trabajó como ingeniera de pruebas de software para aplicaciones destinadas a dispositivos inalámbricos de teléfonos móviles. En 2006 trabajó como ingeniera de software para el Campus Digital en ambientes académicos. Desde 2007 a 2017 estuvo con Fractus como ingeniero de I+D donde estuvo involucrada en el diseño de antenas miniatura y multibanda para dispositivos inalámbricos. Estuvo implicado en el mantenimiento y crecimiento de la cartera de patentes de la empresa, incluyendo el desarrollo, escritura, y el *prosecution* de nuevas invenciones y patentes (2007-2013). En el 2013, se traslada al Departamento de Productos y Servicios y en 2015 se convierte en manager de producto de la división en la que está a cargo del desarrollo y lanzamiento de nuevos productos de antena para dispositivos inalámbricos como smartphones, headsets, modules, internet of things, remote sensors, metering, automotive, etc. Desde 2009 lidera proyectos de investigación en el campo de antenas para dispositivos inalámbricos en el marco de colaboración universidad-industria. Sus líneas de investigación actuales son antenas multibanda y miniatura para dispositivos inalámbricos, redes de adaptación de banda ancha, diversidad y sistemas de antena MIMO. A partir de 2011 es consultora en la Universidad Oberta de Cataluña (UOC), Barcelona, España, donde actualmente imparte, Teoría de Antenas y Diseño y Aplicaciones de Antenas. Desde 2020 tiene la posición de Directora de Ingeniería en Ignion.

Es miembro del IEEE (sección de Antennas and Propagation).

Es autora de más de 55 patentes en el campo de las antenas y 24 más pendientes. Ha publicado más de 80 artículos en revistas científicas, internacionales y conferencias nacionales. Ha dirigido más de 28 proyectos fin de carrera. Es editora de la Revista Internacional de Antenas y Propagación (IJAP). Ha publicado dos libros en el campo de antenas y electromagnetismo aplicado. Su tesis doctoral (Ground Plane Booster Antenna Technology for Wireless Handheld Devices) recibió el premio a la mejor tesis en fundamentos tecnológicos otorgado por el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT). Más tarde, en 2016 recibió el premio a la mejor tesis doctoral en el ámbito de la Ingeniería TIC (Tecnología de la Información y Comunicaciones) por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España.

La doctora Andújar ha participado en más de 6 proyectos nacionales e internacionales (como el Horizon H2020 de la comisión Europea) con una financiación superior a los 2 millones de € algunos de ellos como investigadora principal.