

## Las ondas de radio: un recurso que se agota

Luis Felipe Rodríguez Jorge<sup>1</sup>

Hoy hablaré de un recurso que es intangible. Es muy distinto a los combustibles, al agua, el aire, recursos que podemos tomar en nuestras manos, detectar con nuestros sentidos. Me refiero al espectro de radio, un recurso que utilizamos a la hora de transmitir y recibir señales a través del espacio, algo que se ha hecho muy útil, casi indispensable. Un ejemplo es la telefonía celular; ahora todos andamos con el celular activo durante el día. Además, recibimos señales de radio y televisión, programas de noticias, películas, generalmente involucrando ondas de radio.

Comenzaré resumiendo la historia de cómo llegamos a esta situación y, también de los problemas que la demanda del espectro de radio comienza a producir, debido a que somos tan numerosos y tenemos tantos usos distintos para este recurso. Como todos sabemos, la vista del ojo humano es probablemente nuestro sentido más poderoso. Desde épocas inmemoriales la hemos usado para estudiar el cielo, la naturaleza y nuestros alrededores. Sin embargo, la gente desde hace mucho tiempo había observado que, si hacía pasar un rayo de luz solar por un cristal con forma de prisma, esa luz se dividía en los colores del arcoíris que van del rojo al violeta. Para el ojo humano es todo lo que hay, son los colores del arcoíris y no somos capaces de percibir algo por debajo del rojo o por encima del ultravioleta. Esta es una ilusión equivocada, pues es una limitación del ojo humano. En realidad, se puede detectar energía que está por afuera de estos colores si contamos con los detectores apropiados.

Un astrónomo muy reconocido, William Herschel, en 1800 descubrió que había radiación más allá del color rojo. Lo que él hizo fue pasar la luz del Sol por un prisma para que se

---

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía de la UNAM.

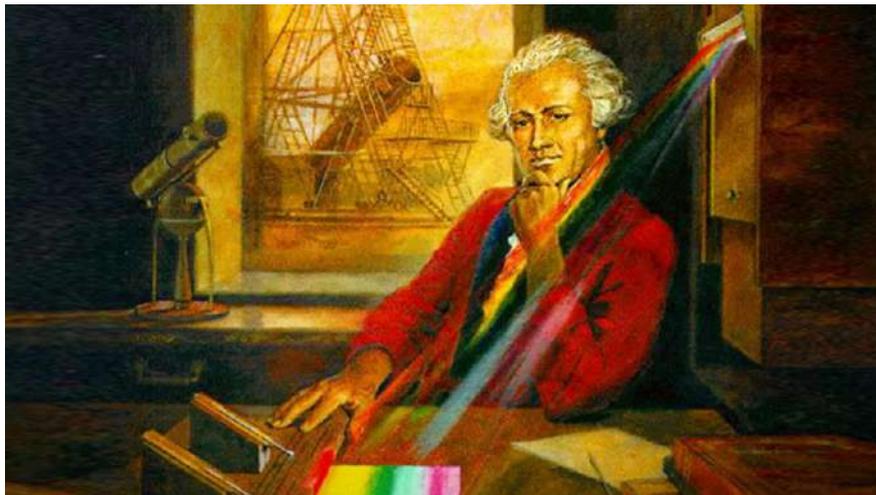
El Colegio Nacional.

El presente documento es versión íntegra de la ponencia presentada por Luis Felipe Rodríguez Jorge el jueves 22 de octubre de 2020, en el marco del 5º. Encuentro Libertad por el Saber “¿Cuál desarrollo para un planeta sustentable?”, coordinado por Julia Carabias, llevado a cabo del 18 al 24 de octubre de 2020 en El Colegio Nacional.

El formato, contenido, expresiones y planteamientos expresados en ella son a título personal y responsabilidad del autor, al igual que los materiales referidos dentro de la ponencia.

En caso de querer reproducir total o parcialmente este documento, le solicitamos contactarnos a través del siguiente correo contacto@colnal.mx.

dividiera en los colores del arcoíris. Pero tuvo la inteligencia de poner un termómetro ya no en el color rojo, sino más allá de este color y notó que, aunque con su vista no detectaba que llegaba algo, el termómetro se calentaba. Es decir, había energía que el ojo no captaba pero que sí afectaba al termómetro (ver Figura 1). A esta radiación la llamamos ahora infrarroja. Además de esto, William Herschel descubrió el planeta Urano, construyó grandes telescopios y fue un compositor sinfónico de altos vuelos. Pero en esa época estaba muy reñida la competencia en la música y quizá pensó que era mejor dedicarse a la astronomía.



**Figura 1.** Cuadro que representa el descubrimiento de la radiación infrarroja por Herschel. La luz del Sol se descompone en un pequeño arcoíris con un prisma. El termómetro se calienta aún colocado antes del color rojo, indicando la existencia de la radiación infrarroja, invisible al ojo humano.

**Fuente:** Ken Hodges. El sofistablogspot.

Al año siguiente, en 1801, el destacado físico Wilhelm Ritter descubrió que la radiación más allá del color violeta oscurecía al papel impregnado con cloruro de plata. Es decir que, de nuevo, en una región del espectro en que nosotros no vemos luz, hay energía que puede afectar a las placas de cloruro de plata. A esta radiación se le conoce como ultravioleta. Todo esto lo unificó un gran físico escocés de mediados del siglo XIX, James Clerk Maxwell. Él se dio cuenta de que la luz era solo una parte de un fenómeno mucho más amplio: la radiación electromagnética. Además de los colores del arcoíris, no solamente había el infrarrojo y el ultravioleta, sino que existían otras ondas como predecía su teoría del electromagnetismo. Todas estas formas de energía comparten la característica de viajar a la velocidad de la luz y estar formadas por ondas con una frecuencia característica. La frecuencia es el número de pulsos que nos llegan por segundo. La persona que podemos considerar como el “padre” de las

ondas de radio, fue el físico alemán Heinrich Hertz. En 1886, bastantes años después de que Maxwell había publicado su teoría, Hertz realizó un experimento en el que tenía un transmisor muy primitivo que producía chispas eléctricas. Estas chispas producían radiación electromagnética que él detectaba con un detector también muy primitivo: un aro que aún se le conoce en su honor como el *aro de Hertz*. Ahí se producía una chispa de menor fuerza, pero qué estaba correlacionada con la transmisión de la energía (ver Figura 2).



**Figura 2.** En esta estampilla postal de la República de San Marino se conmemora el descubrimiento de las ondas de radio por Hertz. Al lado derecho está Hertz, al centro el aro de Hertz, que se usa para detectar las ondas de radio y del lado izquierdo el transmisor de chispa.

**Fuente:** Heinrich Rudolph Hertz. Afinidad eléctrica. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Italia.

En honor de Hertz, los que somos lo suficientemente viejos, recordamos que en las transmisiones de las radiodifusoras se hablaba de las ondas Hertzianas. En la actualidad este término ya no es tan usado, pero continuamos utilizando en su honor la unidad de frecuencia, el ciclo por segundo, al que se le conoce como el Hertz. Las estaciones de radio se identifican dando la frecuencia a la que transmiten en kilohertz (miles de Hertz) o bien en megahertz (millones de Hertz). Por ejemplo, Radio UNAM FM transmite a 96.1 Megahertz.

Una anécdota interesante que nos dice que tenemos que creer en la ciencia, porque va a producir resultados económicos a futuro, es la que cuenta que cuando Hertz hizo el experimento en una de sus clases un estudiante le preguntó: “Maestro Hertz, ¿esto tendrá utilidad comercial algún día?”. Y Hertz le respondió: “No, esto es nada más para demostrar que el maestro

Maxwell estaba en lo correcto”. En esto, Hertz se equivocó totalmente, ya veremos la cantidad de dinero que está involucrada en las ciencias de las telecomunicaciones. Una estampilla del correo mexicano (figura 3), conmemora el nacimiento de las ondas electromagnéticas.



**Figura 3.** Estampilla postal de México que recuerda a Hertz (izquierda) ya Maxwell (derecha).

**Fuente:** Heinrich Hertz (1857-1894). Físico alemán, con el físico escocés James Clerk Maxwell, Talleres de Impresión de Estampillas y Valores, México, 1967.

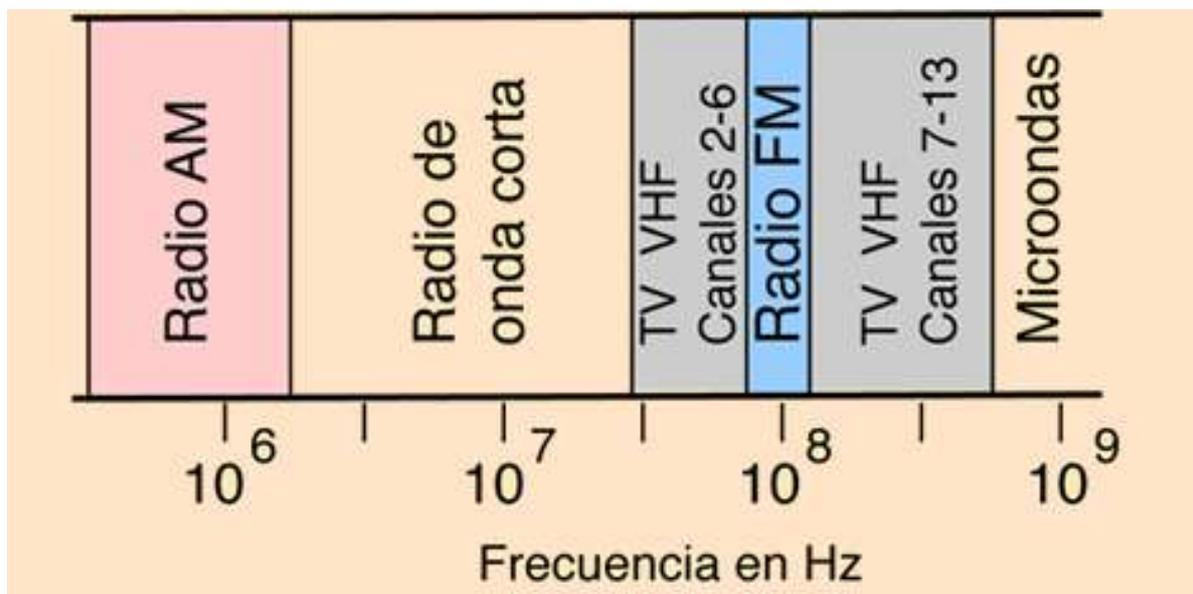
La ventana de radio la podemos pensar como una región en la que podemos sintonizar nuestro receptor. Recordarán ustedes que los radios tienen un sintonizador con el cual uno se va moviendo a lo largo de la frecuencia y capta distintas estaciones. La ventana de radio es muy amplia, va de frecuencias que tienen desde 3 kHz —o sea, 3000 ciclos por segundo—, hasta 300 GHz —el GHz es 1,000,000,000 de ciclos por segundo—, es decir, un factor de 100,000,000 de la frecuencia más baja a la más alta. Parecería que hay mucho espacio para meter estaciones y darle a todo mundo su pedacito del espectro de radio, pero esto no es cierto como veremos más adelante. Comparativamente, la ventana óptica ocurre a frecuencias muchísimo más altas, a frecuencias que son del orden de cientos de THz —donde un THz es un billón de ciclos—. Los extremos del intervalo, 405 y 790 THz, corresponden a los colores rojo y azul, respectivamente.

Actualmente sabemos que el espectro electromagnético se extiende desde los rayos x hasta las ondas de radio, pasando por el visible. Lo podemos pensar como un piano infinito, en donde en el centro está la radiación visible. Pero, si el piano se extendiera hacia ambos lados, llegaría un momento en el que ya no escucharemos el sonido de las teclas muy altas y, por el

otro lado, el sonido de las teclas muy bajas. Así ocurre con la vista, pues los sentidos humanos están especializados y funcionan nada más para un cierto rango de valores. En particular, el oído humano es sensitivo sólo a frecuencias que van de 20 a 20,000 Hz.

La gran revolución comercial relacionada con las ondas de radio vino desde épocas de Marconi, hacia fines del siglo XIX y principios del XX. Los investigadores se dieron cuenta de que esta energía podría utilizarse para llevar información entre dos puntos separados espacialmente de manera prácticamente instantánea. O sea, vieron que la onda original electromagnética podría ser modulada, esto es, se le podría sumar otra contribución con información, ya sea señales Morse, audio y video. Esa onda modulada sería capaz de viajar a la velocidad de la luz, llegaría a un receptor en donde volveríamos a separar las dos ondas y veríamos la señal que llevaba la información. Así podemos mandar voz, datos, imágenes y esta es la gran explosión de las telecomunicaciones.

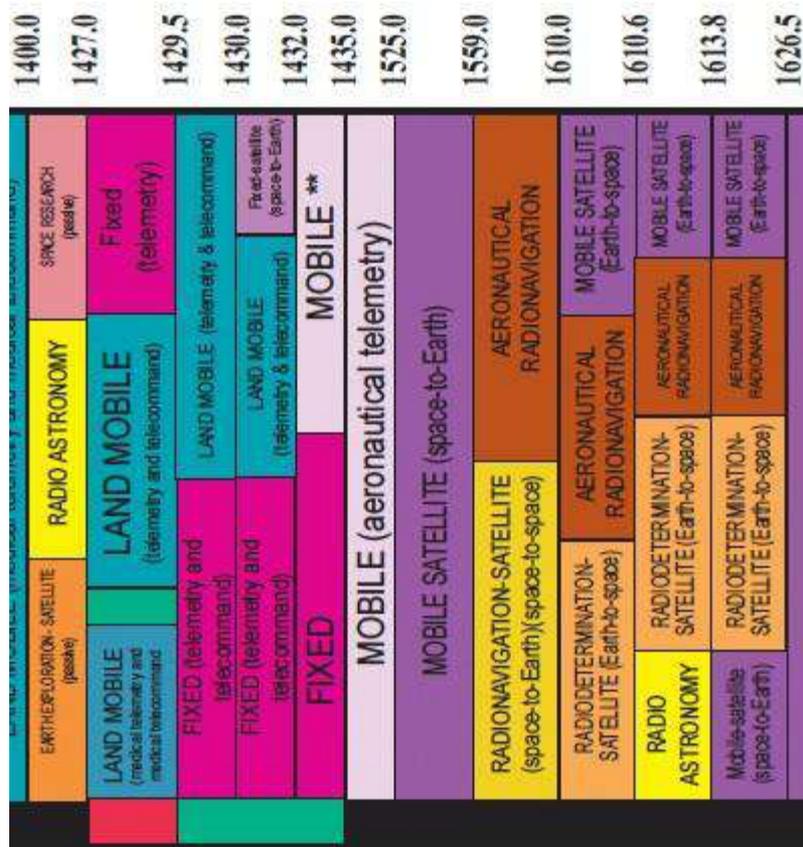
Resulta que, para usar el espectro de radio, cada transmisor necesita tener asignada una frecuencia y un ancho de banda —una *rebanada* del espectro de radio—. Si no las señales se traslaparían y habría confusión. Por ejemplo, decíamos que Radio UNAM FM tiene una frecuencia central de 96.1 MHz. Pero también tiene un ancho de banda que va de 96.0 a 96.2 MHz, o sea 200 kHz. En la Ciudad de México nadie puede usar ese ancho de banda porque lo tiene ya la UNAM. Si alguien más transmite ahí, se confundirían las dos señales. El ancho de banda es un tema muy importante, y la gente habla mucho de eso porque a mayor ancho de banda más información podremos transmitir por unidad de tiempo. Por eso estamos todos desesperados porque en nuestras casas nos instalen internet con más ancho de banda, para poder transmitir imágenes y documentos, recibir señales de televisión, descargar películas, etc. Los anchos de banda que se asignan son distintos para distintos usos. En la radio AM, la famosa modulación por amplitud —que era la que escuchábamos las personas como yo cuando éramos niños— se usa un ancho de banda muy pequeño. A cada estación se le da 10 kHz, mientras que en la radio FM se les da un ancho 20 veces mas grande: 200 kHz. Por esta razón, entre otras, en la radio FM se oye mejor la música que en la AM. La televisión naturalmente requiere todavía más ancho, 4,000 kHz, porque transmite imágenes además del sonido. Aquí empezamos a ver un poquito la idea del espectro (Figura 4) que es un recurso que tiene que repartirse entre muchos usuarios. Vemos cómo del lado izquierdo está la radio AM, a muy bajas frecuencias, luego se encuentra una parte que usan los radioaficionados y posteriormente aparece la radio FM y la televisión en sus pedazos asignados del espectro.



**Figura 4.** Parte de baja frecuencia del espectro de radio donde se ven las asignaciones a la radio AM, a los radioaficionados (radio de onda corta), a la radio FM y a los canales clásicos de televisión. A más altas frecuencias aparece la región de microondas.

**Fuente:** Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-IPN, Zacatenco, México.

Esta repartición del espectro electromagnético es mucho más complicada, así que no se asusten con la figura 5, en la que se muestra la asignación de frecuencias de una pequeña parte del espectro de radio que tienen en Estados Unidos (en México tenemos algo muy similar). Cada una de esas franjas que vemos ocupa un intervalo de frecuencias. Cada color codifica un uso en las telecomunicaciones, y se aplican para un montón de cosas. Nosotros estamos familiarizados con la telefonía celular, sobre todo ahora que está de moda; pero hay ondas de radio, televisión. En la figura 5 vemos los distintos servicios como la radio, televisión, celular y satélites.



**Figura 5.** Asignación de frecuencias en un pequeño intervalo del espectro de radio para los EUA. La frecuencia en Megahertz aparece en la parte superior. Cada usuario tiene asignado un color, Las asignaciones para la radioastronomía aparecen en amarillo.

Fuente: United States Department of Commerce, EUA.

Todos los satélites que están flotando en el espacio son muy importantes usuarios porque están mandando sus señales de manera inalámbrica, usando ondas de radio. También tenemos servicios móviles: un barco y un avión tienen que usar todos estos servicios. La radioastronomía, que es lo que yo practico, también utiliza las ondas de radio. Afortunadamente, somos usuarios pasivos. Generalmente no transmitimos, únicamente captamos ondas que vienen del espacio y las interpretamos. Estamos representados por el color amarillo. Entonces, cuando nos fijamos en la figura 5 vemos que aquí hay un pedacito que le asignan a la radioastronomía, cerca de los 1420 MHz. ¿Por qué en ese rango? Porque ahí hay una línea muy importante que emite el hidrógeno. Hay otra línea a 1612 MHz, de la molécula de hidroxilo (OH).

En todo el espectro ya no hay espacios vacíos. Está todo ocupado, por lo que hay una competencia muy grande. Por esto, se organizan reuniones internacionales cada tres años en donde se discute si se puede dar un poco más de ventana a los radioastrónomos o a otros

solicitantes. A su vez, las compañías telefónicas también exigen más ancho de banda para atender más teléfonos celulares y, claro, hay que desplazar a unos para darles a los otros. Verán ustedes que, por ejemplo, la radioastronomía que está en amarillo comparte el servicio con otros usuarios. Afortunadamente todos son pasivos, nadie transmite, lo que nos permite captar señales del Universo (inclusive del Universo muy remoto).

¿Qué soluciones hay para este problema de la saturación del espectro electromagnético? La más obvia es la fibra óptica, la cual es una cosa maravillosa. La fibra óptica transmite cantidades de ancho de banda muchísimo más grandes que el espectro de radio, pero requiere que como usuario estés fijo. Si estoy en la calle caminando, en un avión o si estoy en un satélite tengo que usar las ondas de radio, no hay salida. Hay que tratar de usar la fibra óptica cuando sea posible. Ahora, por comodidad en las casas, ya no usamos el teléfono fijo, todo lo hacemos con el celular. La verdad es que tendríamos que aceptar la disciplina de que todas las cosas que se puedan, hay que hacerlas de manera estacionaria con fibra óptica y cables, porque estas son señales que no contaminan a la atmósfera y que no compiten con las señales de radio.

Para finalizar, daré dos últimos comentarios. Ustedes se preguntarán, ¿por qué si se pueden transmitir señales no usamos otras ventanas del espectro electromagnético?, ya que, conforme nos vamos a frecuencias más altas, hay más espacio y hay más ancho de banda. Lo que pasa es que el radio es lo ideal por varias razones. Para empezar, producir ondas de radio es barato, ya que casi no tienen energía. En cambio, producir ondas visibles o ultravioletas requiere más energía. Otra ventaja que tienen las ondas de radio es que penetran las paredes, y podemos estar en el interior de un cuarto usando perfectamente el teléfono celular. Otra cosa importante, que ya mencionó la Dra. Lizano, es que los satélites, que se supone deberían de transmitir a ciertas frecuencias muy restringidas, nunca son perfectos y su señal se *desparrama*, contaminando frecuencias cercanas a las que no deberían invadir.

Para terminar, veremos que Hertz se equivocó pues la ciencia de radio es un gran negocio. Les muestro en la Figura 6 las compañías de telecomunicaciones con más ingresos, que tienen de manera muy importante servicios de telefonía celular. En primer lugar, está la famosa AT&T estadounidense, con ingresos anuales de 175 mil millones de dólares.

Interesantemente, el cuarto lugar ya no lo ocupa un país desarrollado (de “*primer mundo*”), sino que lo ocupa China. En el 5o lugar está la compañía alemana Deutsche Telekom AG con 90 mil millones de dólares; en el 8o la Telefónica SA (española) que está presente en México, y en 10 la compañía mexicana de Carlos Slim América Móvil con ingresos anuales de 50 mil millones de dólares. Entonces, finalizo diciendo al Conacyt y a los gobiernos: inviertan en las ciencias. Tardará un poco de tiempo, pero esto producirá muchísimo dinero a la larga.

| Compañía                     | Ingresos |
|------------------------------|----------|
| AT&T Inc.                    | 175      |
| Verizon Communications Inc.  | 130      |
| Nippon Telegraph & Telephone | 110      |
| China Mobile Ltd.            | 108      |
| Deutsche Telekom AG          | 90       |
| SoftBank Group Corp.         | 57       |
| China Telecom Corp Ltd.      | 54       |
| Telefonica SA                | 51       |
| Vodafone Group PLC           | 50       |
| America Movil SAB de CV      | 50       |

**Figura 6.** Ingresos anuales para 2019 de las diez compañías más grandes en telecomunicaciones, en miles de millones de dólares

**Fuente:** Luis Felipe Rodríguez Jorge.