

CAPÍTULO 4

La luz que revolucionó la era digital: el láser y la fibra óptica

4.1	El nacimiento de la Fotónica: la invención del láser	85
4.2	Einstein y los fundamentos del láser	87
4.3	Breve historia de la invención del láser	92
4.4	Funcionamiento del láser	94
4.5	Evolución del láser	95
4.6	La fibra óptica: la luz que viaja a través del vidrio	100
4.7	Internet y telefonía móvil: ¡la clave es la fibra!	105
4.8	La invención del láser y la fibra óptica: conclusiones	111

El presente capítulo está dedicado a dos inventos fundamentales que, casi sin ser conscientes, condicionan nuestra vida actual en gran medida: el **láser** y la **fibra óptica**. Sirva como ejemplo el hecho de que **Internet**, la gran revolución en las comunicaciones de finales del siglo XX, es básicamente luz (generada por láseres) que viaja alrededor del mundo por fibra óptica.

El láser, su invención, fundamentos y aplicaciones será el tema central de la primera parte de este capítulo para, posteriormente, hablar brevemente de la fibra óptica como elemento clave en las comunicaciones ópticas.

4.1. El nacimiento de la Fotónica: la invención del láser

Con la invención del láser a finales de los años 1950s nace una nueva rama de conocimiento, la fotónica, que surge como rama de la óptica y se puede definir como la disciplina de conocimiento dedicada al ámbito en el que se solapan la óptica y la electrónica.

Importante 4.1: El rayo de la muerte

Cuando el láser es inventado alrededor de 1960, los medios de comunicación (con un evidente afán sensacionalista) lo bautizan como “**el rayo de la muerte**”. El cine enseguida se hace eco de este artilugio que da mucho juego en películas de acción como la de la imagen. ¿Reconocéis la película en la [Figura 1](#)? Se trata de “Goldfinger”, de la saga de James Bond.



Figura 1. Fotograma de la película Goldfinger, de la saga de James Bond. Fuente: Tor.com <https://www.tor.com/2014/09/17/james-bond-goldfinger-science-fiction/>

¿**Cuándo surge el concepto del láser?** Es difícil saberlo con exactitud. Desde el punto de vista de la idea de un “rayo de luz”, con capacidad de transportar energía y por lo tanto ser usado como arma, tenemos el ejemplo de la novela “**La Guerra de los Mundos**” de H.G. Wells, donde no aparece sólo la idea (anticipada) del láser, sino también de otros conceptos, como relata **Miguel Uceda**¹ en su estudio:

"La guerra de los mundos" no fue la primera vez que se abordó en literatura la existencia de seres extraterrestres, pero sí desde un nuevo punto de vista, pues anteriormente el tema era tratado por los escritores de la arrogante era industrial como encuentros con otras civilizaciones más primitivas. Pues para muchos era impensable otra tecnología más avanzada que la disponible por la sociedad finisecular, así por ejemplo el director de la oficina de patentes de Nueva York solicitó en 1899 la clausura del servicio que dirigía, aduciendo la sencilla razón de que ya estaba inventado todo lo que podía inventarse".

Evidentemente esta no era la opinión de una persona de la imaginación de Wells, no solo para idear premoniciones como las vertidas en esta novela -como las naves espaciales, el rayo láser, la guerra química o la organización de ayuda internacional ante desastres en gran escala-, sino que utiliza la fantasía para plasmar su concepción del colonialismo.

¹<https://pendientedemigracion.ucm.es/info/especulo/numero8/wells.htm>

4.2. Einstein y los fundamentos del láser

La base teórica para el desarrollo del láser la aportó Einstein en su famoso artículo “Sobre la teoría cuántica de la radiación”¹, explicando el fenómeno conocido como **emisión estimulada** que veremos a continuación.

Importante 4.2: LASER

Láser es, por cierto, el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission Radiation* (luz amplificada por emisión estimulada de radiación.)

4.2.1. Emisión espontánea de luz

La luz “normal” que apreciamos habitualmente, por ejemplo la luz del Sol, se produce mediante lo que se conoce como **emisión espontánea**.

La emisión espontánea se produce cuando un átomo pierde energía. En realidad son los electrones del átomo los que pierden esa energía. Recordemos que un átomo está formado por un núcleo (protones, neutrones) y uno o varios electrones que pueden ocupar diferentes “órbitas” alrededor del núcleo. Si un electrón que está en una órbita más alejada del núcleo “salta” a una órbita inferior (ver [Figura 2](#)), ese electrón ha perdido energía en el proceso². Como sabemos que la energía no puede “desaparecer” por arte de magia, sino que se transforma, esa energía que pierde el electrón se tiene que convertir o usar en otro proceso. Lo que ocurre es que se convierte en un **fotón**; esto es, en luz.

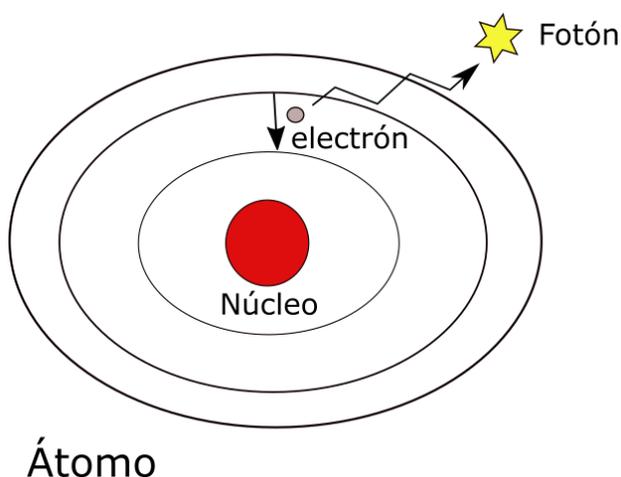


Figura 2. Representación esquemática del proceso de emisión espontánea de luz. Fuente: elaboración propia.

En la [Figura 2](#) se puede ver la representación típica de un átomo con su núcleo (rojo, en el centro) y los electrones. Éstos pueden ocupar diferentes niveles u orbitales. Un electrón perderá energía cuando “caiga” de un nivel superior a uno inferior.

¹El título original del artículo era *Zur Quantentheorie der Strahlung*.

²Tendrá menor energía cuando más cerca del núcleo esté.

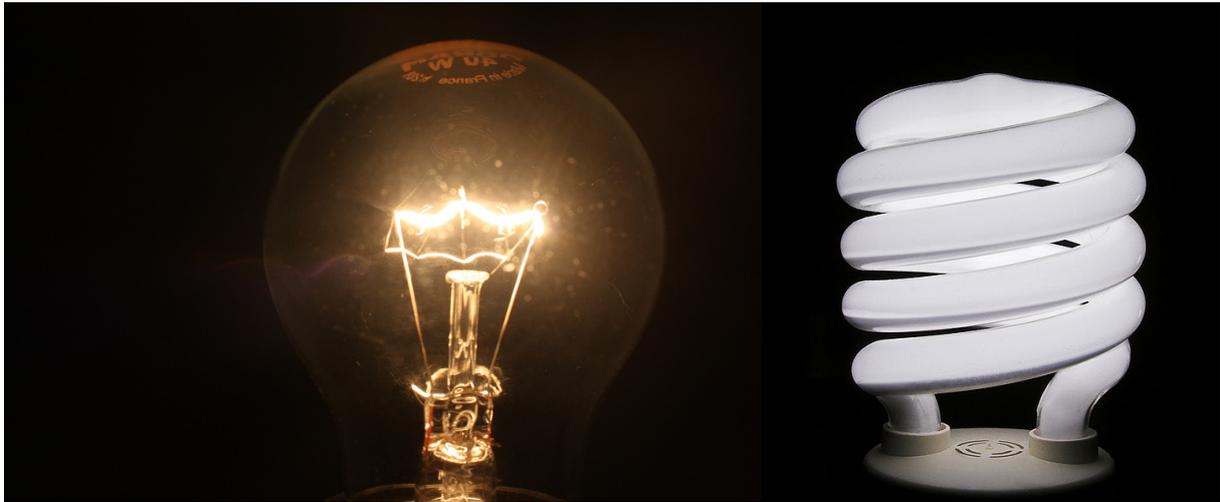


Figura 3. Ejemplos de fuentes de luz incandescente (izquierda) y luminiscente (derecha). Fuente: Pixabay (CC0 Creative Commons) y Wikimedia (CC-BY-SA 3.0).

Importante 4.3: Color y λ

El color (longitud de onda λ) del fotón que se emitirá en esa emisión espontánea dependerá precisamente de la energía de ese salto entre niveles “electrónicos”.

Esto nos lleva a diferentes formas de generar la luz por radiación espontánea. Tenemos el ejemplo de la clásica **incandescencia**, donde la energía necesaria para provocar que los electrones suban de nivel y luego puedan generar la radiación es aportada con calor, dependiendo la radiación sólo de la temperatura alcanzada. Por otro lado tenemos la **luminiscencia**, donde la energía se puede aportar con luz, reacciones químicas, electricidad. Un ejemplo del primer tipo de radiación lo constituyen las clásicas bombillas de filamento, mientras que en el segundo caso se tiene por ejemplo las lámparas de tipo fluorescente (ver [Figura 3](#)).

Cuestión 4.1: Lámpara fluorescente

Busca información sobre cómo se genera la luz en un tubo fluorescente. ¿Se genera luz UV en algún momento? ¿Es peligroso que se rompa un tubo fluorescente en casa? ¿Por qué? ¿Se podría adaptar la luz generada por el fluorescente a diferentes usos, por ejemplo para un invernadero?

4.2.2. Absorción

Al igual que acabamos de comentar que los átomos pueden emitir luz si un electrón pierde energía, de la misma forma puede darse el fenómeno opuesto: **Un átomo puede absorber un fotón que choque con él.** ¿Qué ocurre con la energía de ese fotón? Pues de manera inversa que en la emisión, esa energía servirá para que un electrón pase de una órbita o nivel inferior a una superior, como se ha representado en la [Figura 4](#).

Importante 4.4: Absorción de luz (I)

Como sabemos, el negro es un color que absorbe toda la radiación incidente. Sin embargo es curioso que, dependiendo del tipo de luz que empleemos, la forma de comportarse de los materiales puede cambiar. En la [Figura 5](#) se presenta una imagen de un hombre con una bolsa de plástico negro en su mano, representada con luz “visible” (izquierda) e infrarroja (derecha). Mientras que la bolsa negra es completamente opaca a la radiación visible (absorbe toda la luz en ese rango de longitudes de onda), ésta deja pasar la luz infrarroja.

De hecho, podemos apreciar como con las gafas ocurre lo contrario, siendo transparentes en el visible, pero opacas en el infrarrojo.

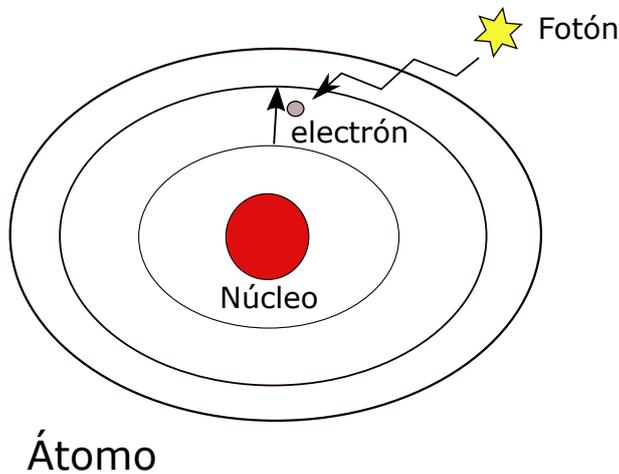


Figura 4. Representación esquemática de absorción de luz. Fuente: elaboración propia.

Importante 4.5: Absorción de luz (II)

El siguiente vídeo muestra el material que más luz absorbe del mundo: curioso ¿no?
<http://cmn.it/2oEk7o4>



Figura 5. Imagen de una persona con una bolsa de plástico negro en el visible y el infrarrojo. Fuente: NASA/Caltech.

4.2.3. Emisión estimulada de luz

Conocidos los procesos de emisión espontánea y absorción, Albert Einstein pensó (allá por 1916) en una tercera posibilidad que, en realidad, nadie había visto nunca: la **emisión estimulada**.

En la emisión estimulada, el fotón que llega a chocar con el átomo no es absorbido, sino que provoca la emisión de otro fotón con características **absolutamente idénticas** al original. Este hecho es **CLAVE** para entender el concepto de emisión estimulada y lo que hace que la luz láser tenga unas características tan especiales y diferentes a la luz “normal”:

¡Todos los fotones que emite un láser son idénticos!

Einstein hizo un cálculo de probabilidades y determinó que, a temperatura ambiente ocurre: ¡1 vez por cada 10000000000000000000 emisiones espontáneas! Es un proceso que, por lo tanto, no ocurre de manera **espontánea** en la naturaleza, sino que hay que **estimular**.

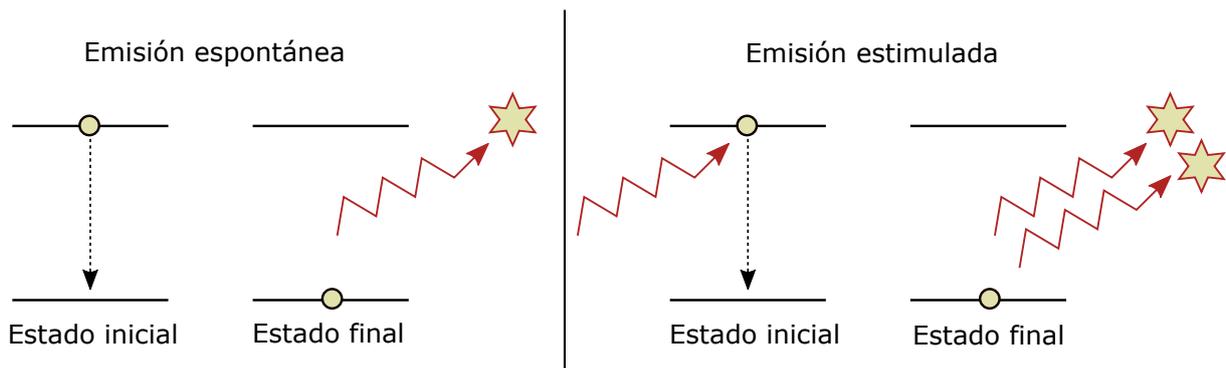


Figura 6. Representación esquemática de los procesos de emisión espontánea y estimulada. Fuente: Elaboración propia.

La principal diferencia por lo tanto entre ambos procesos reside en que en la emisión espontánea la transición del electrón de un estado superior a uno inferior ocurre aleatoriamente, mientras que en la emisión estimulada esa transición es estimulada por un fotón con la misma energía que la transición. El fotón resultante tendrá la misma fase y frecuencia que el original. Este último punto es fundamental y dará lugar a las **características únicas de la luz láser**.

La luz láser, al estar generada por emisión estimulada y ser todos los fotones “idénticos”, tiene unas características muy especiales. Mientras que la luz “convencional”, por ejemplo la generada mediante incandescencia, está compuesta por muchos colores o longitudes de onda, la luz láser está formada por un único color, por una longitud de onda muy *estrecha*.

Por otro lado, la luz láser es **coherente**, lo que significa que **podemos predecir cómo se comportará la luz con la distancia y el tiempo**, algo que no ocurre con la luz convencional. Estas características derivan en el hecho de que la luz láser es **colimada** en una determinada dirección, esto es, forma un haz o punto de luz muy pequeño incluso a grandes distancias, mientras que una bombilla normal genera luz en muchas direcciones.

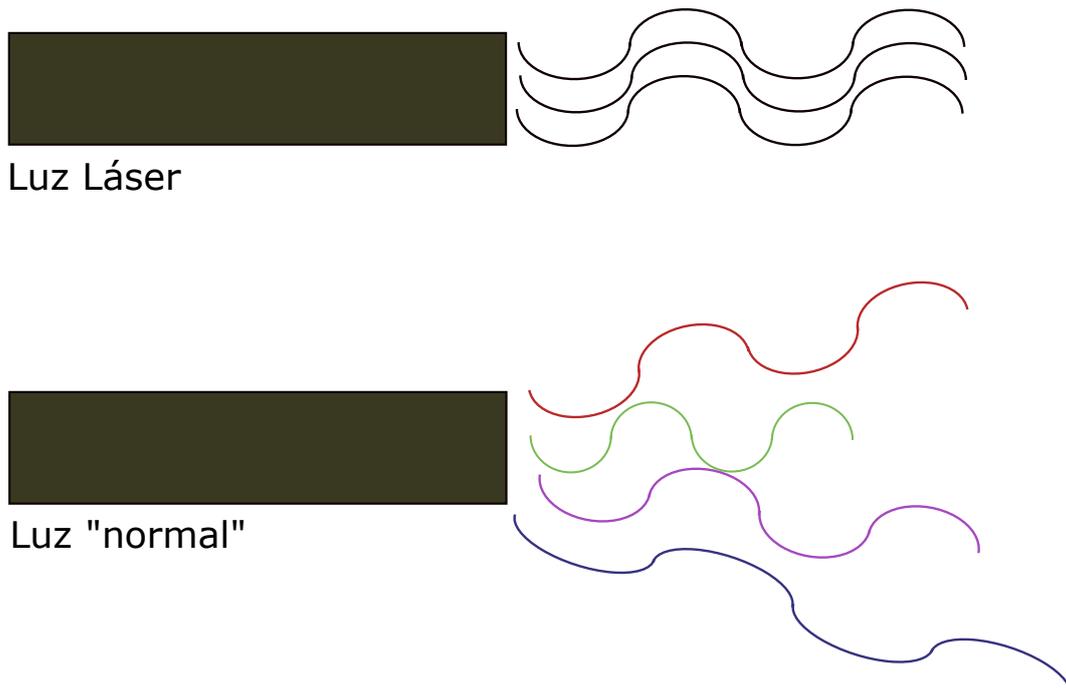


Figura 7. Luz láser vs. luz normal. Fuente: Elaboración propia.

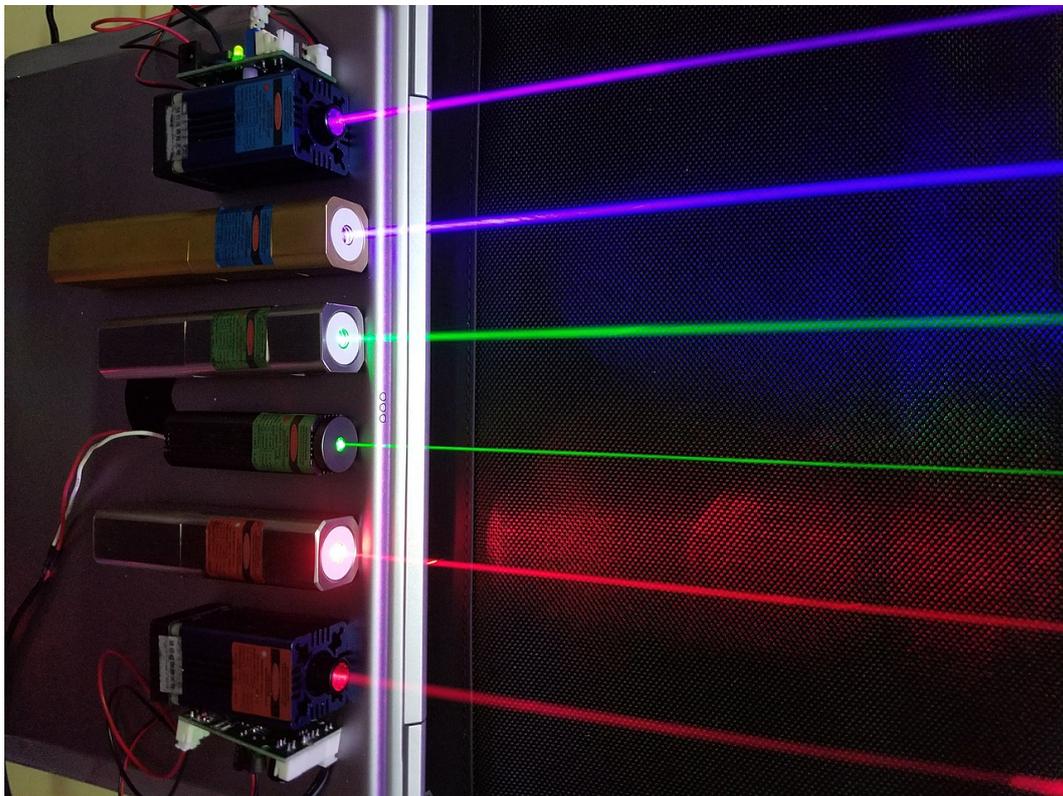


Figura 8. Láseres emitiendo a diferentes longitudes de onda. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY 2.5 <http://bit.ly/2yzM9uF>

4.3. Breve historia de la invención del láser

La historia de la **invención del láser** es apasionante, tanto por la relevancia del hecho, como por la lucha entre diferentes equipos de investigación y el reconocimiento posterior (y pleitos asociados) de esos trabajos.

Historia del láser



Figura 9. Equipos involucrados en la invención del láser a finales de la década de los 50. Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha comentado, Einstein sienta las bases teóricas para la invención del láser en 1916 con su idea de la emisión estimulada. En los años 50 varios equipos (Townes y Schawlow de los laboratorios Bell, Gould de la Columbia University y Prokhorov y Basov de la Unión Soviética (Lebedev Physics Institute) trabajan hacia la invención del láser por separado pero de manera aproximadamente simultánea. De hecho, llegan a existir contactos entre Gould y Townes, mientras que el diseño de los rusos Prokhorov y Basov y Gould es muy similar.

Sin embargo el reconocimiento se lo llevan fundamentalmente los laboratorios Bell (Townes) y Prokhorov y Basov¹, quedando Gould despreciado en este sentido. Precisamente Gould se embarcaría en un pleito contra Townes y la oficina de patentes estadounidense que, tras nada menos que 28 años, acabaría por concederle la razón con respecto a dos patentes relacionadas con el descubrimiento del láser. Irónicamente, Gould usaría los derechos de la finalmente concedida patente para pagar los costes de los pleitos, aunque su objetivo era conseguir el reconocimiento negado durante tantos años.

¹Estos 3 científicos recibirían el Premio Nobel de Física en 1964 por sus estudios sobre el láser.

Importante 4.6: Gould y el término LASER

El término LASER fue acuñado por Gould. En la [Figura 10](#) se presenta un extracto de las notas de Gould donde se recoge dicho término.

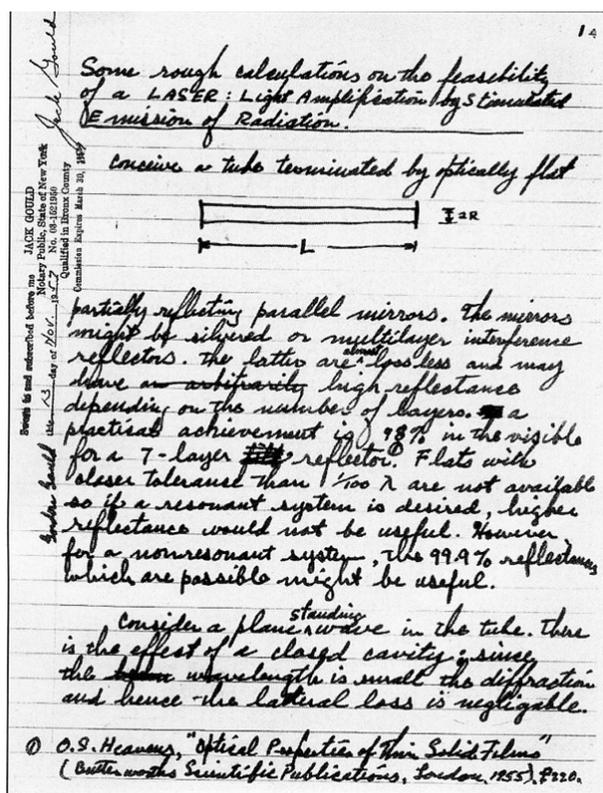


Figura 10. Extracto del cuaderno de notas de Gould donde aparece el término LASER. Fuente: Photonics.com.

Otra figura clave en la carrera por la invención del láser es **mytheodore Maiman** que, tras colaborar con Gould, **en 1960 demuestra experimentalmente por primera vez un láser** basado en un rubí rosa y una lámpara de flash. Curiosamente la revista Physical Review Letters rechazó en un primer momento publicar los resultados que, tras una segunda rueda de prensa, se publicarían en la prestigiosa Nature. El hecho de que sus resultados se publicaran con algún retraso dio tiempo a la puesta en marcha de otros desarrollos paralelos. Por este motivo, Townes y Arthur Leonard Schawlow también son considerados inventores del láser, el cual patentaron en 1960. Dos años después, Robert Hall inventa el láser generado por semiconductor. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos y, al año siguiente Gordon Gould patenta otras muchas aplicaciones prácticas para el láser.

El gran mérito de Maiman fue demostrar la relativa sencillez con que podían construirse los láseres, abriendo así las puertas a su aplicación en multitud de aplicaciones.

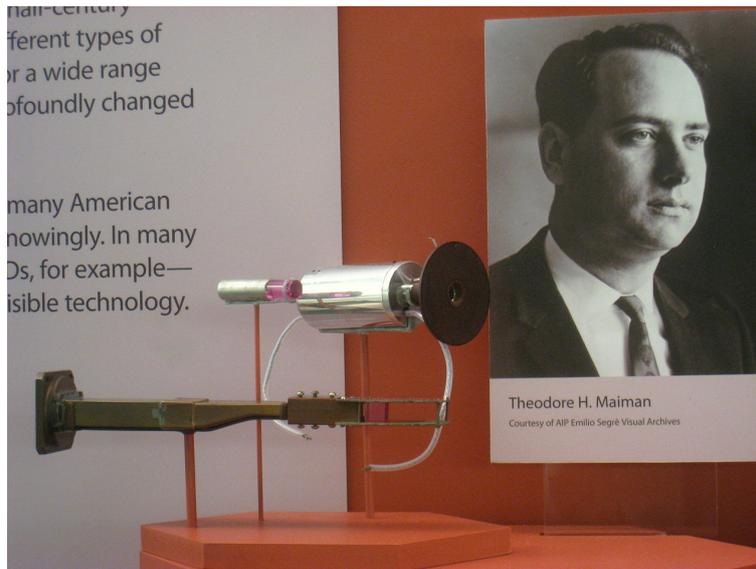


Figura 11. Imagen de Maiman y el primer láser demostrado el 16 de mayo de 1960 expuestos en el Museo Nacional de Historia Americana en Washington. Licencia: Dominio Público.

4.4. Funcionamiento del láser

El funcionamiento básico de un láser es sencillo y se basa en la denominada “cavidad resonante” (1 en la Figura 12), que básicamente es un medio con los átomos del elemento que queremos usar (y que determinará la longitud de onda (color) de la luz emitida) limitado por sendos espejos (3 y 4) que harán rebotar los fotones múltiples veces antes de salir y generar la luz deseada. Para poder provocar la emisión estimulada, lo primero que hay que hacer es aportar energía (2) a los átomos que están en 1 (denominado también medio activo) para que sus electrones suban de nivel y después puedan emitir los fotones necesarios.

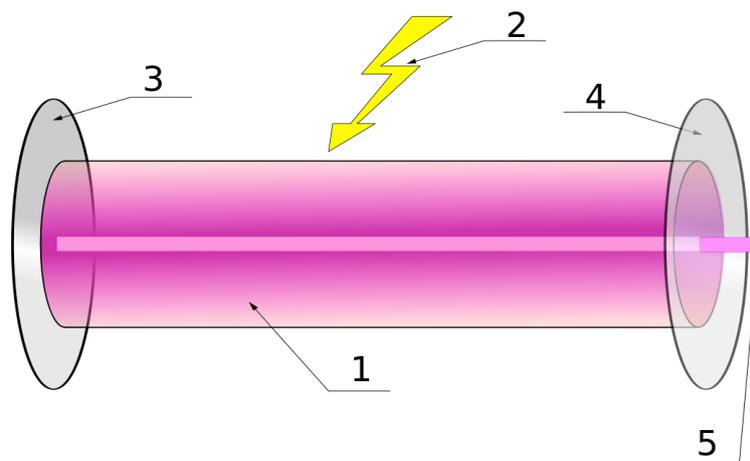


Figura 12. Esquema del funcionamiento de una fuente de luz láser. Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hLvyce>

Importante 4.7: Funcionamiento Láser

En YouTube hay muchos vídeos que muestran el funcionamiento básico de un láser. En el siguiente enlace tienes un ejemplo: <https://youtu.be/vgbBPaoR3bw>

Importante 4.8: El profesor Martín Pereda

Si tienes curiosidad por conocer los comienzos del láser y la fotónica en España, es muy recomendable la lectura de esta entrevista al profesor Martín Pereda: <http://bit.ly/2lZxrqE>.

4.5. Evolución del láser

Tras su invención, el láser fue definido como:

“Una solución en busca de un problema”

Efectivamente, el láser surge como consecuencia de los estudios teóricos de Einstein pero, en sus inicios, no estaba muy claro para qué podía ser utilizado. Con el paso de los años el láser se extenderá a multitud de aplicaciones en una gran variedad de campos de aplicación: medicina, entornos industriales, electrónica de consumo, etc.

Una vez inventado, surgirá una carrera por mejorar sus prestaciones, en concreto conseguir láseres más potentes, pequeños, que emitan en una mayor variedad de colores, más rápidos, etc. Veamos algunas de estas mejoras en detalle:

4.5.1. ¡Más pequeño!

¿Cuál es el tamaño mínimo de un láser? En la [Figura 13](#) se presenta un ejemplo llamativo, donde se ha implantado un láser en la cabeza de una hormiga. Pero lo más llamativo en este sentido es que hay investigadores que ya han conseguido hacer láseres con ¡¡nuestras propias células!!¹

La miniaturización del láser es posible gracias a la invención del denominado **láser semiconductor**, desarrollado alrededor de 1962 por varios grupos (General Electric, IBM, MIT), y que permitiría la conversión de electricidad directamente en luz láser, habilitando así por ejemplo la modulación de la luz (transmisión de la información por luz).

El **diodo láser**², dispositivo fundamental hoy en día en infinidad de dispositivos de la vida cotidiana (p.ej. lectores CD, DVD, etc.) y en las comunicaciones ópticas, tiene como punto de partida el trabajo de **Herbert Kroemer** a mediados de los años 50 sobre semiconductores y, particularmente sobre heterouniones. La primera demostración de emisión de luz coherente

¹Para más información puedes consultar el siguiente artículo en Nature (en inglés): <http://www.nature.com/news/2011/110612/full/news.2011.365.html>

²Otra manera de denominar al láser semiconductor.



Figura 13. Láser implantado en la cabeza de una mosca. Fuente:

Láser semiconductor

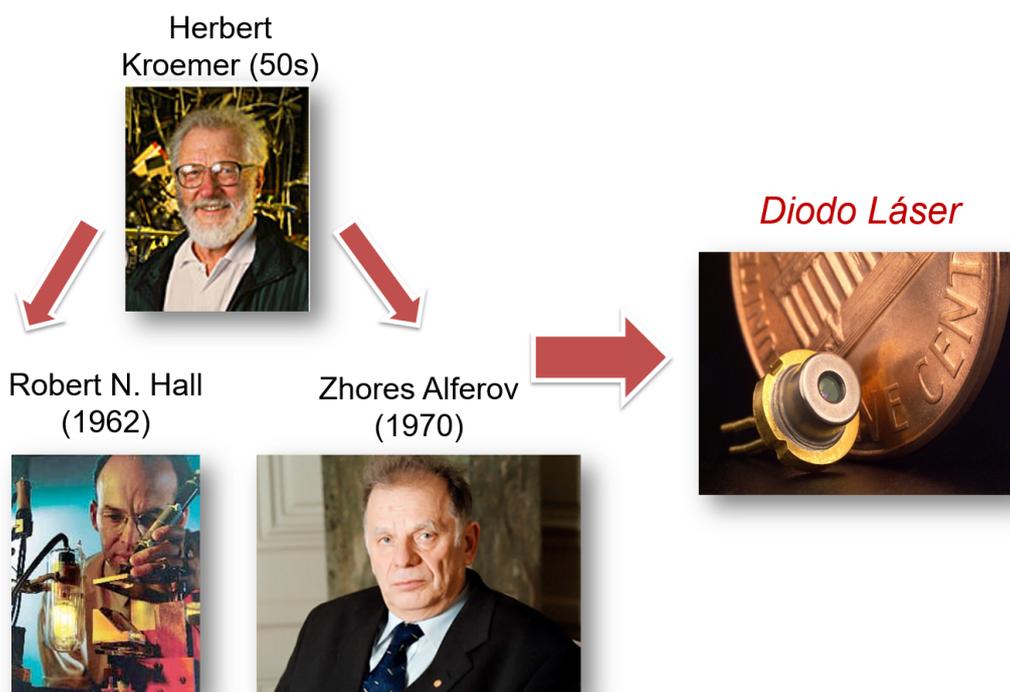


Figura 14. Científicos implicados en el desarrollo del diodo láser. Fuente: Elaboración propia.

por un diodo semiconductor (arseniuro de galio) tuvo lugar en 1962 por el científico **Robert N. Hall**, del centro de investigación de la General Electric. El primer diodo láser en conseguir emisión en modo continuo de operación fue propuesto en 1970 por **Zhores Alferov**.

Alferov y Kroemer compartieron el **Nobel de Física en el año 2000**.

¿A dónde nos lleva el láser semiconductor? Por ejemplo al desarrollo de los medios de soporte de información de las últimas décadas, como **el CD, el DVD y, más recientemente, el Blu-ray**. El aumento de capacidad de almacenamiento ha sido posible gracias a que, usando

cada vez láseres más sofisticados, ha sido posible disminuir el tamaño de la información que se graba en estos soportes.

En la **Figura 15** aparece el primer CD, que data de 1982. En la **Figura 16** se muestran los soportes de información **CD, DVD, HD DVD y Blu-ray** con la paulatina disminución del tamaño de la información grabada, de la mano del aumento en la “precisión” de los láseres empleados.

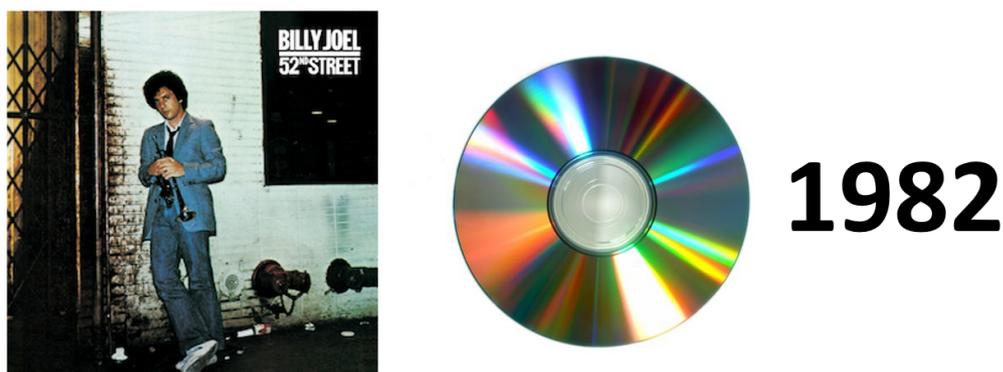


Figura 15. Primer CD (Compact Disc) lanzado en 1982. Fuente: Elaboración propia (ultimateclassicrock.com).

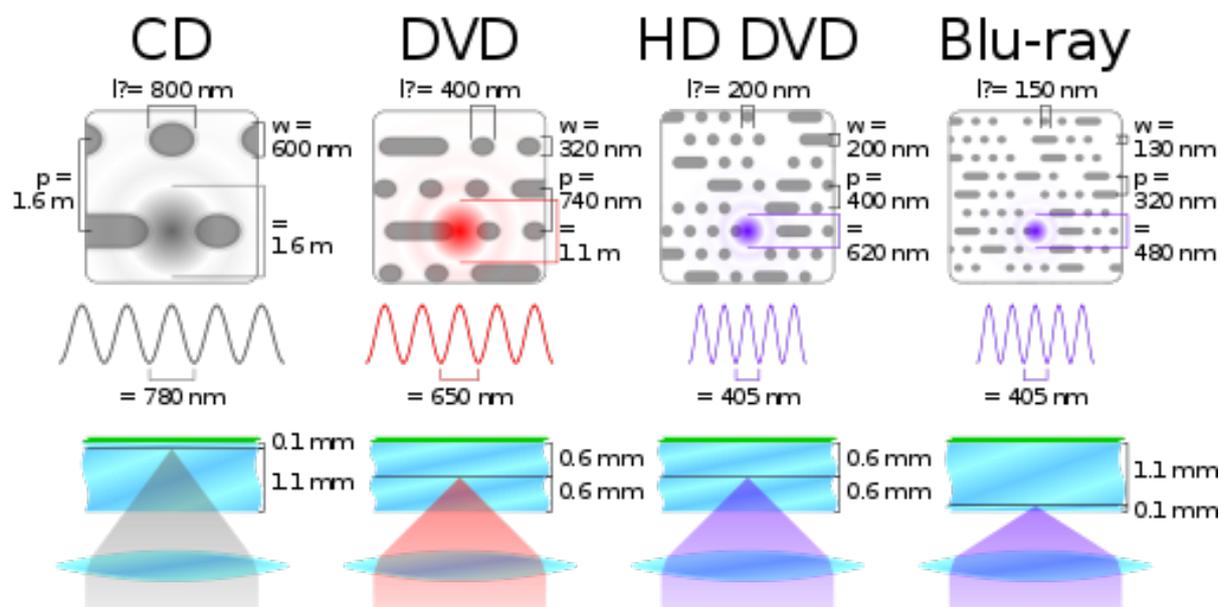


Figura 16. Comparativa entre los soportes de información CD, DVD, HD DVD y Blu-ray. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2zkFwf7>

4.5.2. ¡Más colores!

También ha sido muy importante el poder extender el rango de **colores o longitudes de onda** con los que se pueden fabricar láseres, para poder realizar diferentes aplicaciones.

Un ejemplo muy interesante es la muy reciente invención de los **láseres de rayos-X**, que entre otras ventajas permiten radiografías de elementos pequeños con gran resolución, como podemos ver a continuación.

Las diferencias de la generación de rayos-X mediante interacción láser-materia con respecto a las técnicas habituales (tubos de rayos-X o radiación sincrotrón) se basan fundamentalmente en disponer de una fuente puntual de radiación. El foco de la imagen que se obtiene es lo suficientemente pequeño (del orden de 200 micras) como para producir radiografías de una alta resolución. En la [Figura 17](#) se puede apreciar la radiografía realizada con este sistema a un abejorro carpintero europeo¹.



Figura 17. Radiografía realizada mediante un sistema láser a un abejorro. Fuente: desayunoconfotones.org.

Para poder realizar láseres de diferentes colores es muy importante el encontrar nuevos materiales. Se ha demostrado emisión láser en gases, líquidos, sólidos, plasmas, electrones libres ... pero: **¡no es tan fácil como parece!**

4.5.3. ¡Más rápido!

¿Por qué nos interesa hacer láseres más rápidos? Porque cuanto más rápido sea el láser, más cortos son los pulsos de luz que puede generar ... y mayor será la potencia asociada a dichos pulsos de luz. Tal y como se ha representado en la [Figura 18](#), un pulso de luz láser (de la misma energía) que dure 1 nanosegundo² tendrá mucha menos potencia que un pulso de femtosegundos³.

Al margen de la potencia, una de las ventajas fundamentales de los láseres que trabajan con duraciones de pulsos muy cortas, de femtosegundos, es que la interacción entre la luz

¹Fuente: <http://desayunoconfotones.org/2015/09/07/rayos-x-generados-laser/>

²1 nanosegundo = 0,000000001 segundos

³1 femtosegundo = 0,000000000000001 segundos

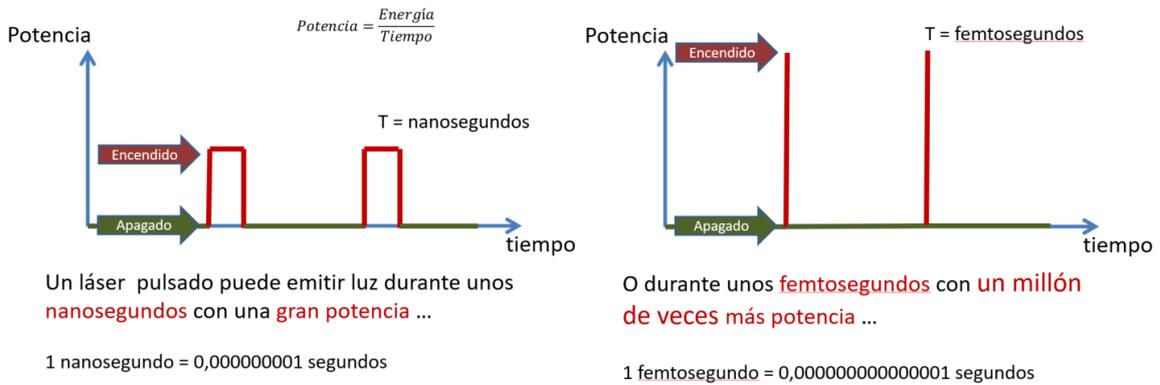
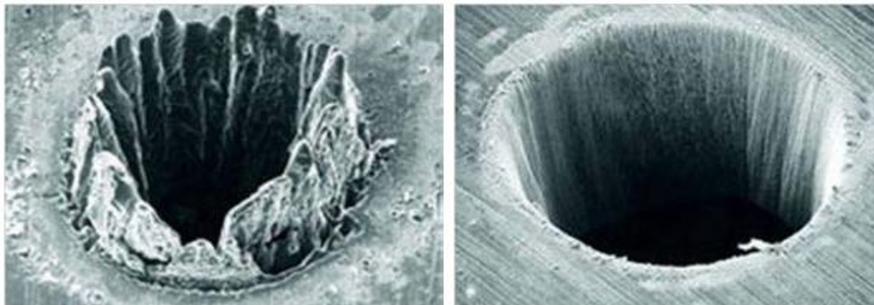


Figura 18. Emisión de pulsos con láseres nano o femto-segundo. Fuente: Elaboración propia.

y la materia ocurre tan rápido que no da tiempo a que se produzcan efectos de difusión térmica (transferencia de calor) a los tejidos circundantes. Esto es fundamental por ejemplo en la cirugía de cataratas, donde interesa dañar lo mínimo posible el tejido que rodea al punto donde el láser realizará el corte necesario. Este efecto se aprecia muy bien en la [Figura 19](#), donde se ha representado la diferencia entre mecanizar un material con un láser de nanosegundos (a la izquierda) o de femtosegundos (a la derecha).

Diferencia entre el micro-mecanizado por láser con pulso *ns* (izq.) y *fs* (der.).



*Crédito foto: Prof. Dr. Stefan Nolte
Cortesía: FSU Jena*

Figura 19. Diferencia entre el micro-mecanizado de un material con un láser de nanosegundos (a la izquierda) o de femtosegundos (a la derecha). Fuente: Prof. Stefan Nolte / FSU Jena <http://bit.ly/2hish7U>

4.6. La fibra óptica: la luz que viaja a través del vidrio

A todos nos resulta familiar hoy en día el concepto de **fibra óptica**, ya que muchos operadores llegan ya con sus fibras hasta nuestras casas para ofrecernos servicios como internet de alta velocidad. Ya se comentó anteriormente que internet, desde un punto de vista físico, puede entenderse como luz (láser) que viaja alrededor del mundo guiada por fibra óptica.

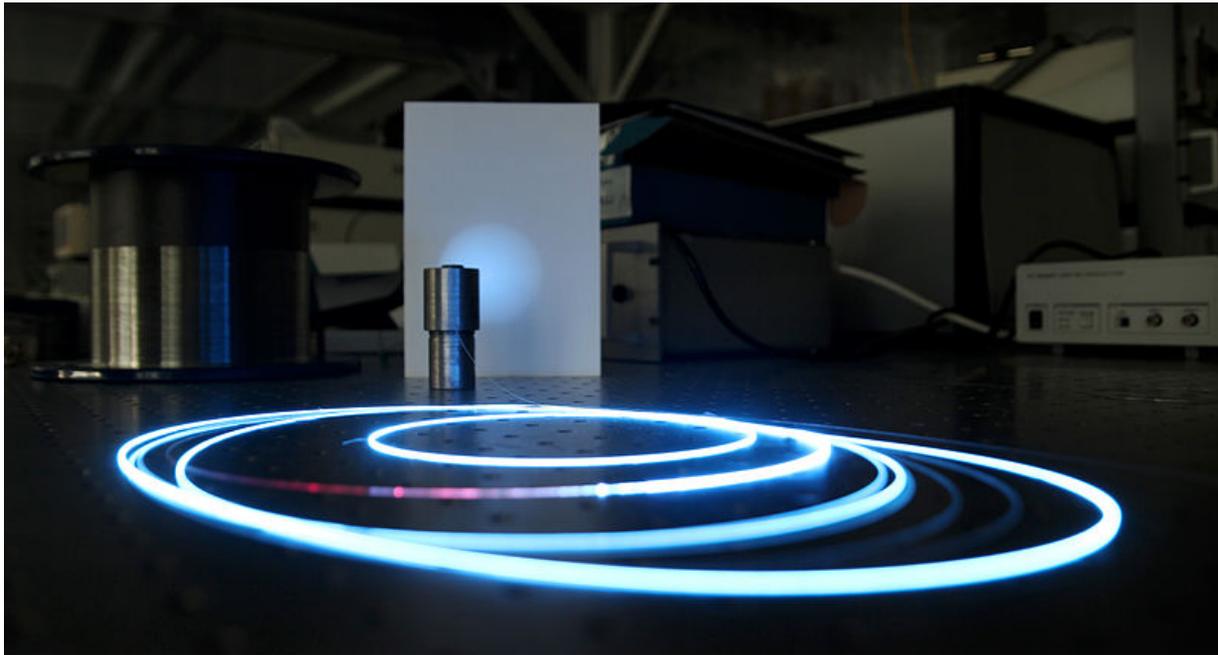


Figura 20. Fibra óptica en la que se ha inyectado luz infrarroja pero que emite luz azul debido al fenómeno de fluorescencia. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.0 <http://bit.ly/2hQ6JfT>

La fibra óptica es, por lo tanto, **un medio de transmisión que permite confinar y guiar la luz**. Si bien el concepto puede parecer moderno, los orígenes de la fibra óptica pueden remontarse a la década de 1840, cuando Daniel Colladon y Jacques Babinet demuestran la posibilidad de confinamiento de luz por refracción¹. En la [Figura 21](#) se muestra la “fuente de luz” descrita por Colladon en su artículo de 1842, en la que la luz es confinada en líquido.

Posteriormente, John Tyndall (1870) investigó la propagación de la luz en otros materiales (agua, cristal), descubriendo que se curvaba por la denominada **reflexión interna**. Siguiendo con esta resumida evolución de la fibra óptica, en 1956 el endoscopio médico es patentado por la Universidad de Michigan.

4.6.1. La reflexión interna total

El proceso físico que permite que la luz sea guiada por un tubo muy pequeño de vidrio² es la **reflexión interna total**. Para explicar este fenómeno es necesario recurrir a la **Ley de Snell**, ya vista en el primer capítulo, que explica los fenómenos de refracción y reflexión (en

¹Si no recuerdas bien el fenómeno de refracción, no dudes en revisarlo en el primer capítulo de este curso.

²Podría ser una definición informal de fibra óptica

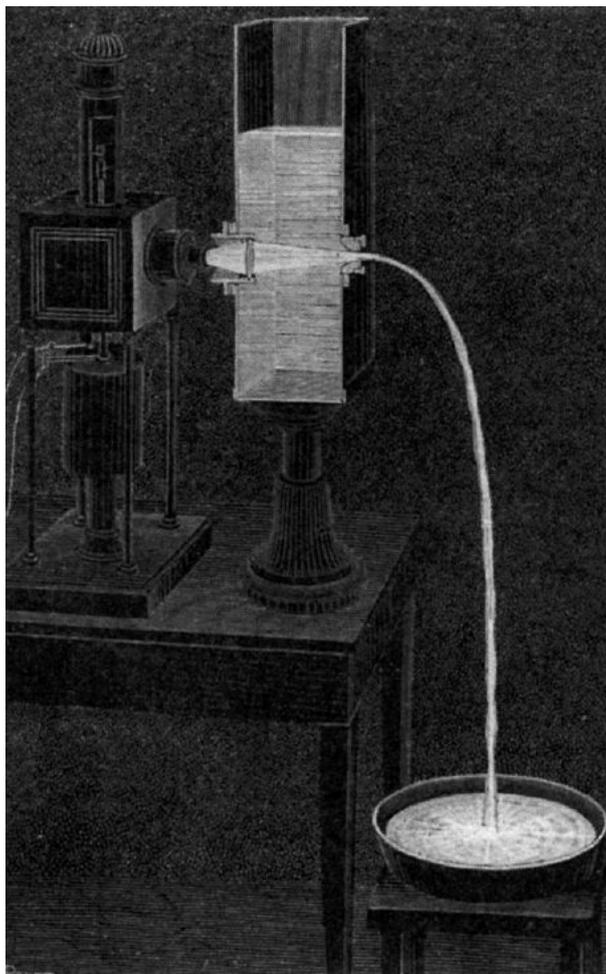


Figura 21. Fuente de luz descrita por Colladon en 1842, demostrando el principio de guiado de luz en una fibra óptica. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público. <http://bit.ly/2hbNxbu>

concreto permite determinar el ángulo refractado conociendo el ángulo de la luz incidente y los índices de refracción de los medios implicados).

Tal y como se ha representado en la [Figura 22](#), si el índice de refracción del medio 1 (n_1) es mayor que el asociado al medio 2 (n_2) (la densidad del medio 1 es mayor que la del 2), el ángulo del rayo refractado θ_r será mayor que el del rayo incidente θ_i . De hecho, puede darse la situación en la que $\theta_r = 90^\circ$. El ángulo del rayo incidente para el que $\theta_r = 90^\circ$ se denomina ángulo crítico θ_c . Para ángulos del rayo incidente mayores que θ_c , no existirá rayo refractado y toda la luz del rayo incidente será reflejada, dando lugar al fenómeno de reflexión interna total. Esta situación también se ha representado en la [Figura 23](#) para mayor claridad.

Importante 4.9: Reflexión interna total

En este vídeo puedes ver una demostración práctica del fenómeno de reflexión interna total: <https://youtu.be/AT3oa7ER9zE>

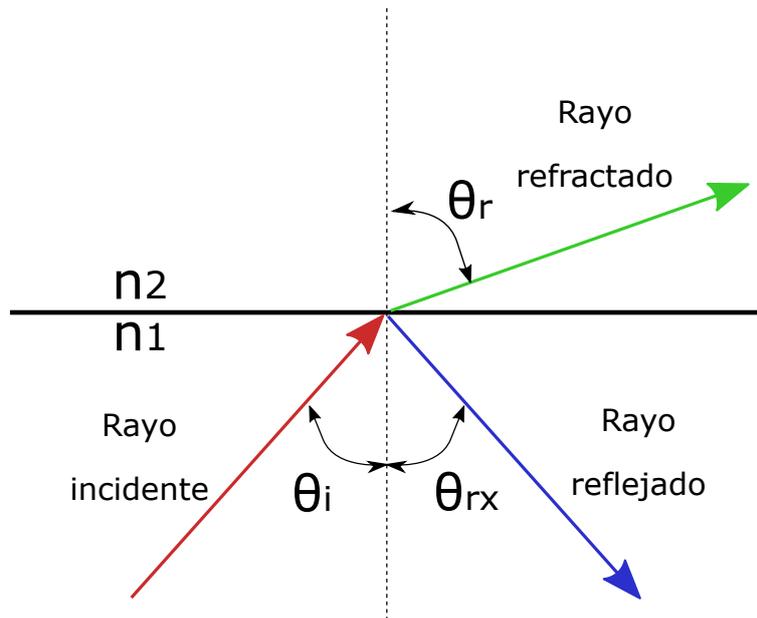


Figura 22. Representación de la Ley de Snell. Fuente: Elaboración propia.

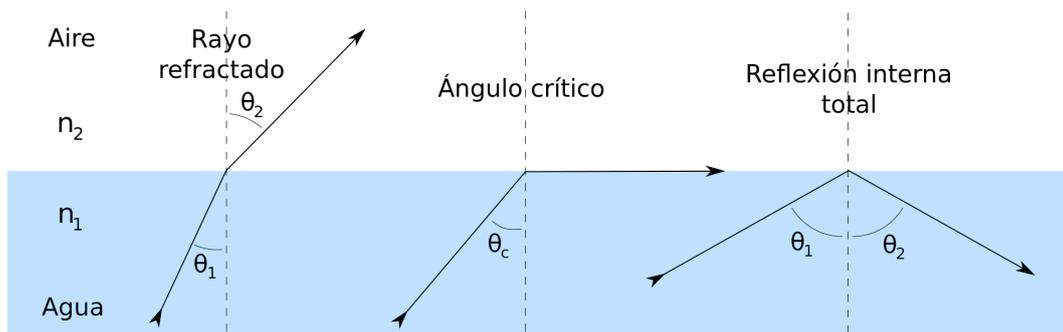


Figura 23. Fenómeno de reflexión interna total. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 4.0. <http://bit.ly/2zmgLg1>

4.6.2. Evolución hacia la fibra óptica

Si bien la reflexión interna total y sus posibilidades eran conocidas, el desarrollo de fibras ópticas viables para la transmisión de luz fue muy complicado en un primer momento. La fibra óptica está compuesta de vidrio (sílice) un material muy común en la tierra. Sin embargo, las primeras fibras ópticas tenían unas “pérdidas” muy altas: esto es, la mayor parte de la luz introducida por un extremo no era capaz de llegar al otro extremo tras unos pocos metros.

La persona clave en la mejora de las fibras ópticas es Charles K. Kao, que realiza su tesis doctoral en esta temática en la década de los 60 mejorando de manera sustancial los procesos de fabricación para disminuir las impurezas dentro del núcleo de la fibra, responsables de las grandes pérdidas ya comentadas¹.

En 1970 Maurer, Keck, Schultz y Zimar fabrican una fibra óptica con impurezas de titanio

¹En 1966 Kao y Hockham publican un artículo donde asocian las pérdidas de las FO a impurezas muy pequeñas intrínsecas al cristal.



Figura 24. Charles Kao en el año 2003. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hjW9kf>

en sílice: las pérdidas bajan de 100 a 17 dB por kilómetro¹. A finales de los 70 las pérdidas ya rondaban los 0.5 dB por kilómetro, y el 22 de abril de 1977 se produce la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica en California.

La relevancia de los trabajos de Kao en los años 60 fue tal que fue merecedor del Premio Nobel de Física en el año 2009.

4.6.3. Estructura de una fibra óptica

Una fibra óptica “estándar” (la que se usa normalmente para comunicaciones como internet) es una fibra compuesta por dos partes: un núcleo interno de unas 9 micras² de diámetro y una cubierta que lo rodea con un núcleo de 125 micras. Como ya se ha comentado, el núcleo está fabricado con sílice (SiO₂) al que se le añaden unos “dopantes” (boro, germanio, fósforo) para modificar el índice de refracción de tal manera que se pueda cumplir la condición de reflexión interna total; esto es, el índice de refracción del núcleo será ligeramente superior al de la cubierta.

Además, la fibra lleva también un recubrimiento exterior para protegerla, al margen de que en aplicaciones reales se les dotará de más elementos protectores, como fibras de kevlar, tubos plásticos, etc. En la [Figura 25](#) se ha representado (izquierda) la estructura básica de una fibra óptica, con el núcleo y la cubierta (revestimiento). En la parte derecha se muestra como se suele realizar el despliegue de fibra en comunicaciones, donde en realidad múltiples fibras (como se puede ver en el extremo derecho de la imagen) son guiadas por diferentes tubos alrededor de un elemento central (alma) que aporta rigidez y protección al conjunto.

¹Las pérdidas en fibra óptica se suelen expresar en dB o decibelios, unidad de medida comúnmente empleada en acústica: <https://es.wikipedia.org/wiki/Decibelio>

²1 micra = 0,000001 metros.

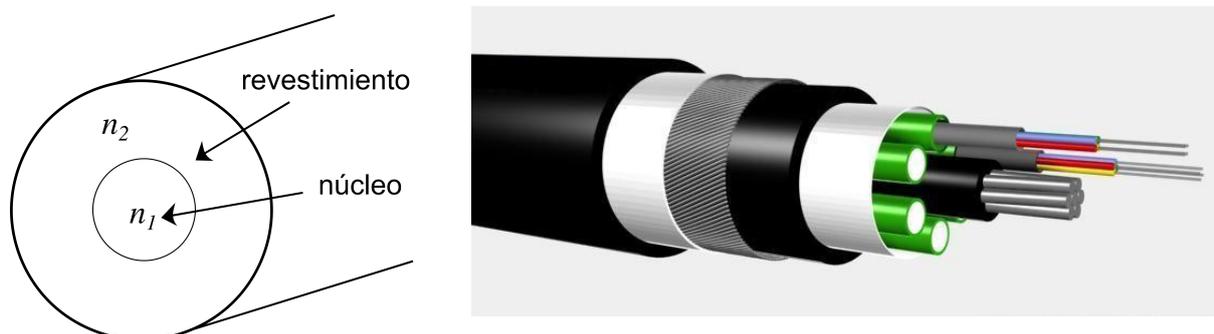


Figura 25. Estructura y detalle de una fibra óptica. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hk4DHP>

4.6.4. Comunicaciones por fibra óptica

La fibra óptica está presente en infinidad de emplazamientos a día de hoy: no sólo ya llega hasta nuestra casas con el concepto “fibra hasta el hogar”¹ sino que comunica continentes y se encuentra en tendidos eléctricos aéreos o soterrados o en las catenarias de las redes ferroviarias, por mencionar algunos ejemplos.

En la actualidad existen miles de kilómetros de fibra óptica desplegada tanto en tierra como en instalaciones submarinas. En la [Figura 26](#) se muestra, a modo de ejemplo, los enlaces submarinos dispuestos alrededor del continente africano.

Otro buen ejemplo lo constituye el enlace FLAG (Fiber-Optic Link Around the Globe / Enlace de fibra óptica alrededor del mundo), con 28000 kilómetros de fibra óptica que comunica el Reino Unido, Japón, India y muchos otros enclaves intermedios².

Importante 4.10: Fibra óptica submarina

En este vídeo puedes consultar cómo se realiza el despliegue de fibra óptica submarina, en este caso para Chile:

<https://youtu.be/4NzzYjsXzHY>

Cuestión 4.2: FTTH vs. ADSL

Como ya se ha comentado en este capítulo, la fibra óptica ha llegado hasta muchos de nuestros hogares de la mano de los operadores de internet, ofreciéndonos cada vez mayores velocidades de acceso.

Busca información sobre las velocidades que pueden ofrecerse con fibra óptica (FTTH) y la antigua ADSL (que usa el cable telefónico). Investiga también sobre las actuales cuotas de mercado de ambas tecnologías.

¹FTTH: *Fiber To The Home* en inglés.

²Más información en inglés: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-Optic_Link_Around_the_Globe.

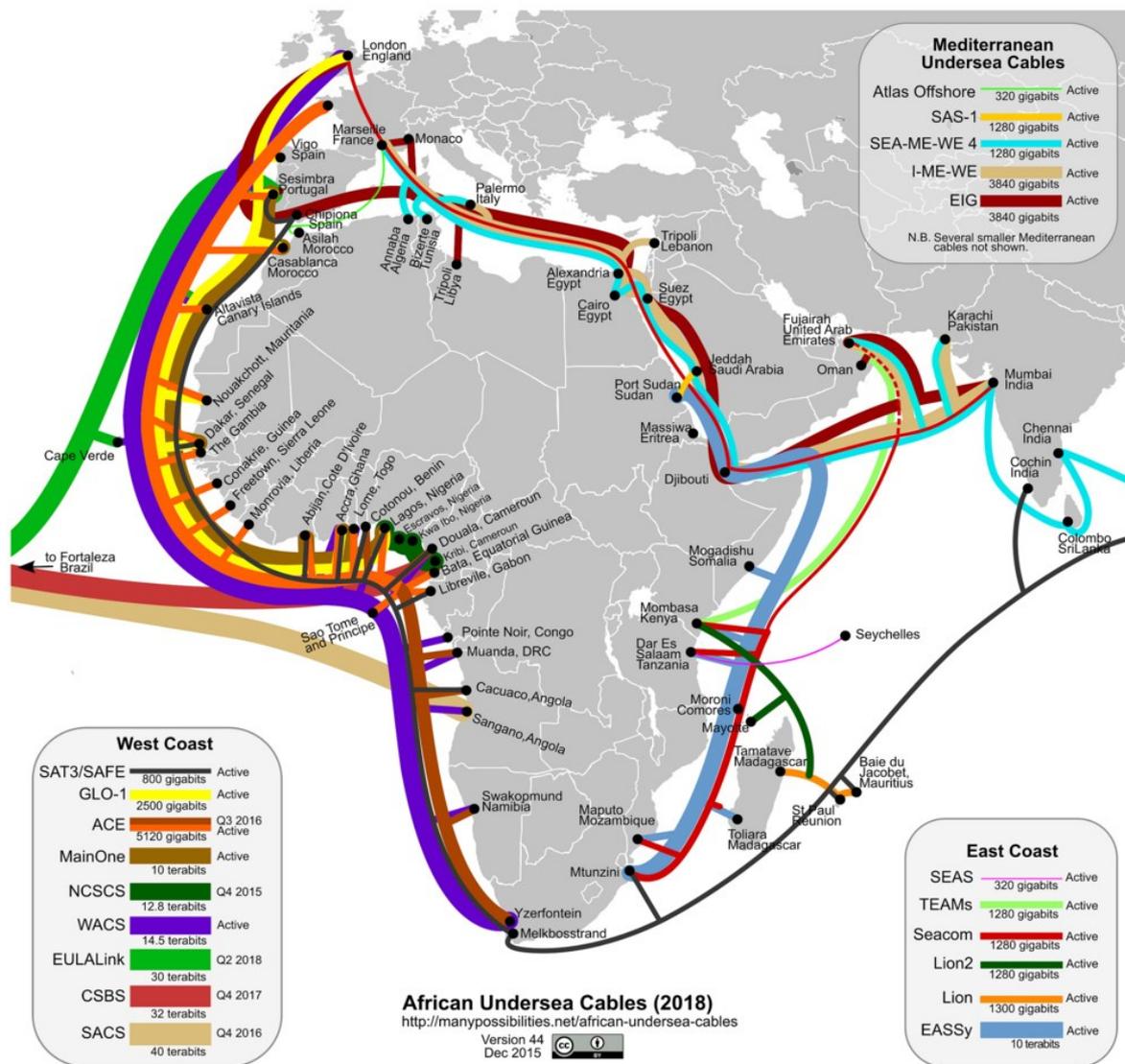


Figura 26. Mapa con los enlaces por fibra óptica (Existentes y previstos para 2018) alrededor de África. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY 2.0. <http://bit.ly/2zkRhCg>

4.7. Internet y telefonía móvil: ¡la clave es la fibra!

Vamos a aprovechar lo visto hasta ahora para explicar muy brevemente el funcionamiento de internet por medio de la transmisión de información codificada en pulsos de luz a través, por supuesto, de fibras ópticas.

¿Cómo funciona internet? Pensemos que estamos sentados en nuestro ordenador (aunque en realidad este ejemplo es perfectamente extrapolable a cualquier otra situación, como acceder a internet a través del móvil, de la televisión de casa, etc.?) y tecleamos la dirección de una página web, por ejemplo **www.google.com**. Pues bien, el ordenador, o el dispositivo correspondiente, se encarga de traducir esa u otra información (fotos, vídeos, etc.) a una secuencia de **unos y ceros**, o lo que es lo mismo, a una **señal digital**. Así, convirtiendo cada carácter de la dirección a su correspondiente código binario, obtendremos la secuencia

completa de unos y ceros correspondiente.

¿Cómo funciona internet?



Figura 27. Representación esquemática de la codificación de información de un ordenador en forma de pulsos de luz. Fuente: elaboración propia.

Pero, **¿cómo se transmiten esos unos y ceros por la fibra óptica?** Para ello utilizaremos un **láser**, que codificará esos unos y ceros en forma de pulsos de luz. El proceso es sencillo: si tiene que transmitirse un “1”, el láser enviará un pulso de luz que será inyectado en la fibra. Si, por el contrario, tiene que transmitirse un “0”, el láser permanecerá “apagado”¹. Este proceso se ha representado de manera esquemática en la [Figura 27](#).

Seguidamente, esos pulsos de luz son guiados por fibra óptica alrededor del mundo hacia su destino, cuya dirección va codificado también en forma de unos y ceros junto con el mensaje a transmitir. Ya sabemos cómo se guía la luz a través de la fibra óptica por medio de la reflexión interna total. Además, aunque la fibra óptica transmite la información en forma de luz de manera muy eficiente y presenta unas bajas pérdidas, es necesario utilizar **amplificadores ópticos**, que cumplen con una misión similar a la de los repetidores de televisión, para que la señal llegue en óptimas condiciones a su destino. Estos repetidores se sitúan cada aproximadamente **80 o 100 kilómetros** de fibra óptica.

Finalmente, esos pulsos de luz llegan a su destino, donde un foto-receptor se encargará de convertirlos de nuevo en unos y ceros que serán interpretados por el ordenador receptor.

¹En realidad el láser no se “apaga” al enviar un cero, sino que envía un pulso con una intensidad muy pequeña, lo que permite distinguirlo del nivel de luz asociado al uno.

¿Cómo funciona internet?



Figura 28. Representación esquemática de la conversión de pulsos de luz a unos y ceros en el ordenador receptor. Fuente: elaboración propia.

Importante 4.11: Señales digitales y analógicas

La diferencia entre las **comunicaciones con señales analógicas y digitales** y el efecto de problemas en su transmisión lo hemos vivido con la transición de la televisión analógica a la digital. Una señal analógica es una señal continua y puede tomar cualquier valor, mientras que una señal digital va a “saltos”, pudiendo tomar típicamente sólo dos valores: “0” y “1”. Las señales digitales presentan muchas ventajas en las comunicaciones, de ahí que se hayan ido imponiendo en los últimos años. Por ejemplo, pueden ser fácilmente amplificadas y reconstruidas, y además permiten incluir sistemas de detección y corrección de errores en la recepción, lo que las hace más fáciles de procesar y más eficientes. ¿Cómo sabemos si nuestra señal de televisión es analógica o digital? Hoy en día será difícil que recibamos señales de TV analógicas, pero una manera fácil de distinguirlas es fijarse en los posibles problemas o errores. Mientras que en la TV analógica aparecían diferentes errores, como una imagen “nebulosa” o que se desvanecía, en la TV digital estos problemas son menos frecuentes, y pueden aparecer por ejemplo en forma de cuadrados que aparecen en la imagen o saltos en el sonido.

<https://youtu.be/4NzzYjsXzHY>

Importante 4.12: Para saber más sobre cómo funciona internet

Si quieres saber algo más sobre el funcionamiento de internet, en particular sobre qué es realmente internet y sobre cómo se despliegan los miles de kilómetros de fibras ópticas submarinas que recorren el mundo, te recomiendo consultar estos dos vídeos que también puedes encontrar en el Aula Virtual de la asignatura:

Vídeo: ¿Qué es internet realmente? (11:51) - Enlace: <http://bit.ly/3a3aNN4>

Vídeo: ¿Cómo funciona internet? Los cables submarinos que conectan el mundo (7:28) - Enlace: <https://youtu.be/u1xxZ8r2rRc>

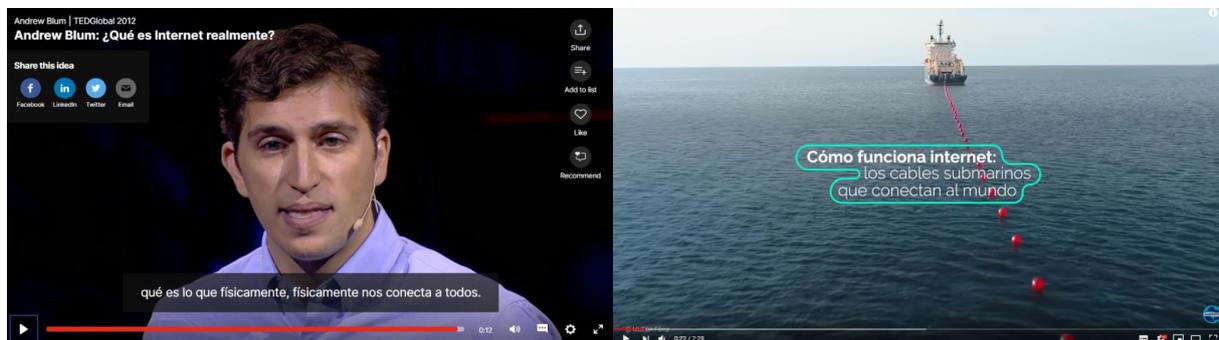


Figura 29. Fotogramas de los vídeos “¿Qué es internet realmente?” y “¿Cómo funciona internet?”. Licencia: YouTube Standard. Enlaces: <http://bit.ly/3a3aNN4> y <https://youtu.be/u1xxZ8r2rRc>

Y, para terminar este capítulo, vamos a tratar de responder a la siguiente pregunta: **¿tiene algo que ver la fibra óptica en las comunicaciones de nuestros teléfonos móviles?**. Como seguro que os imagináis, la respuesta es afirmativa.

En primer lugar, nuestro móvil se comunica con la **estación base** más cercana. Las estaciones base son esas antenas que son fácilmente reconocibles, tanto en entornos urbanos como rurales. En la [Figura 30](#) se muestra un ejemplo de dichas antenas. Estas estaciones base se reparten de tal manera que el área que cubren van formando hexágonos o celdas: si estamos dentro de una determinada celda, la antena correspondiente será la que nos dé cobertura.

Importante 4.13: Comunicaciones móviles: Tamaño de las celdas

¿Tienen todas las celdas de una red de telefonía móvil el mismo tamaño? La respuesta es NO. En entornos urbanos las celdas tienden a ser más pequeñas, dado que, por ejemplo, cada estación base tiene una limitación en el número de llamadas que puede atender simultáneamente. Sin embargo, en entornos rurales, al estar mucho menos densamente poblados, el tamaño puede ser mayor, siempre dentro del alcance de los terminales móviles.

Un tamaño típico de celda puede estar en los 26 km² (esto equivale a una distancia del centro a cada esquina de unos 3 kilómetros).

Cuestión 4.3: ¿Por qué hexágonos?

¿Por qué crees que la forma de las celdas es hexagonal? ¿Existirá alguna razón técnica para ello?

Trata de pensar en una posible respuesta y, si no das con ella, busca información en internet (y recuerda, internet es básicamente luz viajando por fibra óptica alrededor del mundo).

Cada estación base, o cada celda, utiliza unas frecuencias diferentes para comunicarse con nuestros móviles. Pero, ¿qué ocurre si estamos hablando por el móvil y cambiamos de celda? El sistema cambiará algunos parámetros de la comunicación, como esa frecuencia, lo que implica una interrupción de la misma que puede variar entre 100 milisegundos y 200 milisegundos. Dependiendo de la tecnología que utilice nuestro operador, lo normal es que este proceso (denominado *handover*) sea imperceptible para los usuarios. Pero, cuando realizamos una llamada ¿cómo sabe el sistema dónde se encuentra el otro teléfono móvil? Básicamente, la red móvil se encarga de localizar los teléfonos de manera continua, sabiendo en cada momento a qué estación base están vinculados. Así, cuando realizamos una llamada a un contacto, la red móvil la dirige hacia la celda en la que el móvil al que llamamos fue localizado por última vez.

¿Y el móvil?

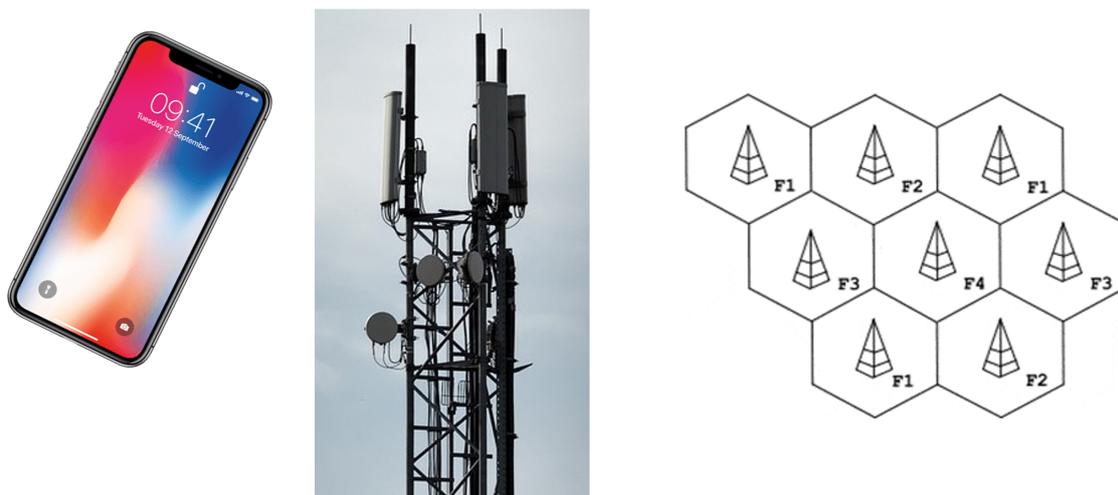


Figura 30. Funcionamiento de las comunicaciones móviles: estación base y conertura en forma de celdas. Licencia: elaboración propia.

Importante 4.14: Comunicaciones móviles: potencia y distancia a la estación base

Un aspecto curioso que quizás no conocieses: la energía que invierte tu móvil en comunicarse con la antena más cercana varía en función de la distancia a la que te encuentres de ésta. Lógicamente, a mayor distancia más potencia necesita el móvil para comunicarse. Esto tiene una repercusión directa en la duración de la batería: cuanto más lejos vives de una estación base, menor será la duración de tu batería ya que necesitará más energía para comunicarse con ella.

Pero, ¿dónde está la **fibra óptica**? Las estaciones base son gestionadas, por zonas, por un controlador de estaciones. Las comunicaciones entre cada estación base y su controlador se realiza por medio de radiofrecuencias por el aire. Sin embargo, las comunicaciones entre los diferentes nodos o controladores se realizan por fibra óptica. En realidad, estos nodos o controladores no se comunican entre sí, sino que envían la información a un centro de conmutación denominado MSC (*Mobile Switching Center*/Centro de Conmutación Móvil), que es el que se encarga de la gestión global del sistema (ver [Figura 31](#)).

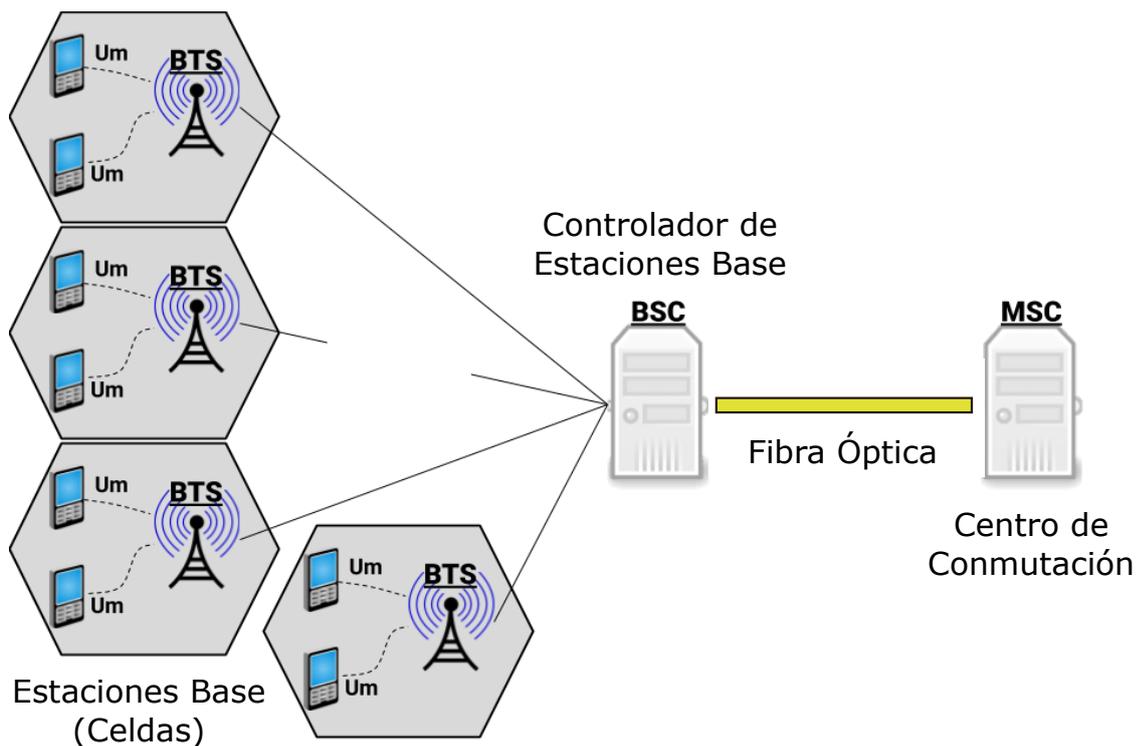


Figura 31. Funcionamiento de una red de comunicaciones móviles. Fuente: nickvsnetworking.com.

4.8. La invención del láser y la fibra óptica: conclusiones

En esta sección del curso se ha hecho un breve repaso por la fascinante historia de la invención del láser, un dispositivo cuya relevancia es indudable (como hemos visto hay varios Premios Nobel de Física asociados), a tenor de las innumerables aplicaciones en las que una fuente de luz láser es indispensable a día de hoy. Precisamente en el siguiente capítulo realizaremos una revisión de aplicaciones donde la luz en general y el láser en particular juegan un papel clave.

Además, hemos analizado brevemente los fundamentos en los que se basa otro elemento clave para nuestra sociedad actual: la fibra óptica. Como hemos visto, la fibra óptica es un elemento indispensable en nuestras vidas, siendo clave en sistemas de comunicaciones como internet o la telefonía móvil. En próximos capítulos veremos que la fibra óptica también puede usarse como elemento sensor para realizar medidas en ámbitos muy distintos, de la biomedicina al entorno industrial o la ingeniería civil.