

La importancia de la Luz en nuestras vidas¹

Un repaso por la apasionante historia y relevancia
actual de la Óptica y la Fotónica

Apuntes de la Asignatura

Jesús Mirapeix Serrano

Grupo de Ingeniería Fotónica
Universidad de Cantabria



¹Asignatura enmarcada en el Programa Sénior de la Universidad de Cantabria.

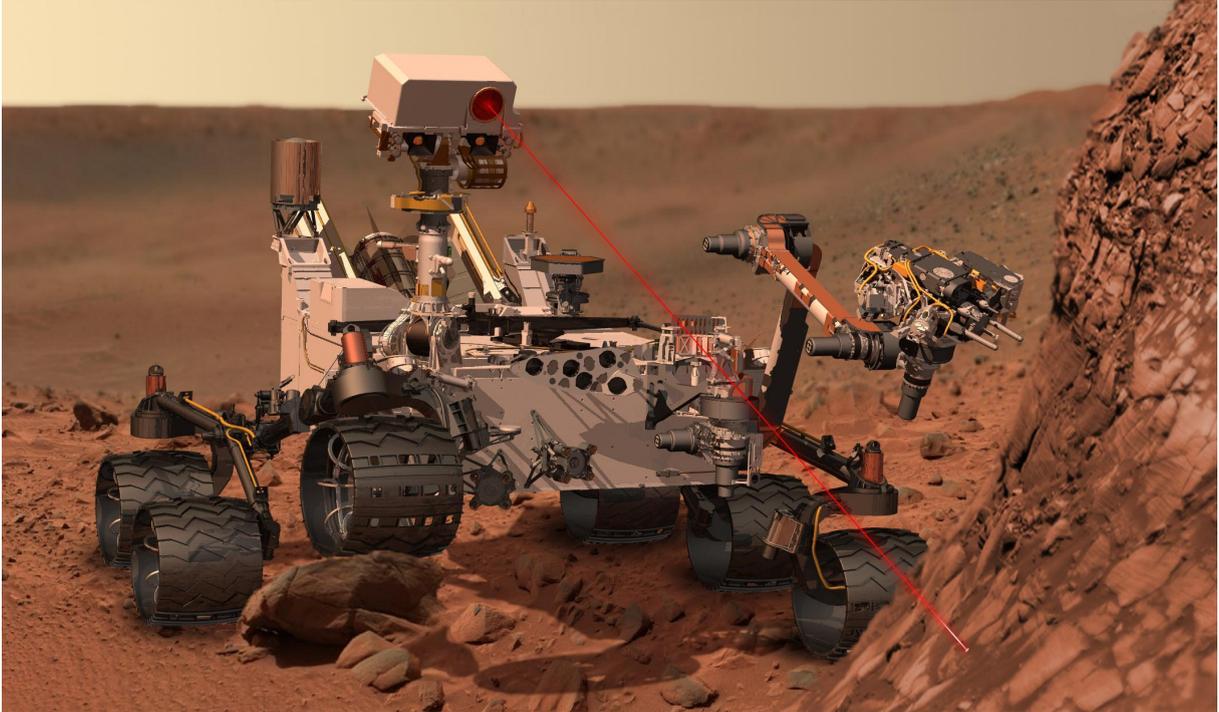


Figura 1. Ilustración del robot Curiosity analizando la composición de una roca en Marte mediante un sistema LIBS. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público <http://bit.ly/2zGvgP5>

Queda prohibida, salvo excepción prevista por en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sgts. Código Penal).

La importancia de la Luz en nuestras vidas

Mirapeix Serrano, Jesús

© 2020 Jesús Mirapeix Serrano

Universidad de Cantabria

39005 Santander

LA IMPORTANCIA DE LA LUZ EN NUESTRAS VIDAS

Estructura del Curso

Este curso se ha dividido en un total de **8 capítulos** en los que se pretende introducir al alumno los conceptos principales de la óptica y la fotónica: desde el uso de las primeras lentes de aumento hasta el uso del láser en infinidad de dispositivos y aplicaciones hoy en día.

▶ **Capítulo 1: Evolución histórica de la Óptica y la Fotónica**

Por medio de personajes clave como Arquímedes, Newton o Einstein, recorreremos la apasionante historia de la evolución de la Óptica hasta llegar a la Fotónica, con la invención de los omnipresentes láser y fibra óptica.

▶ **Capítulo 2: ¿Qué es la luz? Ondas y Partículas**

De una manera sencilla y amigable trataremos de acercarnos a uno de los “misterios” que más han preocupado y ocupado a cientos de científicos de los últimos siglos: ¿Qué es la Luz? ¿Es la luz una onda o una partícula?

▶ **Capítulo 3: Sol, Luz y Vida: comprendiendo el funcionamiento del Sol y la fotosíntesis**

La vida en nuestro planeta no existiría de no ser por el Sol y la energía que nos brinda cada segundo. De igual manera, la fotosíntesis, o lo que es lo mismo, la conversión que realizan las plantas de materia inorgánica a compuestos orgánicos gracias a la energía de la luz.

▶ **Capítulo 4: Láser, fibra óptica y su importancia en la sociedad actual: internet**

Nuestra sociedad no sería la misma si, allá por 1958, no se hubiese inventado el láser y, posteriormente, la fibra óptica. Internet, el gran fenómeno de las comunicaciones que ha revolucionado nuestra vida, no es más que luz (láser) que viaja a través del mundo por fibra óptica. Revisaremos brevemente la invención del láser, de la fibra óptica y sus fundamentos básicos.

▶ **Capítulo 5: Midiendo el mundo a través de los fotones: de la biomedicina a la ingeniería civil**

La luz no sirve sólo para comunicarnos a gran velocidad por medio de internet. También puede valernos para aplicaciones de lo más variado: desde delimitar de manera precisa células cancerígenas hasta evaluar en tiempo real el estado de un puente o una presa. En este capítulo mostraremos brevemente algunos ejemplos significativos que nos ayuden a comprender mejor esta faceta “oculta” de la luz.

▶ **Capítulo 6: El fenómeno de la visión: funcionamiento del ojo humano y animal**

Este acercamiento al mundo de la luz no sería completo si no somos capaces de comprender como funciona uno de los elementos más increíbles del cuerpo humano: el ojo y el sentido de la visión. Además, veremos las diferencias existentes con el sentido de la visión de otros miembros del reino animal.

▶ **Capítulo 7: Últimos avances de la fotónica y perspectivas de futuro**

En este capítulo final revisaremos algunos de los avances más recientes en el mundo de la óptica y la fotónica. Del mismo modo, veremos cuáles son las perspectivas de futuro de un campo de conocimiento fundamental en la actualidad y, sin duda, en las próximas décadas.

► **Capítulo 8: Experimentos en casa**

Por último, se propondrán a los alumnos una serie de sencillos experimentos que permitirán interiorizar los conceptos explicados a lo largo del curso.

Índice general

Índice general	1
5. Midiendo el mundo a través de la luz: de la biomedicina a la obra civil	2
5.1. Un sencillo ejemplo de sensor láser	3
5.2. Termografía infrarroja	4
5.3. Espectroscopía	6
5.3.1. Espectroscopía de emisión	6
5.3.2. Espectroscopía inducida por láser	8
5.4. LIDAR: el radar óptico	11
5.5. La fibra óptica como sensor	12
5.6. Sensores puntuales	12
5.7. Sensores distribuidos	16
5.8. Aplicaciones biomédicas de la luz	20
5.8.1. Absorción	20
5.8.2. <i>Scattering</i>	21
5.9. Fluorescencia para señalar al cáncer	24
5.10. Conclusiones	26
Índice de figuras	29

CAPÍTULO 5

Midiendo el mundo a través de la luz: de la biomedicina a la obra civil

Como bien sabemos, la interacción del ser humano con su entorno es fundamental y se lleva a cabo por medio de nuestros diferentes sentidos: visión, tacto, gusto, olfato y oído. Por otro lado, con la evolución de la ciencia y la tecnología, el uso de sensores se ha extendido en muchos campos de aplicación: desde la medicina al sector aeroespacial, pasando por múltiples entornos industriales y un largo etcétera. Se ha mencionado la palabra “sensor”, pero ¿tenemos claro su significado? Veamos una sencilla definición:

Un sensor es un dispositivo que convierte una magnitud física o química en otra magnitud, normalmente eléctrica, que trata de hacer una medida cuantitativa del fenómeno.

Podemos pensar en el ejemplo del termómetro de un coche: el sensor mide una magnitud física (la temperatura), para convertirla a una señal eléctrica que, tras ser tratada por la electrónica del automóvil, será mostrada en el panel del mismo. En realidad, podemos ver que existe una clara interconexión entre nuestros sentidos y estos sensores. Al fin y al cabo, nuestros sentidos también miden magnitudes físico-químicas para transformarlas en señales eléctricas que serán finalmente procesadas en nuestro cerebro.

La evolución de la óptica y la fotónica ha permitido desarrollar muchos sensores distintos, tanto basados en fibra óptica como en otras tecnologías de lo más diverso. A continuación, se realizará un breve repaso por algunas de las más interesantes o curiosas tecnologías de sensores basados en el uso de la luz.

En la Figura 5.1 se muestra un teléfono móvil en el momento de sacar una fotografía: ¿por qué crees que se ha seleccionado esta imagen? ¡Correcto! La cámara de fotos no es más que un sensor



Figura 5.1. Imagen de un teléfono móvil usando la cámara de fotos integrada. Fuente: pixabay. Licencia: CC0 Creative Commons

que, imitando a nuestra visión, convierte la luz en una señal eléctrica que, una vez procesada, es capaz de representar la imagen capturada.

Cuestión 0.1: Sensores en un teléfono móvil

Sin embargo, un teléfono móvil alberga muchos más sensores. Busca información al respecto (o piensa sobre las funcionalidades de tu dispositivo) y **nombra al menos 5 sensores que integre un teléfono móvil actual**, al margen de la mencionada cámara de fotos.

5.1. Un sencillo ejemplo de sensor láser

Un ejemplo sencillo de sensor basado en la luz lo tenemos en los ya ha daí de hoy comunes medidores láser. Un medidor láser tiene un funcionamiento relativamente sencillo para estimar la distancia entre dos puntos: mide el tiempo que tarda la luz en ir y volver desde el dispositivo hasta el punto de medida (una pared, por ejemplo). Como la velocidad de la luz en el aire es conocida, sabiendo el tiempo que ha tardado la luz láser en ir y volver es fácil determinar la distancia mediante la siguiente ecuación¹:

$$s = v \cdot t \quad (5.1)$$

¹En esta ecuación s es espacio, v velocidad y t tiempo.



Figura 5.2. Medidor de distancia por láser. Fuente: Wikimedia (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 2.0. <http://bit.ly/2zrnRjq>

5.2. Termografía infrarroja

Todo cuerpo caliente emite radiación infrarroja. Esta es la base sobre la que se sustenta por ejemplo el efecto invernadero, en el que se establece un equilibrio entre la radiación entrante del Sol y saliente de la Tierra¹. La Tierra, al calentarse, libera parte de ese calor en forma de radiación infrarroja y parte de esa radiación “rebota” en los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, metano, etc.

El hecho de que la radiación infrarroja esté asociada al calor de un cuerpo hace que se pueda estimar la temperatura de dicho cuerpo si se captura dicha radiación. Al igual que la cámara vista en la Figura 5.1 captura la radiación en el espectro visible, existen cámaras capaces de capturar la radiación infrarroja: son las denominadas cámaras infrarrojas (IR) o cámaras térmicas. En la Figura 5.3 se muestran dos ejemplos con los termogramas de una mano (izquierda) y una locomotora de vapor (derecha).

El primer ejemplo nos traslada al ámbito médico, donde un uso típico de la termografía infrarroja se basa en la detección de alteraciones del sistema circulatorio, por ejemplo en extremidades. La imagen de la derecha, que podríamos catalogar dentro de aplicaciones del transporte o incluso del ámbito industrial, nos muestra la distribución de temperaturas en una locomotora de vapor. El análisis de esta imagen puede permitir la detección de posibles fallos en alguno de los sistemas que componen la locomotora. Otro ejemplo típico en este caso sería el uso de esta tecnología para la detección de fallos o averías en cajas de conexiones o tendidos eléctricos, ya que estos problemas se reflejan en forma de puntos calientes.

La termografía infrarroja no permite de manera directa conocer la temperatura de cada punto de la imagen, sino la distribución de temperaturas en función del mapa de colores asociados. Para

¹Debido al denominado cambio climático, el efecto invernadero se ha teñido de un cariz peyorativo. Sin embargo, sin el efecto invernadero no existiría vida en nuestro planeta o, al menos, sería muy diferente a como la conocemos hoy en día, ya que la temperatura en nuestro planeta sería muy inferior.

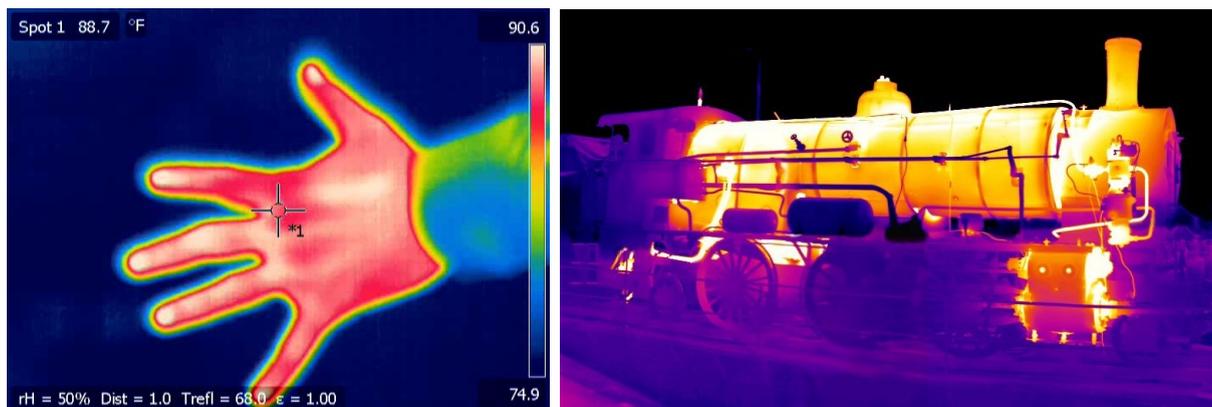


Figura 5.3. Imagen térmica (termograma) de una mano (izquierda) y una locomotora de vapor (derecha). Fuente: Wikicommons (izquierda) y pixabay (derecha). Licencia: CC-BY-SA-3.0 / CC0 Creative Commons

conocer la temperatura exacta es necesario conocer un parámetro, denominado *emisividad*, del material que se está analizando.

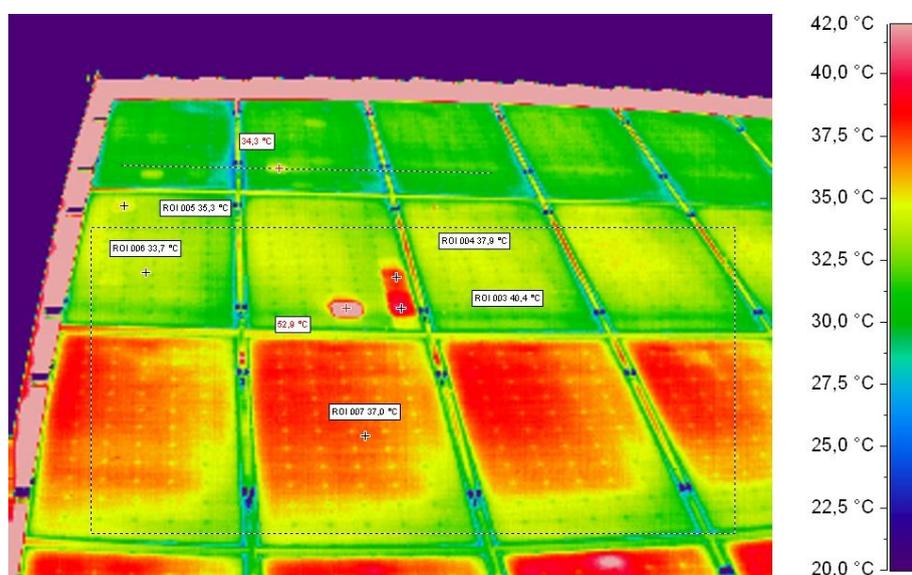


Figura 5.4. Imagen térmica (termograma) de un generador solar fotovoltaico. Fuente: Wikicommons. Licencia: CC-BY-SA-3.0

Importante 2.1: Termografía infrarroja y energía solar fotovoltaica

Un ejemplo interesante de aplicación de la termografía infrarroja es la inspección de instalaciones solares fotovoltaicas. En ellas, uno de los problemas típicos que pueden sufrir los paneles o módulos fotovoltaicos es el de los “puntos calientes”, que ocurre cuando una sección del panel queda oculta por suciedad, hojas de árboles, etc. En estas condiciones el panel puede estropearse, llegando a quedar inservible. La detección de este problema se puede hacer mediante la localización de zonas anormalmente calientes en el panel, como se puede apreciar en la Figura 5.4, en concreto en la parte superior, donde un panel con una temperatura homogénea (en verde) presenta dos puntos más calientes (en rojo).

Cuestión 2.1: Termografía infrarroja

Busca información sobre alguna aplicación de la termografía infrarroja distinta a las aquí mencionadas y explícala brevemente **con tus propias palabras**.

5.3. Espectroscopía

La espectroscopía se define como la ciencia que estudia la interacción entre luz y materia. Cuando se produce esa interacción, la luz puede recoger la “huella dactilar” de los materiales con los que interacciona, permitiendo así aplicaciones en la que se puede identificar materiales, cuantificar su participación, etc.

Dentro de las técnicas espectroscópicas existe una amplia variedad: espectroscopía de emisión, de absorción, de ruptura inducida por láser, etc. Veamos a continuación algún ejemplo ilustrativo.

5.3.1. Espectroscopía de emisión

La espectroscopía de emisión se basa en la captura de la luz emitida por una fuente de manera natural (el Sol) o forzada (como veremos en el caso de la espectroscopía inducida por láser) y el análisis de su espectro. Como ya se comentara en el Capítulo 1, en concreto en el Apartado 1.15, un espectro puede definirse como la representación de la luz descompuesta en sus colores o longitudes de onda. Se mencionó el ejemplo del espectro de la luz del Sol: si un rayo de luz del Sol lo hacemos pasar por un prisma, entonces seremos capaces de descomponer dicha luz en sus diferentes colores (ver Figura 5.5).

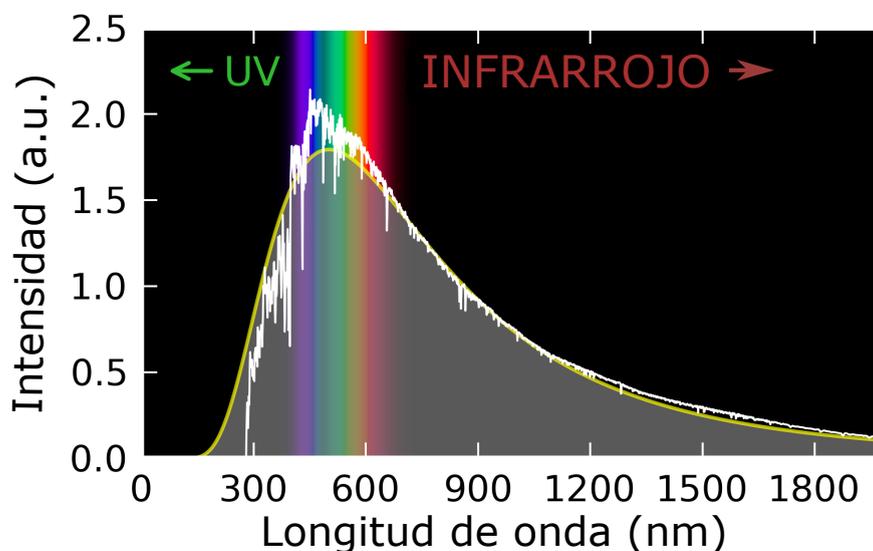


Figura 5.5. Espectro del Sol. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: Dominio Público. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_AMO_spectrum_with_visible_spectrum_background_\(en\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_AMO_spectrum_with_visible_spectrum_background_(en).png)

En la espectroscopía de emisión es indispensable el analizar el espectro de la luz capturada, lo que se lleva a cabo mediante un dispositivo denominado **espectrómetro**, que incluye un prisma o

dispositivo similar para descomponer la luz en sus diferentes longitudes de onda. En la Figura 5.6 se muestra un esquema con los elementos básicos de un espectrómetro, con la fuente que emite la luz, los espejos que guían ésta por el interior del espectrómetro, el prisma o red de difracción que descompone la luz en sus diferentes componentes espectrales (colores o longitudes de onda) y el detector, que es un sensor similar a los de las cámaras de fotos.

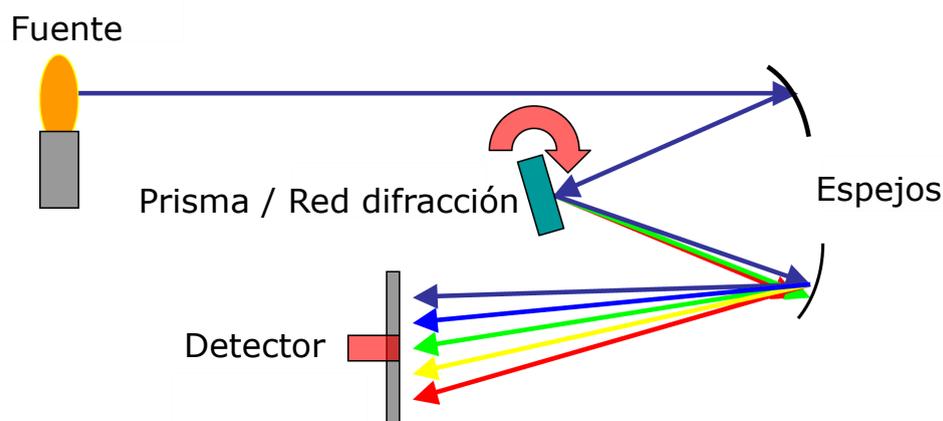


Figura 5.6. Esquema de un espectrómetro. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2yhWqr9>

Un ejemplo de aplicación de la espectroscopía de emisión es el análisis o monitorización¹ de procesos de soldadura. Como sabemos, en estos procesos se produce de forma natural una intensa radiación luminosa que hace que los soldadores tengan que protegerse los ojos con máscaras o gafas de protección especiales. Si esa luz es capturada, por ejemplo mediante una fibra óptica, y guiada a un espectrómetro, es posible analizar la evolución de los espectros del proceso de soldadura. La Figura 5.7 muestra un ejemplo de espectro capturado durante un proceso de soldadura. Como puede apreciarse, el espectro está compuesta por varias “líneas de emisión”. **Cada una de estas líneas está asociada con un elemento atómico que participa en el proceso**, como puede ser el hierro (Fe en la imagen) ya que en este caso se han soldado chapas de acero inoxidable. El análisis de la evolución de esas líneas de emisión y sus variaciones pueden indicar la aparición de defectos en el proceso como porosidades, grietas, etc.

Importante 3.1: Líneas de emisión

El hecho de que cada línea de emisión esté asociada a un único elemento atómico se explica por el fenómeno de emisión que hemos visto en capítulos anteriores. La emisión de un fotón se produce cuando un electrón “baja” de un nivel de energía superior a uno inferior. Es precisamente esa diferencia de energía la que determina la longitud de onda del fotón (o línea de emisión) emitido, siendo única para cada elemento de la tabla periódica.

En la Figura 5.8 se muestra un ejemplo de aplicación de esta técnica a un proceso de soldadura orbital (se sueldan tubos) destinado al sector nuclear (soldadura de generadores de vapor para centrales nucleares). En el detalle de la derecha se observa como en la soldadura se ha generado

¹Monitorización en este ámbito es un sinónimo de supervisión, esto es, capturar diferentes parámetros de un proceso para comprobar que su desarrollo es correcto.

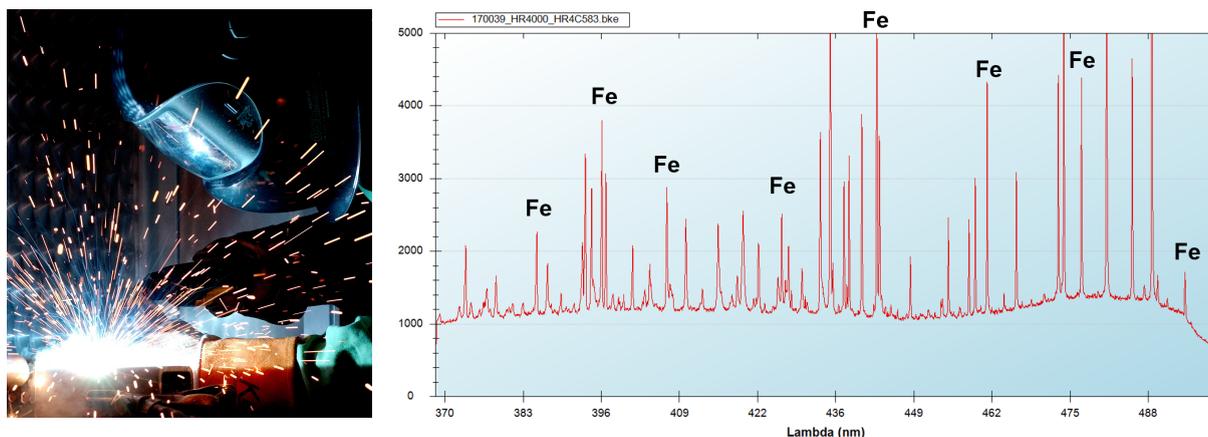


Figura 5.7. Imagen de un proceso de soldadura y la luz generada durante el mismo (izquierda) y un espectro de soldadura (derecha). Fuente: Wikimedia Commons (izquierda). Licencia: CC-BY-SA 3.0. Imagen de la derecha: elaboración propia.

un poro. Analizando la señal resultante de tener en cuenta varias líneas de emisión del espectro, es fácil ver que la detección del defecto en tiempo real (mientras se realiza la soldadura) es viable.

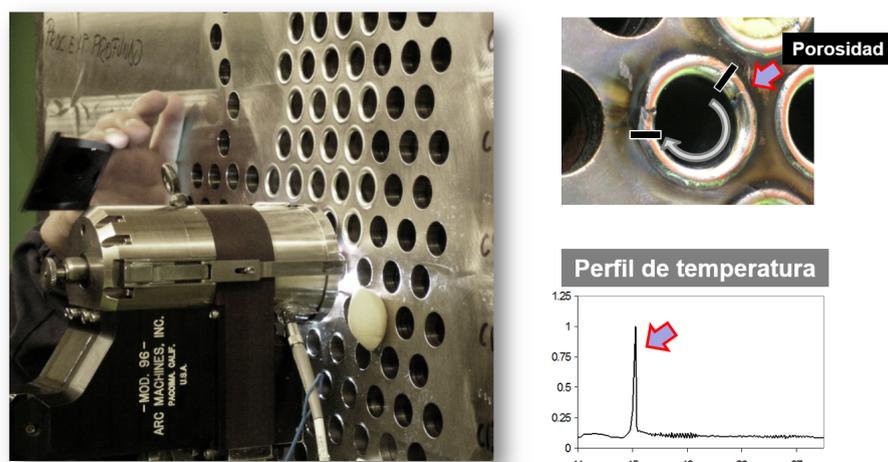


Figura 5.8. Ejemplo de espectroscopía de emisión aplicado a la monitorización de un proceso de soldadura. Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Espectroscopía inducida por láser

Así como en el proceso de soldadura existe emisión de luz de manera natural, en muchos otros casos no es posible aplicar la espectroscopía de emisión sin más: es necesario generar de manera intencionada la luz para poder analizar el proceso o material deseado. La opción típica en este caso es usar la variante denominada espectroscopía (de ruptura) inducida por láser o LIBS¹. En LIBS se hace uso de un láser con suficiente potencia como para, al impactar brevemente sobre una superficie, volatilizar parte de la misma, emitiendo luz en el proceso.

Un muy buen ejemplo de LIBS lo constituye el sistema integrado en el robot Curiosity que

¹LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy

desde hace algunos años explora la superficie de Marte¹. El sistema LIBS es usado para analizar la composición de las rocas marcianas, cosa que, de otro modo, sería bastante complicado de implementar. La Figura 5.9 ilustra precisamente al Curiosity usando el láser del sistema LIBS para analizar la composición de una roca en Marte.

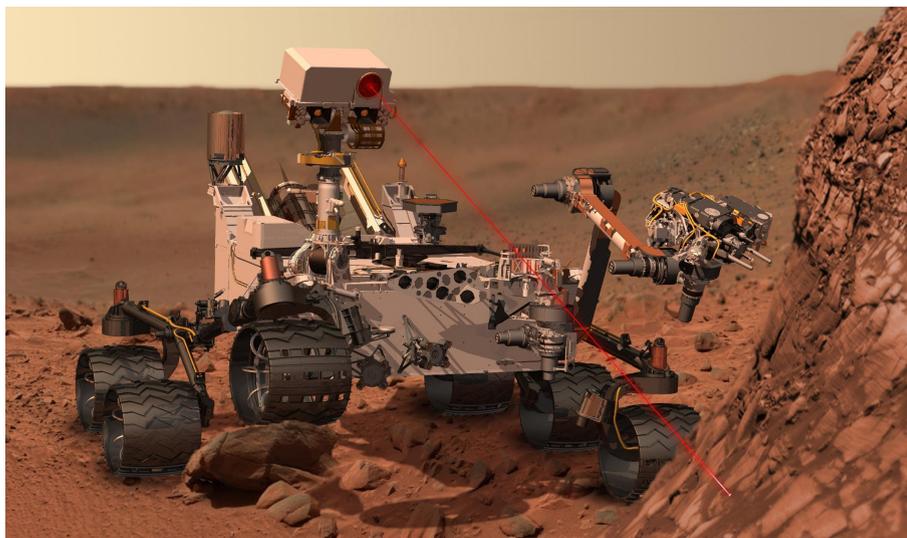


Figura 5.9. Ilustración del robot Curiosity analizando la composición de una roca en Marte mediante un sistema LIBS. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público <http://bit.ly/2zGvgP5>

Importante 3.2: LIBS

En este vídeo puedes ver un sistema LIBS (se llega a escuchar el sonido provocado por el láser sobre las muestras) empleado para determinar el nivel de cobre en las rocas movidas por la cinta transportadora: <https://youtu.be/5hnfNcBkXAk>

Los sistemas LIBS permiten determinar la composición de un material analizando el espectro y la relación entre las líneas de emisión que aparecen en el mismo, tal y como se explicó con anterioridad. El hecho de que LIBS permita analizar dichas composiciones hace que, al margen de en muchas aplicaciones industriales, sea de gran utilidad en estudios de carácter arqueológico: veámoslo con dos interesantes ejemplos.

LIBS para análisis paleo-nutricional En un estudio dirigido a conocer si la peste afectó por igual a nobles y a clases menos favorecidas, LIBS se ha empleado para determinar si los huesos encontrados en una fosa común en Italia (datada del siglo XV) pertenecían a personas de clases nobles o “plebeyas”. La dieta que sigue una persona afecta a la composición de los huesos, de tal manera que una dieta rica en proteínas deriva en mayores niveles de zinc. Por el contrario, altos niveles de bario, estroncio o magnesio en los huesos indica una dieta fundamentalmente vegetariana. Empleando LIBS sobre los huesos encontrados en la fosa y analizando la relación entre el nivel de zinc y estroncio, se puede llegar a determinar cuántas personas nobles fueron enterradas en dicho enclave. Como se puede apreciar en la Figura 5.10, hay muestras, como la 13, que parece claramente asociada a un noble, mientras que otras, como la 6 o la 9, que, teniendo niveles más bajos de zinc, podrían pertenecer a personas de clases sociales más bajas.

¹Para más información puedes consultar el siguiente enlace: <https://es.wikipedia.org/wiki/Curiosity>.

Información de restos arqueológicos: Análisis Paleo-nutricional

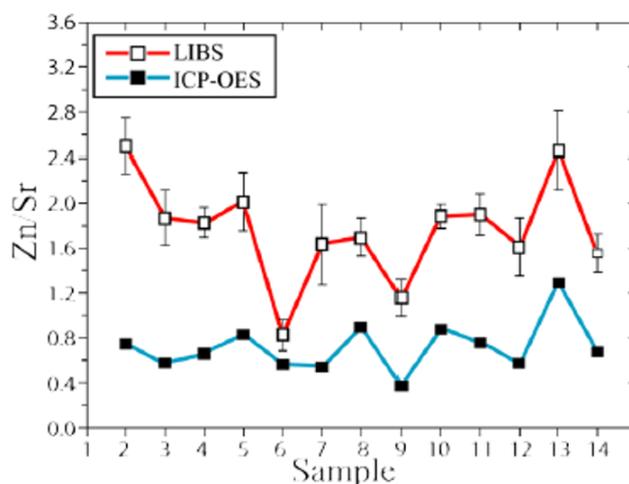


Figura 5.10. Análisis paleo-nutricional desarrollado mediante LIBS. Fuente: Elaboración propia.

LIBS para datación de monedas de la época romana Los métodos de datación convencionales (como el carbono-14) no son empleables a cualquier tipo de elemento, siendo por ejemplo las monedas antiguas un buen ejemplo. La datación mediante LIBS no es, por supuesto, directa, sino que implica un paso intermedio. En primer lugar se procede a la determinación de la composición de las monedas, en este caso denarios romanos de plata como el que se muestra en la Figura 5.11. La composición de los denarios romanos varió con el tiempo, aumentando la composición de metales más baratos, como el cobre, cuando la situación en el imperio era complicada, coincidiendo con guerras y revueltas. En la Figura 5.12 se muestra un ejemplo de un espectro de una de estas monedas, resaltando líneas que pertenecen al cobre (Cu), plata (Ag) o plomo (Pb). En la parte derecha se muestra una gráfica que establece una correlación entre el nivel de cobre en las monedas y algunos eventos históricos clave como levantamiento en España o contra Pompeya.



Figura 5.11. Denario romano de plata. Fuente: *X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Roman silver denarii* (Pardini et al.).

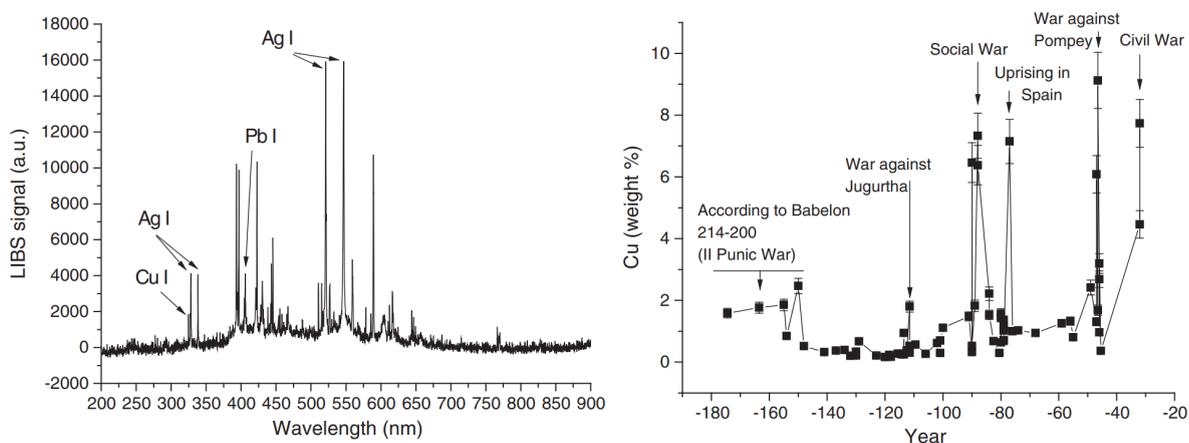


Figura 5.12. Espectro LIBS de un denario de plata (izquierda) y evolución histórica del contenido de cobre en denarios de plata (derecha). Fuente: *X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Roman silver denarii* (Pardini et al.).

Cuestión 3.1: LIBS

Busca información y comenta brevemente, **con tus propias palabras**, otra aplicación de LIBS que te haya resultado llamativa.

5.4. LIDAR: el radar óptico

Una de las aplicaciones más interesantes y de actualidad del láser es el denominado **radar óptico o LIDAR**¹. Estos sistemas son una extensión del concepto del láser como medidor de distancia ya visto y se basan, de nuevo, en la medición de distancia mediante la estimación del tiempo de ida y vuelta de un pulso de luz. En el caso de LIDAR estos sistemas no son estáticos, sino que realizan un barrido para recuperar la información de superficies, edificios, entornos, etc. Aunque existen otras aplicaciones, el uso más normal del LIDAR es **embarcado en algún tipo de aeronave**. En este sentido, para poder reproducir los mapas del terreno analizado, es imprescindible disponer, no sólo del emisor y sensor láser, sino también de un sensor GPS y de un sensor inercial de navegación para conocer en cada instante la posición del sistema LIDAR.

Los sistemas LIDAR permiten la realización de mapas con un gran nivel de resolución o detalle, gracias a las características especiales del láser, como la coherencia. En la Figura 5.13 se muestra un ejemplo de imagen topográfica de Marte creada con el sistema láser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter / Altimetro láser en órbita de Marte).

¹LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging

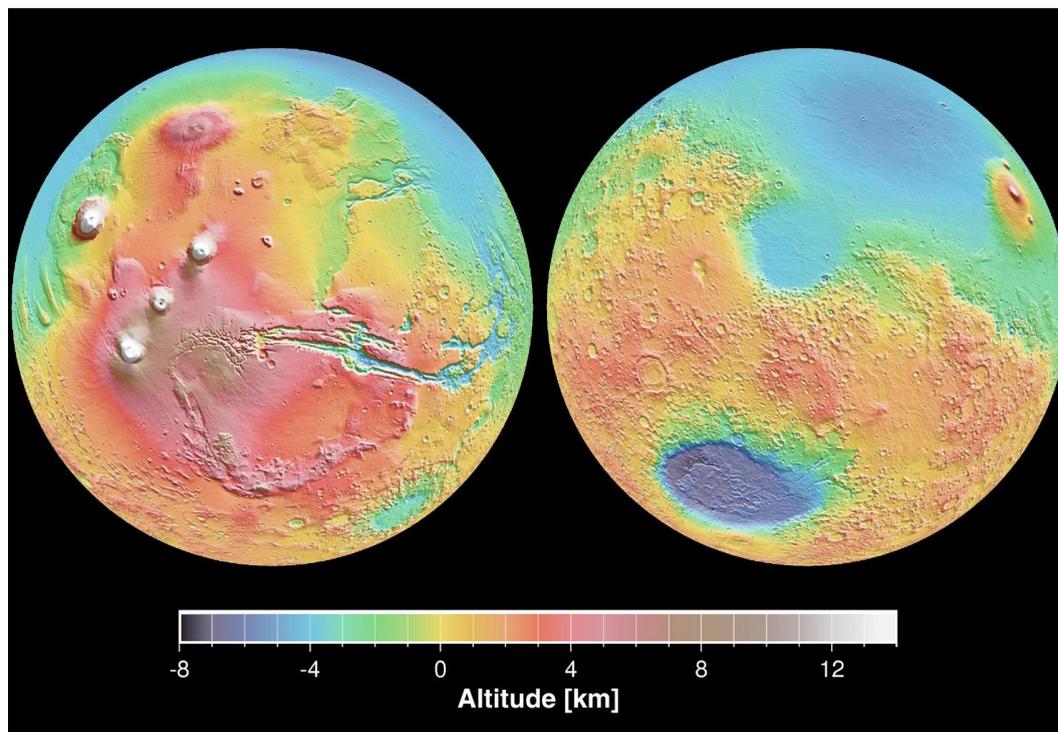


Figura 5.13. Imagen topográfica de Marte creada en 2001 por el sistema láser MOLA. Fuente: NASA (Jet Propulsion Laboratory). Licencia: Dominio Público. <https://go.nasa.gov/2iTd0Hn>

Cuestión 4.1: El coche autónomo y LIDAR

Seguro que has oído hablar del concepto del **“coche autónomo”**: coches que viajarán sin la necesidad de conductor gracias a multitud de sensores y sistemas “inteligentes”. Investiga y explica con tus propias palabras si existe alguna relación entre la tecnología **LIDAR** y el **coche autónomo**.

5.5. La fibra óptica como sensor

En los ejemplos anteriores hemos visto sistemas donde los sensores estaban implementados por cámaras (como en la termografía infrarroja) o espectrómetros, como en la espectroscopía. Sin embargo, la propia fibra óptica puede ser empleada como elemento sensor, no sólo como guía para sistemas de comunicaciones.

5.6. Sensores puntuales

Por un lado, en la fibra óptica se pueden grabar sensores denominados redes de difracción, *gratings* o redes de Bragg¹. Estos elementos se pueden grabar dirigiendo la radiación de un láser ultravioleta a la sección de fibra deseada. De esta manera, en el núcleo de la fibra óptica se graba un patrón periódico cuyo índice de refracción es distinto al de la fibra. El resultado

¹Estos términos son sinónimos y se usarán indistintamente el resto del curso.

es que parte de la luz que llegue a ese punto de la fibra será reflejada, dejando pasar el resto. La longitud de onda de la luz reflejada será dependiente de la temperatura y la tensión¹ que sufra la fibra, con lo que se tiene un sensor de temperatura y tensión (strain).

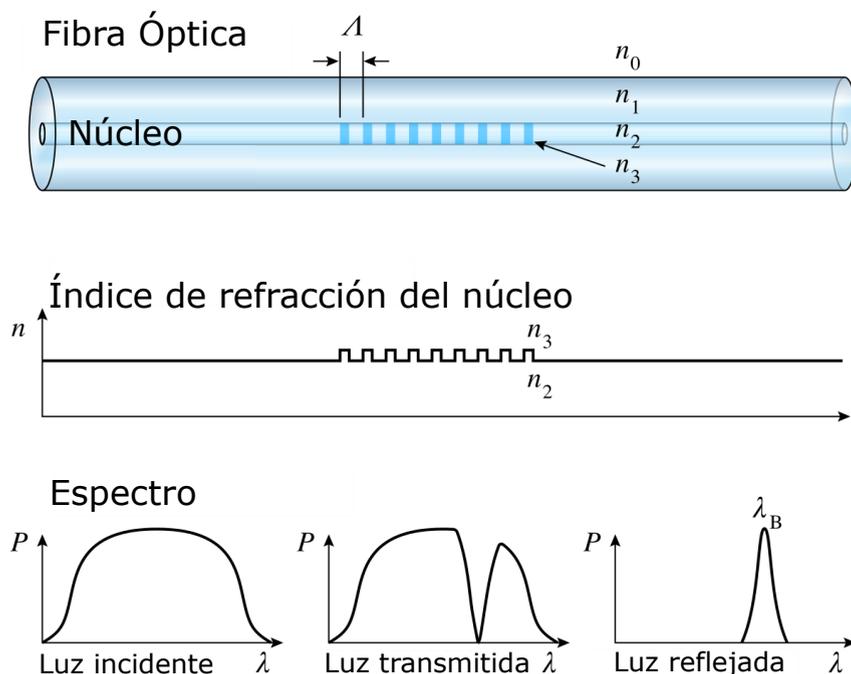


Figura 5.14. Red de difracción grabada en una fibra óptica. Detalles del cambio de índice de refracción y de los espectros de la luz incidente y reflejada. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2ztBRJr>

En la Figura 5.14 se ha representado el concepto de red de difracción de Bragg o *grating*. En la imagen se aprecia el patrón grabado en el núcleo de la fibra con un índice (n_3) de refracción diferente. En la parte inferior también se observa como la luz que llega a la red de difracción sufre una reflexión de un único "pico" a una determinada longitud de onda, siendo esa λ de pendiente de la temperatura y *strain* al que esté sometido el *grating*.

Lógicamente en este caso estamos hablando de un sensor **puntual**, esto es, un sensor capaz de dar la medida del parámetro de interés en el punto en el que está instalado el sensor. Los ámbitos de aplicación de los *gratings* como sensores son múltiples, al tratarse de una tecnología madura y probada durante muchos años. Un ejemplo típico de aplicación de este tipo de sensores es la obra civil. En la Figura 5.15 se han incluido imágenes de la instalación y prueba de un sistema sensor basado en múltiples redes de difracción² en el viaducto de las Navas, en la autovía del Norte que une Santander con Asturias, a la altura de Cabezón de la Sal. Puede observarse como los sensores se han instalado en estructuras de metacrilato para su protección y, sobre todo, para poder seguir de manera eficiente los movimientos de la estructura. Se aprecian también momentos del hormigonado de una parte del puente y de la prueba de carga.

Se pueden encontrar aplicaciones de los *gratings*, comúnmente denominados también FBGs

¹En este contexto **tensión** se refiere al estiramiento que sufre la fibra al ser tensada, no al parámetro eléctrico. Se suele emplear el término *strain* (que podría traducirse por elongación)

²En la misma fibra óptica se pueden instalar varios *gratings*, siempre y cuando sus longitudes de onda sean diferentes.

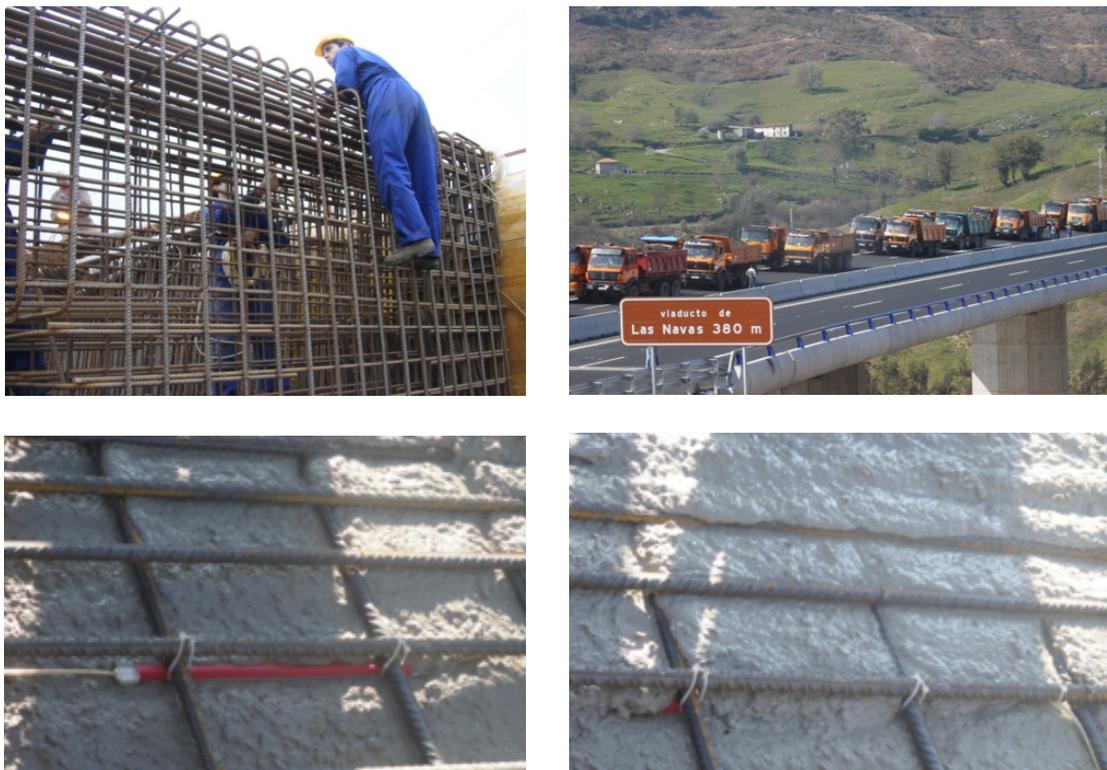


Figura 5.15. Instalación de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción en el viaducto de Las Navas (año 2000). Fuente: Elaboración propia.

(*Fiber Bragg gratings*), en infinidad de sectores. En el sector de las **energías renovables** existe una gran demanda de aplicaciones que involucren monitorización y sensado¹. Un ejemplo son los aerogeneradores, que llegan a generar decenas de señales de control para su correcta operación. Un factor muy importante a controlar en este campo es la integridad estructural de las palas de estos aerogeneradores que, en los modelos modernos, pueden llegar a tener la misma longitud que un campo de fútbol. Estas palas están fabricadas en materiales compuestos como la fibra de carbono y no son rígidas, sino que permiten cierta flexión. Resulta por tanto fundamental conocer el comportamiento de las palas en tiempo real para prevenir cualquier posible problema que pudiese terminar en la destrucción de todo el aerogenerador, por ejemplo ante la presencia de vientos anormalmente fuertes o turbulencias².

En la Figura 5.16 se muestra el proceso de instalación de un sensor de fibra óptica basado en un *grating* en la pala de un aerogenerador.

¹Si bien el término *sensado* no está recogido por la RAE, su uso extendido en la comunidad científica nos permite el tomarnos esta licencia.

²Un ejemplo de lo que puede llegar a ocurrir se muestra en el siguiente vídeo: <https://youtu.be/CqEccgR0q-o>.



Figura 5.16. Instalación de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción en la pala de un aerogenerador. Fuente: Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.

Importante 6.1: Probando las palas de un aerogenerador

En el siguiente vídeo se puede apreciar cómo se verifica el correcto funcionamiento mecánico de las palas de un aerogenerador y, como puedes observar, son ciertamente flexibles: <https://youtu.be/5m-jwwM3qRs>

Importante 6.2: Laboratorio de ensayo de aerogeneradores

En España existe un Laboratorio de Ensayo de Aerogeneradores en Sangüesa, donde se pueden ensayar y validar las diferentes partes que componen un aerogenerador moderno: <https://youtu.be/ouxPb0uTKcE>

5.7. Sensores distribuidos

Un concepto interesante que debemos introducir ahora es el de “**sensores distribuidos**”. Cuando hablamos de un sensor, normalmente pensamos en algo puntual, por ejemplo un anemómetro para medir la velocidad del viento, un termómetro para medir la temperatura de una persona o una red de difracción que nos permite conocer la temperatura en un punto de un puente.

Cuando hablamos de *sensores o sentido distribuido*, estamos hablando de la realización de medidas de una determinada magnitud física a lo largo de una distancia determinada, en este caso por medio de la fibra óptica. Esto es, ¡toda la fibra óptica actúa como sensor! Evidentemente este concepto implica unas ventajas muy importantes cuando se busca controlar infraestructuras que impliquen muchos puntos de medida y/o grandes distancias. Ejemplos típicos pueden ser oleoductos o gaseoductos, tendidos eléctricos, presas, puentes. etc. Imaginemos el primer ejemplo: un oleoducto que recorre decenas de kilómetros en el que queremos detectar una posible fuga: ¿qué tecnología de sensores podríamos emplear? Resulta difícil pensar que con sensores convencionales pueda desarrollarse una solución eficiente y que sea viable desde el punto de vista de coste. Por el contrario, los **sensores distribuidos de fibra óptica** permitirían implementar una solución satisfactoria.

Estos sensores se basan en el fenómeno de *scattering*, que suele traducirse al castellano como dispersión o, en ocasiones, esparcimiento. Desde un punto de vista simple, los fenómenos de scattering implican que la luz que está siendo transmitida en una determinada dirección es dispersada o esparcida, por ejemplo por partículas que se encuentre en su camino. Un ejemplo muy ilustrativo en este sentido es el del Sol y el color del cielo: ¿alguna vez te has planteado por qué el cielo es azul? En realidad, ¿no deberíamos ver el cielo oscuro y plagado de estrellas a todas horas?

Efectivamente, tal y como se aprecia en la Figura 5.17, el Sol desde fuera de la atmósfera de la Tierra se ve blanco y el cielo negro: ¿qué ocurre en la Tierra? La explicación a que veamos el cielo azul y el Sol amarillo la encontramos en un fenómeno de dispersión denominado **scattering de Rayleigh**. Este scattering se produce cuando la luz se encuentra con partículas muy pequeñas, incluso inferiores a su longitud de onda. En el caso del cielo hablamos de moléculas de ciertos gases y partículas en suspensión. Esta interacción entre la luz y esas partículas hace que parte de la luz se “esparza”, de tal manera que esos fotones salen en todas direcciones. Pero: ¿qué fotones sufren con mayor intensidad ese fenómeno? La respuesta es:



Figura 5.17. Vista del Sol y la Tierra desde la Estación Espacial Internacional. Fuente: Wikimedia (NASA). Licencia: Dominio Público. <http://bit.ly/2zSJEUc>

a menor longitud de onda, mayor es la intensidad del scattering resultante. Una fórmula simplificada podría ser tal que:

$$I_{\text{RAYLEIGH}} = \frac{\text{Constante}}{\lambda^4} \tag{5.2}$$

Esto es, la intensidad del scattering de Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la 4. Si ahora nos fijamos en la Figura 5.18 y recordamos que las longitudes de onda más cortas dentro del espectro visible se corresponden con el violeta y el azul, llegamos a la explicación de por qué vemos el cielo azul: de todos los fotones que llegan del Sol, los azules son esparcidos en el cielo por moléculas y partículas.

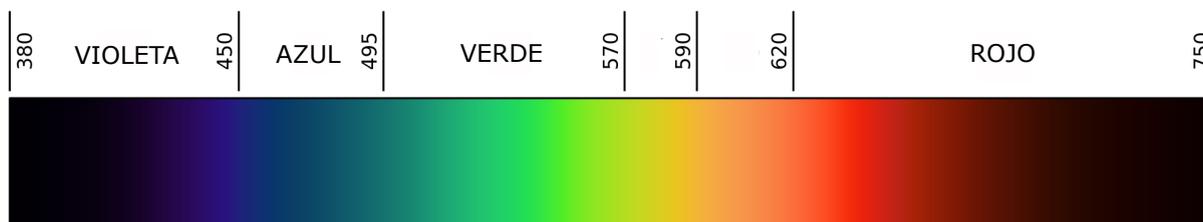


Figura 5.18. Espectro visible. Fuente: Wikimedia (Original modificada). Licencia: Dominio Público. <http://bit.ly/2zBGbIV>

Ahora bien: ¿qué ocurre con el Sol? ¿Por qué lo vemos de color amarillo cuando debiera ser blanco? La respuesta es sencilla, el amarillo es el color complementario del azul; es decir, si al color blanco le quitamos el azul, el color resultante será amarillo.

Importante 7.1: El Sol ¿blanco?

En realidad, ¿es cierto que debiéramos ver el Sol de color blanco? La respuesta es sencilla si pensamos que el blanco es, por definición, la mezcla o suma de todos los colores.

Una vez explicado el scattering de Rayleigh, es fácil explicar cómo funciona la dispersión en la fibra óptica. Si introducimos luz por un extremo de la fibra, una pequeña parte de esa luz es reflejada a medida que la luz avanza. Si ponemos un sensor (un foto-receptor) a la entrada de la fibra, podemos ser capaces de saber lo que ocurre en cada punto de la fibra. Es precisamente el scattering de Rayleigh el que se utiliza en equipos denominados OTDR¹ para conocer el estado de un enlace de fibra óptica. Si un enlace se rompe, por ejemplo por la acción de una pala excavadora, podemos saber exactamente en qué punto se ha roto si disponemos de uno de estos equipos. La información de la posición en la fibra es fácil de inferir, ya que se basa en medir el tiempo que tarda en ir y volver la luz hasta el punto de interés, siendo la velocidad de ésta conocida.

En la Figura 5.19 se muestra una imagen de un OTDR en funcionamiento. La señal amarilla que aparece en pantalla, normalmente denominada “traza”, nos da información sobre los eventos que ocurren en el canal de fibra. Por ejemplo, en el primer tramo (primeros 5 cuadros y medio) sólo se aprecia una pendiente que nos indica la atenuación de la fibra analizada. El “pico” que aparece a continuación es indicativo de una conexión mecánica en la fibra (mediante el uso de una transición). Finalmente, cuando la señal empieza a ser ruidosa, quiere decir que el canal de fibra finalizó.

Al igual que el *scattering* de Rayleigh existen otros, como el **scattering de Brillouin y el de Raman**, que permiten la medida distribuida de temperatura y elongación en la fibra óptica. Estos sistemas emplean normalmente fibra óptica estándar y, por lo tanto, muy barata. Los equipos que hay que emplear para poder realizar la medida en esa fibra (inyección y detección de luz) suelen ser sofisticados y costosos.

Importante 7.2: Raman: Nobel en 1930

La relevancia de estos efectos se explica fácilmente a través de uno de sus descubridores, Sir Chandrasekhara Venkata Raman (Madrás, 7 de noviembre de 1888-Bangalore, 21 de noviembre de 1970) físico hindú que descubrió el scattering que lleva su nombre y por el que recibió el Premio Nobel de Física en 1930.

¹Optical Time Domain Reflectometry / Reflectometría óptica en el dominio del tiempo.

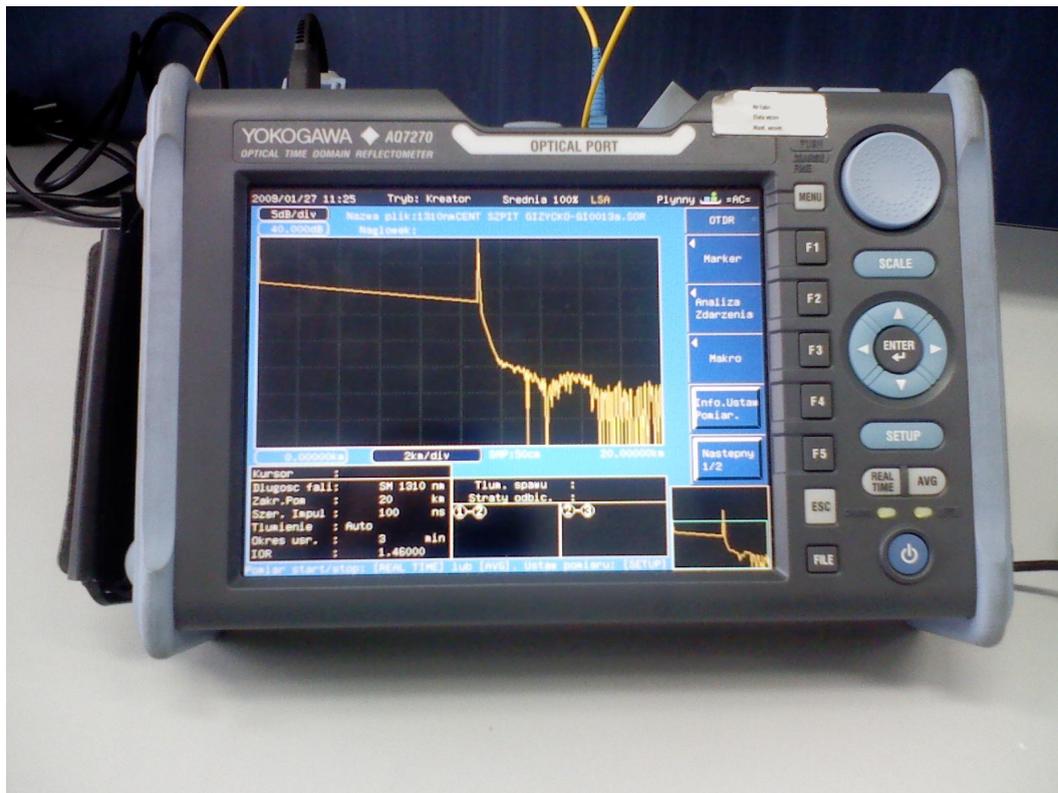


Figura 5.19. Imagen de un equipo OTDR. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2yxFPj8>



Figura 5.20. Fotografía de Raman. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio Público. <http://bit.ly/2hyfiis8>

5.8. Aplicaciones biomédicas de la luz

Al igual que en el apartado dedicado a la espectroscopía se ha presentado como es posible analizar la composición y características de diferentes objetos mediante la interacción luz-materia, el estudio de la interacción entre la luz y los tejidos y órganos del cuerpo humano puede dar lugar a un amplio abanico de aplicaciones en el sector de la biomedicina.

Fenómenos que tienen que ver con la luz como la **refracción, la absorción y el scattering** (todos ellos ya mencionados en secciones anteriores) permiten recoger información muy valiosa de la luz que ha viajado por nuestros tejidos.

Cuestión 8.1: Sangre azul

Trata de encontrar alguna explicación de carácter “óptico” al dicho *ser de sangre azul*.

5.8.1. Absorción

Uno de los mecanismos principales en la interacción entre la luz y los tejidos (y otros elementos, como gases) es la **absorción**. Cuando la luz atraviesa un material puede ocurrir que parte de la energía asociada a esa radiación sea absorbida por el material, por lo que la intensidad de la luz a la salida I_1 , será menor que la intensidad entrante I_0 , tal y como se ha representado en la Figura 5.21¹.

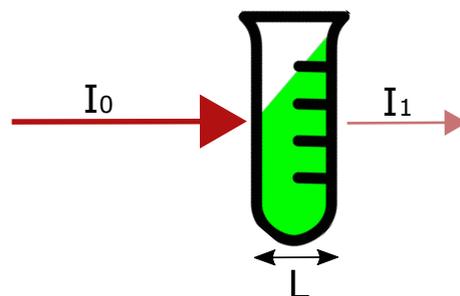


Figura 5.21. Representación del fenómeno de absorción de la luz. Fuente: Elaboración propia.

Para entender este mecanismo de absorción, podemos pensar en el hecho de que algunos materiales, al absorber la luz del Sol, re-emiten parte de la energía absorbida en forma de calor (como ocurre con la Tierra y el conocido efecto invernadero). La formulación científica al fenómeno representado en la Figura 5.21 se realiza por medio de la conocida como Ley de Beer-Lambert:

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-\alpha \cdot L} \quad (5.3)$$

En la ecuación anterior α es un parámetro que indica la concentración del material (líquido, gas) en la probeta que será atravesada por la luz. La absorción será mayor cuanto mayor sea la concentración y cuanto mayor sea la longitud de interacción L .

¹En esta imagen L indica la longitud de interacción entre la luz y el material.

Cuestión 8.2: Absorción de la luz y energía

A estas alturas del curso ya sabemos que la luz lleva asociada energía (pensemos en un láser potente, por ejemplo, capaz de cortar una chapa metálica). Por otro lado, sabemos que la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma.

Con estos supuestos de partida, trata de contestar a la siguiente pregunta: ¿qué ocurre cuando la luz es absorbida por un material? ¿Qué pasa con la energía asociada?

Desde el punto de vista de las aplicaciones biomédicas: ¿cómo podemos definir este proceso de absorción? Como el proceso que implica la extracción de energía de la luz por medio de “especies” moleculares, esto es, de moléculas que participan en tejidos/compuestos en nuestro organismo.

Este efecto nos va a poder servir, desde un punto de vista de aplicaciones en biomedicina, tanto para el diagnóstico como para procesos terapéuticos. ¿Por qué la absorción puede servir como herramienta diagnóstica? La respuesta es sencilla si recordamos lo ya visto en el apartado de espectroscopía de emisión. Al igual que cada elemento atómico emite una luz única (gracias a su longitud de onda) debido a los niveles de energía de sus electrones, este fenómeno ocurre igual a la inversa: la luz es absorbida por átomos o moléculas, por lo que estos dejarán su huella en la luz, en concreto en su espectro.

En la Figura 5.22 se ha representado el espectro de absorción de la hemoglobina¹, en concreto el espectro para diferentes concentraciones (desde 10 hasta 150 mg/mL).

¿Para qué puede emplearse esta información? Por ejemplo para desarrollar un sistema portable y sencillo que permita la monitorización cerebral de recién nacidos (neonatos). Este desarrollo puede verse comprometido si la irrigación del cerebro es insuficiente, lo que puede ser fácilmente determinado mediante un sistema envíe luz y detecte si ésta es absorbida a los longitudes de onda donde la hemoglobina presenta picos de absorción, esto es, alrededor de 410 (violeta) y 590 (rojo) nanómetros.

Evidentemente, el ejemplo mostrado para el caso de la hemoglobina es extensible a muchos otros compuestos a encontrar en el cuerpo humano, como proteínas, melanina, agua, colágeno, etc., de los cuales se conoce su espectro de absorción (ver Figura 5.24).

5.8.2. *Scattering*

Los procesos de *scattering* o dispersión ya han sido mencionados a lo largo del presente curso, en particular los procesos de scattering de Rayleigh, Brillouin y Raman. Como ya sabemos, los procesos de *scattering* se generan cuando la luz se encuentra con obstáculos puntuales, siendo redirigida en otras direcciones.

Para entenderlo mejor podemos recordar el ejemplo ya visto que explica por qué el cielo lo vemos de color azul. También puede resultar de ayuda el ejemplo de la Figura 5.25, donde se muestra un experimento en el que se lanza luz láser sobre un vaso en el que se ha diluido cualquier sustancia (pensemos en agua o azúcar, por ejemplo). En la imagen vemos como si se sitúa un detector de manera casi frontal a la fuente, el sistema recogerá parte de la luz enviada, que es dispersada por las partículas de la sustancia. Además, si el detector

¹La hemoglobina es un componente a base de proteína de las células rojas de la sangre, siendo el principal responsable de la transferencia de oxígeno.

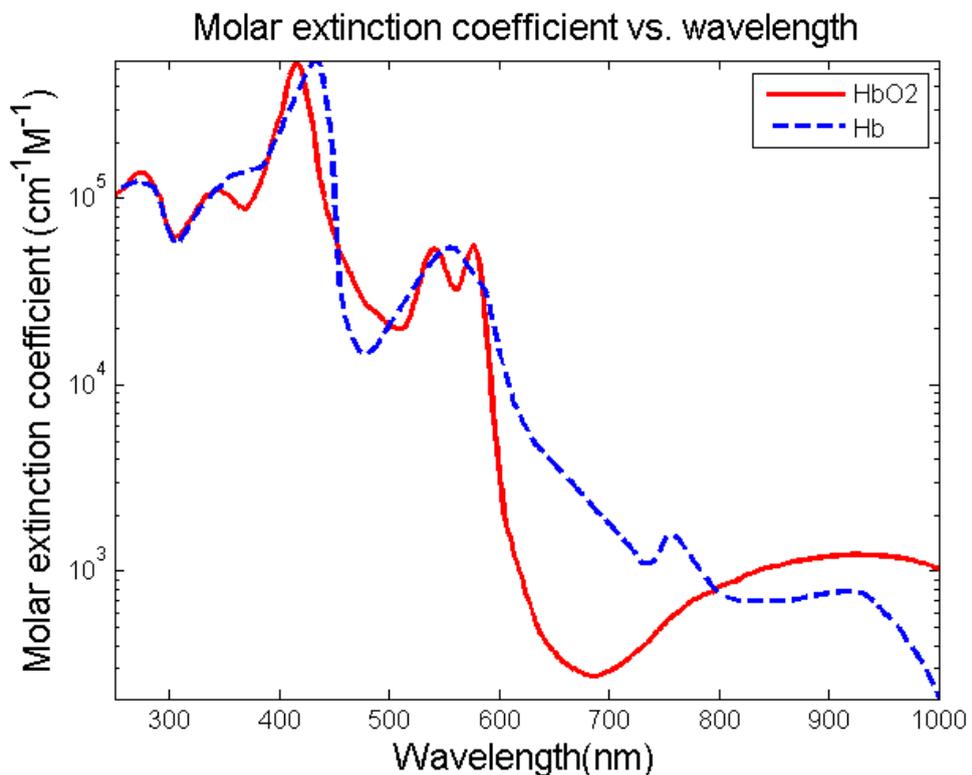


Figura 5.22. Espectro de absorción de la hemoglobina. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2zLhyJ0>



Figura 5.23. Imagen de un recién nacido con un gorro que implementa el dispositivo para la monitorización en tiempo real del nivel de hemoglobina en sangre. Fuente: Bozkurt et al. "A portable near infrared spectroscopy system for bedside monitoring of newborn brain", Biomedical Engineering Online (2005) <https://doi.org/10.1186/1475-925X-4-29>.

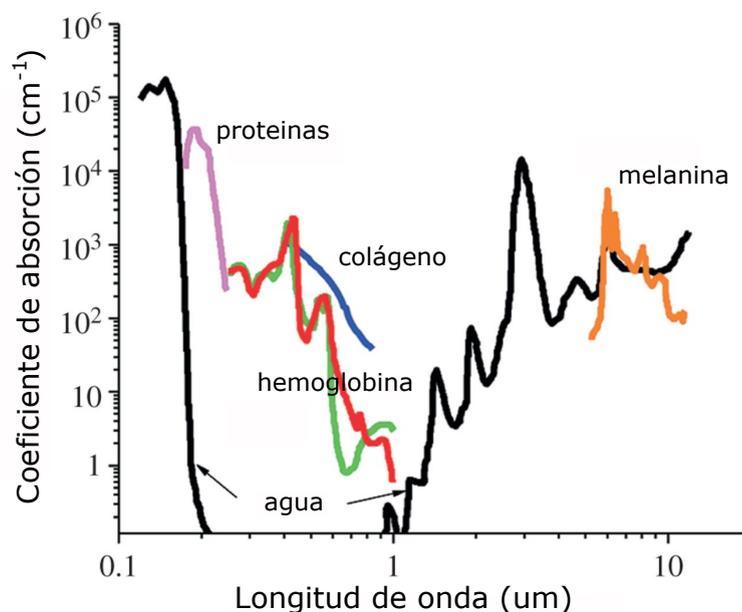


Figura 5.24. Espectro de absorción de diferentes compuestos del cuerpo humano. Fuente: Lacroix et al. “New generation of magnetic and luminescent nanoparticles for in vivo real-time imaging”, Interface Focus.

se va alejando del eje paralelo al láser, éste seguirá recibiendo luz gracias al fenómeno de scattering, cosa que no ocurriría en el vacío, al no existir partículas que pudiesen dispersar la luz.

¿De qué tipo de obstáculos puntuales estamos hablando cuando hablamos del uso del fenómeno de *scattering* en aplicaciones biomédicas? Hablamos de los diferentes elementos que podemos encontrarnos dentro de una célula, por ejemplo. Al igual que con el fenómeno de absorción, el scattering nos puede servir para aplicaciones de diagnóstico y para aplicaciones terapéuticas.

De **diagnóstico**, ya que las características de la luz tras sufrir un proceso de *scattering* dependerán del **tamaño, morfología y estructura** de los componentes en los tejidos. Esto implica que todos estos parámetros podrán ser detectados por medio de las variaciones que induzcan en la luz con la que estemos realizando el análisis. Un ejemplo muy interesante se basa en el uso de estas técnicas para la detección y delimitación de tejido con cáncer. Es de sobra conocido el hecho de que en muchas ocasiones es necesario realizar operaciones o tratamientos en los que es preciso tener claramente delimitado el tejido afectado por esta enfermedad. Sin embargo, la labor del patólogo no es fácil en este sentido. Las técnicas de imagen basadas en el análisis del scattering de la luz permiten identificar el tejido afectado, ya que éste posee unas características especiales que hacen que la dispersión de la luz sea diferente a la del tejido normal.

En la Figura 5.26 se presenta un ejemplo de detección e identificación automática de regiones con tejido tumoral en sus diferentes variantes (del 1 al 6). La idea por tanto es que, con una fuente de luz y un detector apropiados, se pueda llegar a realizar una identificación automática de los tejidos afectados por el cáncer.

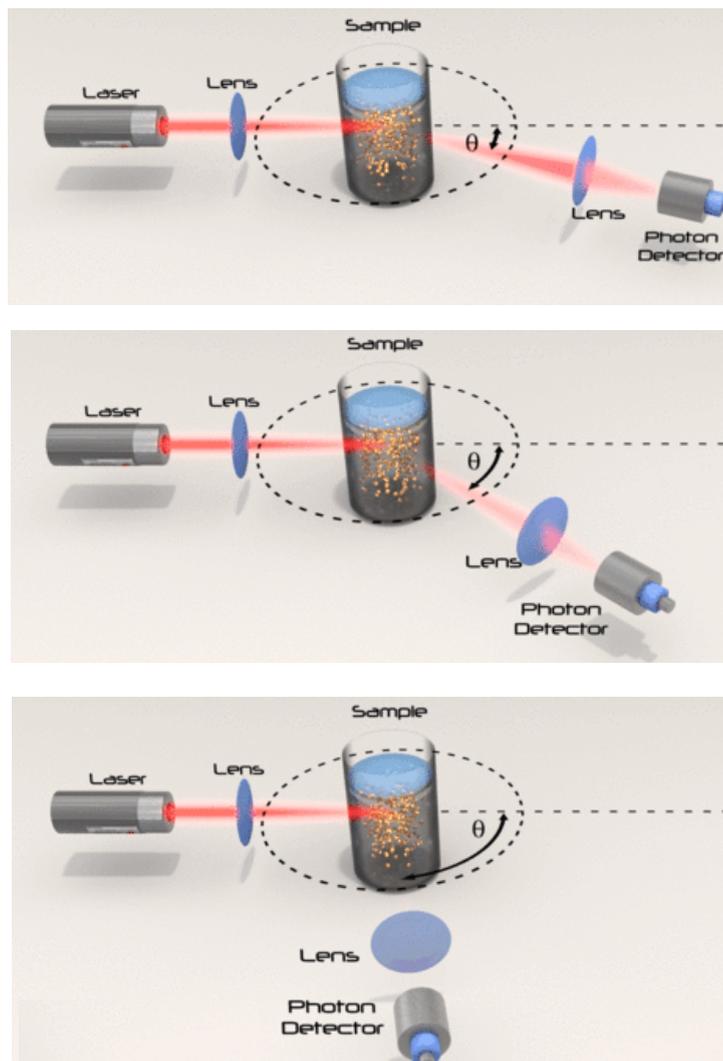


Figura 5.25. Representación esquemática de un experimento en el que existe *scattering* de la luz. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 4.0. <http://bit.ly/2hGAItS>

5.9. Fluorescencia para señalar al cáncer

Dentro de la enorme variedad de técnicas biomédicas derivadas del uso “inteligente” de la luz, vamos a revisar una que es especialmente llamativa, y que se basa en el uso del fenómeno de la fluorescencia. Los fenómenos de **luminiscencia** se basan en la emisión de luz no basada en la temperatura, esto es, en el principio que rige el funcionamiento de las antiguas bombillas de filamento¹. Por el contrario, por luminiscencia se entiende la propiedad que tienen algunos cuerpos de emitir luz “fría”, cuyo origen es otro tipo de radiación electromagnética. La fluorescencia, por ejemplo, está generada radiación ultravioleta; esto es, un cuerpo recibe radiación ultravioleta (no visible para el ser humano) y emite luz en otra zona del espectro, por ejemplo luz visible.

¹En este curso ya hemos revisado los conceptos básicos asociados a este fenómeno.

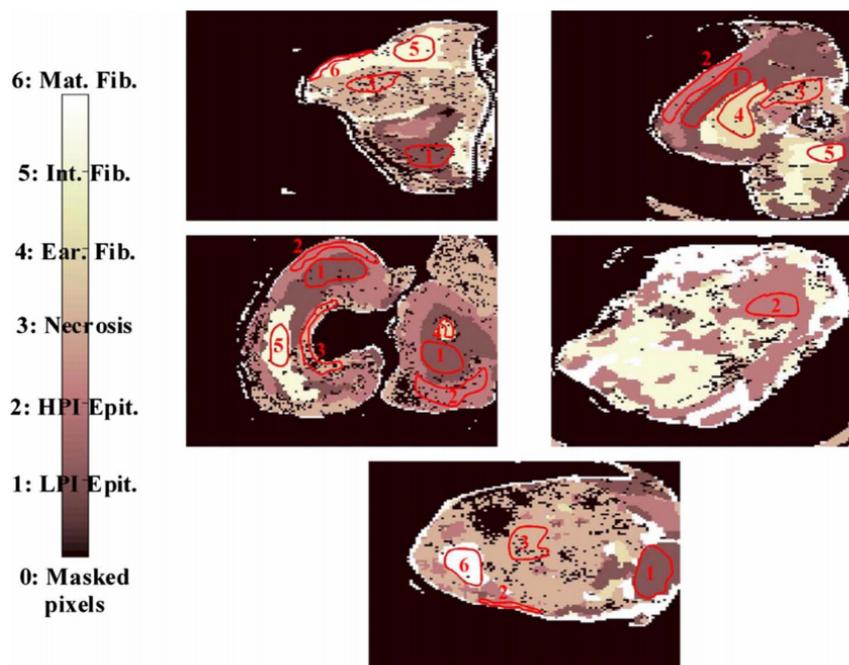


Figura 5.26. Ejemplo de la aplicación de técnicas ópticas a la identificación automática de zonas afectadas por cáncer en diferentes muestras. Fuente: Garcia-Allende et al. “Automated identification of tumor microscopic morphology based on macroscopically measured scatter signatures”, *Journal of Biomedical Optics* (2009).

Cuestión 9.1: Tubo fluorescente

Explica brevemente y **con tus propias palabras** cómo se genera la luz en un tubo fluorescente convencional. No es necesario que expliques la parte eléctrica del proceso.

Desde el punto de vista de su aplicación como “marcador” de células cancerígenas, el proceso a seguir puede ser el siguiente. En primer lugar, es necesario identificar algún compuesto cuya presencia en las células cancerígenas sea diferencial con respecto a las células “sanas”. En el ejemplo que vamos a ver este papel lo desempeñará el ácido fólico. En segundo lugar, es necesario desarrollar un agente que, una vez inyectado en la zona afectada, sea capaz de vincularse sólo a las células cancerígenas. Si, además, este agente es fluorescente, si es iluminado de manera precisa con luz UV, el efecto que tendrá es el que se puede apreciar en la Figura 5.27. Como puede apreciarse en la imagen de la izquierda, es imposible identificar a simple vista las células cancerígenas (en este caso se trata de un cáncer de ovarios). Sin embargo, tras realizar el proceso anteriormente descrito, en la imagen de la derecha las células cancerígenas emiten luz mediante el fenómeno de fluorescencia, por lo que son fácilmente identificables.

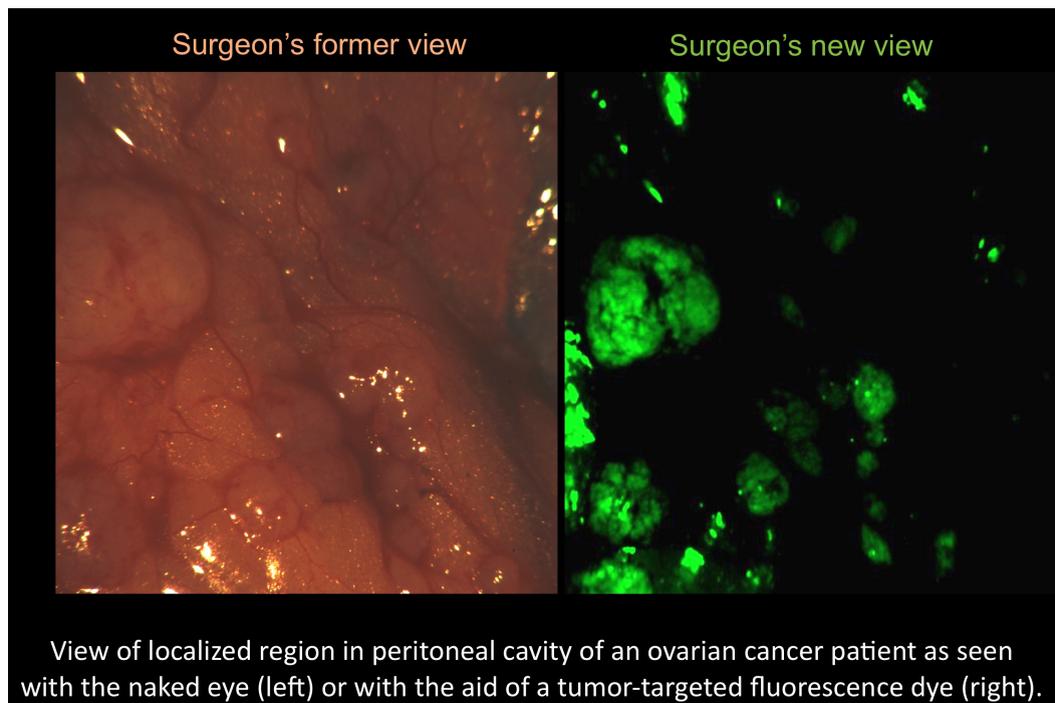


Figura 5.27. Ejemplo de la aplicación de la fluorescencia al marcado de células cancerígenas. Fuente: imagen cortesía de Gooitzen van Dam (Medical News Today) <http://bit.ly/2zL1A57>

5.10. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado un rápido recorrido por algunas de las aplicaciones que nos permiten interactuar con el mundo que nos rodea por medio del uso “inteligente” de la luz. En concreto se han presentado aplicaciones en las que el uso de la luz permite desarrollar sistemas sensores para medir diferentes parámetros en aplicaciones muy distintas. Así, se han presentado:

Aplicaciones en ámbitos industriales como la monitorización de procesos de soldadura por medio de técnicas espectroscópicas.

Aplicaciones en el ámbito de las energías renovables, presentando ejemplos en energía solar fotovoltaica (termografía infrarroja) y en energía eólica, con la monitorización en tiempo real de la pala de un aerogenerador por medio de sensores de fibra óptica.

Aplicaciones en el ámbito de historia/arqueología con el uso de la espectroscopía láser LIBS para la datación de monedas de la época romana o análisis paleo-nutricional de huesos encontrados en enterramientos de la edad media.

Aplicaciones en el ámbito de la medicina con ejemplos como la delimitación de tejido tumoral mediante técnicas de imagen y *scattering* o la monitorización del desarrollo cerebral en neonatos por medio de sistemas basados en la absorción de la luz por diferentes compuestos.

Los ejemplos de aplicación que se han mostrado en este capítulo no son más que “*la punta del iceberg*”, ya que hay muchas otras técnicas que, por limitaciones de espacio, no han podido ser recogidas en este resumen. Se recomienda al lector ávido de más conocimiento que trate

de ir más allá, ampliando la información aquí presentada con otros ejemplos y, por supuesto, consultando al profesor¹ siempre que lo considere necesario.

¹Jesús Mirapeix (Profesor del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria: jesus.mirapeix@unican.es)

Índice de figuras

1.	Ilustración del robot Curiosity analizando la composición de una roca en Marte mediante un sistema LIBS. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público http://bit.ly/2zGvgP5	II
5.1.	Imagen de un teléfono móvil usando la cámara de fotos integrada. Fuente: pixabay. Licencia: CC0 Creative Commons	3
5.2.	Medidor de distancia por láser. Fuente: Wikimedia (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 2.0. http://bit.ly/2zrnRjq	4
5.3.	Imagen térmica (termograma) de una mano (izquierda) y una locomotora de vapor (derecha). Fuente: Wikicommons (izquierda) y pixabay (derecha). Licencia: CC-BY-SA-3.0 / CC0 Creative Commons	5
5.4.	Imagen térmica (termograma) de un generador solar fotovoltaico. Fuente: Wikicommons. Licencia: CC-BY-SA-3.0	5
5.5.	Espectro del Sol. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: Dominio Público. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_AM0_spectrum_with_visible_spectrum_background_(en).png	6
5.6.	Esquema de un espectrómetro. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2yhWqr9	7
5.7.	Imagen de un proceso de soldadura y la luz generada durante el mismo (izquierda) y un espectro de soldadura (derecha). Fuente: Wikimedia Commons (izquierda). Licencia: CC-BY-SA 3.0. Imagen de la derecha: elaboración propia.	8
5.8.	Ejemplo de espectroscopía de emisión aplicado a la monitorización de un proceso de soldadura. Fuente: elaboración propia.	8
5.9.	Ilustración del robot Curiosity analizando la composición de una roca en Marte mediante un sistema LIBS. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público http://bit.ly/2zGvgP5	9
5.10.	Análisis paleo-nutricional desarrollado mediante LIBS. Fuente: Elaboración propia.	10
5.11.	Denario romano de plata. Fuente: <i>X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Roman silver denarii</i> (Pardini et al.).	10
5.12.	Espectro LIBS de un denario de plata (izquierda) y evolución histórica del contenido de cobre en denarios de plata (derecha). Fuente: <i>X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Roman silver denarii</i> (Pardini et al.).	11

5.13. Imagen topográfica de Marte creada en 2001 por el sistema láser MOLA. Fuente: NASA (Jet Propulsion Laboratory). Licencia: Dominio Público. https://go.nasa.gov/2iTd0Hn	12
5.14. Red de difracción grabada en una fibra óptica. Detalles del cambio de índice de refracción y de los espectros de la luz incidente y reflejada. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. http://bit.ly/2ztBRJr	13
5.15. Instalación de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción en el viaductor de Las Navas (año 2000). Fuente: Elaboración propia.	14
5.16. Instalación de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción en la pala de un aerogenerador. Fuente: Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.	15
5.17. Vista del Sol y la Tierra desde la Estación Espacial Internacional. Fuente: Wikimedia (NASA). Licencia: Dominio Público. http://bit.ly/2zSJEuc	17
5.18. Espectro visible. Fuente: Wikimedia (Original modificada). Licencia: Dominio Público. http://bit.ly/2zBGbIV	17
5.19. Imagen de un equipo OTDR. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2yxFPj8	19
5.20. Fotografía de Raman. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio Público. http://bit.ly/2hyfiis8	19
5.21. Representación del fenómeno de absorción de la luz. Fuente: Elaboración propia.	20
5.22. Espectro de absorción de la hemoglobina. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2zLhyJ0	22
5.23. Imagen de un recién nacido con un gorro que implementa el dispositivo para la monitorización en tiempo real del nivel de hemoglobina en sangre. Fuente: Bozkurt et al. "A portable near infrared spectroscopy system for bedside monitoring of newborn brain", Biomedical Engineering Online (2005) https://doi.org/10.1186/1475-925X-4-29	22
5.24. Espectro de absorción de diferentes compuestos del cuerpo humano. Fuente: Lacroix et al. "New generation of magnetic and luminescent nanoparticles for in vivo real-time imaging", Interface Focus.	23
5.25. Representación esquemática de un experimento en el que existe <i>scattering</i> de la luz. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 4.0. http://bit.ly/2hGAItS	24
5.26. Ejemplo de la aplicación de técnicas ópticas a la identificación automática de zonas afectadas por cáncer en diferentes muestras. Fuente: Garcia-Allende et al. "Automated identification of tumor microscopic morphology based on macroscopically measured scatter signatures", Journal of Biomedical Optics (2009).	25
5.27. Ejemplo de la aplicación de la fluorescencia al marcado de células cancerígenas. Fuente: imagen cortesía de Gooitzen van Dam (Medical News Today) http://bit.ly/2zL1A57	26