Capítulo 5

Midiendo el Mundo a través de la Luz: de la Biomedicina a la Obra Civil

5.1 Un sencillo ejemplo de sensor láser . . . 113
5.2 Termografía infrarroja . . . 114
5.3 Espectroscopía . . . 117
5.4 LIDAR: el radar óptico . . . 129
5.5 La fibra óptica como sensor . . . 130
5.6 Sensores puntuales . . . 131
5.7 Sensores distribuidos . . . 133
5.8 Aplicaciones biomédicas de la luz . . . 137
5.9 Fototerapia . . . 143
5.10 Fluorescencia para señalar al cáncer . . . 145
5.11 Terapia fotodinámica . . . 145
5.12 ¿Puede la luz ayudarnos contra el COVID? . . . 148
5.13 Conclusiones . . . 150

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 he 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 procesas 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.



Figura 1. Imagen de un teléfono móvil usando la cámara de fotos integrada. Fuente: pixabay. Licencia: CC0 Creative Commons

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

Cuestión **5.1: 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 dái 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 ecuación[1]:

$$s = v \cdot t \tag{5.1}$$



Figura 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 Tierra[2]. 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 1 captura la radiación en el espectro visible, existen cámaras capaces de capturar la radiación infrarroja: son las denominadas cámaras infrarrojas (IR) o

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

[2] Debido 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.

cámaras térmicas. En la Figura 4 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.

Importante 5.1: Equipos para detectar venas

Todos hemos sufrido en algún momento algún pinchazo, más allá de las vacunas tan presentes en la vida de todos hoy en día, por ejemplo para la extracción de sangre. En algunos casos encontrar una vena adecuada puede ser complicado, por lo que se han diseñado equipos que permiten visualizar las venas del paciente en tiempo real. Estos equipos, que en inglés suelen denominarse "vein finder" o "vein detector", ofrecen imágenes tan interesantes como la de la Figura 3, donde vemos como simplemente dirigiendo el equipo hacia la mano del paciente podemos ver en directo la configuración de las venas de su mano. **¿Cómo funciona este equipo?** Básicamente se trata de emitir **luz infrarroja** sobre la superficie elegida. Esta luz será fundamentalmente absorbida por la sangre, siendo reflejada por el resto de tejidos. Toda esa información es recibida por el equipo, que la procesa y la proyecta sobre la superficie, en este caso la mano, permitiendo ver con gran claridad las venas.



Figura 3. Equipo de detección de venas. Fuente: https://importanceoftechnology.net/. Enlace: https://bit.ly/3oOMlhY

La termografía infrarroja no permite de manera directa conocer la temperatura de cada

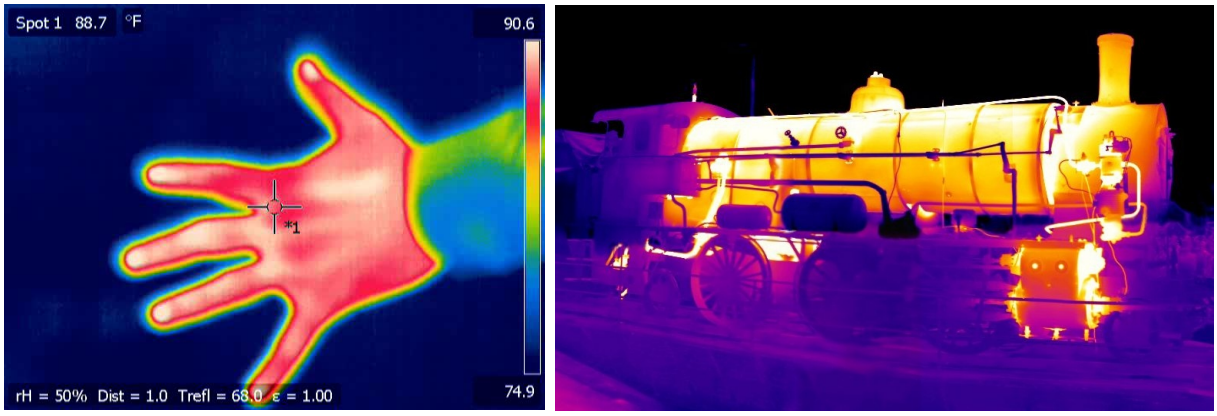


Figura 4. Imagen térmica (termograma) de una mano (izquierda) y una locomotora de vapor (derecha). Fuente: Wikicommons (izquierda) y pixabay (derecha). Licencia: CC-BY-SA-3.0 / CC0 Creative Commons

punto de la imagen, sino la distribución de temperaturas en función del mapa de colores asociados. Para conocer la temperatura exacta es necesario conocer un parámetro, denominado ***emisividad***, del material que se está analizando.

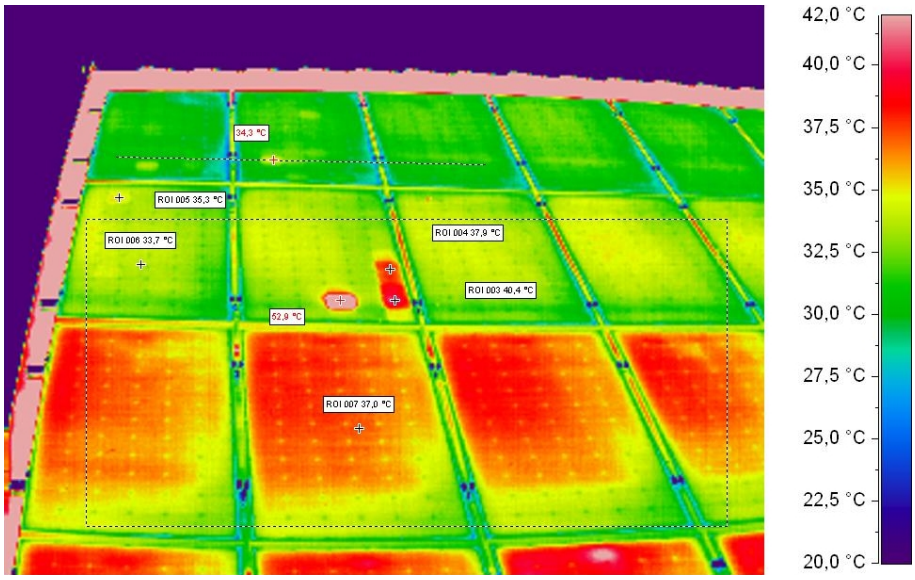


Figura 5. Imagen térmica (termograma) de un generador solar fotovoltaico. Fuente: Wikicommons. Licencia: CC-BY-SA-3.0

Importante 5.2: Imágenes cotidianas a través de una cámara térmica

En el siguiente vídeo podéis observar cómo se aprecian diferentes escenas de la vida cotidiana a través de una cámara térmica. Recordad, estas cámaras lo que hacen es capturar la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, por lo que nos permiten percibir cómo sería nuestra visión si nuestros ojos fuesen capaces de captar esas longitudes de onda.
Enlace al vídeo: https://bit.ly/3kUjbyk

Importante 5.3: 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, en concreto en la parte superior, donde un panel con una temperatura homogénea (en verde) presenta dos puntos más calientes (en rojo).

Cuestión 5.2: 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 interaccione, 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 absorción, de emisión, inducida por láser, etc. Veamos a continuación una breve explicación de los conceptos fundamentales de estas técnicas y algún ejemplo ilustrativo:

5.3.1. Espectroscopía de absorción

La espectroscopía de absorción se basa en el análisis de la luz que, al atravesar ciertos compuestos, es absorbida por estos. La absorción se produce en unos colores o longitudes de onda específicos y asociados de manera (casi) unívoca a dichos compuestos, lo que permite identificarlos. Precisamente con esta técnica se descubrió la composición del Sol, como ya explicamos en el Capítulo 1 de este curso. Veamos como esta técnica es usada en la actualidad para **estudiar la atmósfera de exoplanetas** (planetas que orbitan estrellas lejanas)[1].

¿Cómo es posible que podamos conocer la composición de la atmósfera de planetas situados a enormes distancias de la Tierra? Hay que pensar que estamos hablando de planetas que tan sólo somos capaces de detectar por la variación que producen en la intesidad de la luz que nos llega de su estrella. Precisamente en algunas de las características de esa luz que nos llega está la respuesta a esta pregunta. En la Figura 6 podemos ver una representación de cómo, en determinados momentos, la luz de la estrella atravesará la

[1]Fuente: cuenta de Twitter del Instituto de Astrofísica de Canarias Exoplanets IAC @exoplanets_iac https://bit.ly/32FksNY

atmósfera en su camino hacia la tierra, en particular hacia los instrumentos que la captarán y analizarán.

Los elementos que componen la atmósfera de ese planeta absorberán parte de esa luz y lo harán a unas longitudes de onda específicas, tal y como se representa en la Figura 7, donde vemos que cuando la luz que ya ha pasado por la atmósfera del planeta es dispersada usando por ejemplo un prisma (como ocurre en la formación del arco iris), podemos ver que, junto a los colores ya conocidos aparecen unos líneas negras (parte superior derecha de la imagen) asociadas a esos elementos que han absorbido esos colores. En la parte inferior derecha vemos representado ese "espectro" de absorción de la luz.

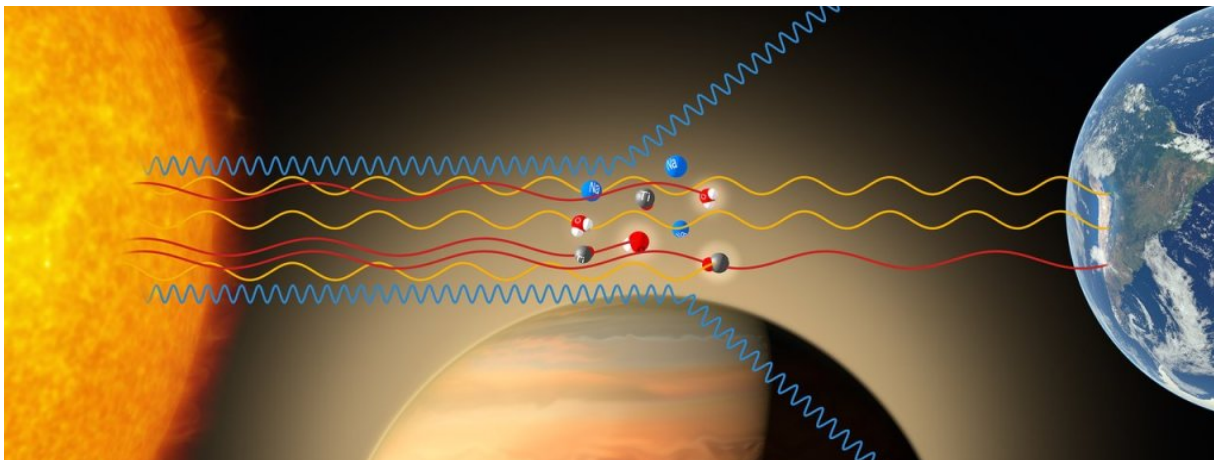


Figura 6. Esquema del uso de la espectroscopía de absorción en el estudio de la atmósfera de exoplanetas. Licencia: European Southern Observatory.

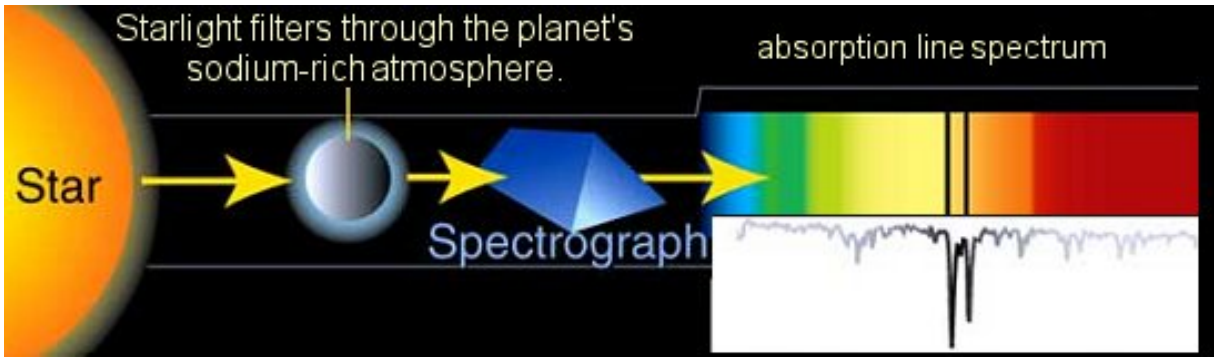


Figura 7. Esquema del uso de la espectroscopía de absorción en el estudio de la atmósfera de exoplanetas (II). Licencia: Exoplanets IAC.

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de un espectro de absorción real, en particular asociado a la atmósfera del exoplaneta WASP-19b, un planeta del tamaño de Jupiter que **se encuentra a 815 años luz de la Tierra**, y cuya órbita es tan cercana a su estrella que la temperatura en su superficie durante el día se estima de unos 2000K. El análisis de la luz mediante espectroscopía de absorción ha permitido determinar que en la atmósfera existe óxido de titanio (TiO), siendo éste el primer planeta en el que se detecta esta molécula.

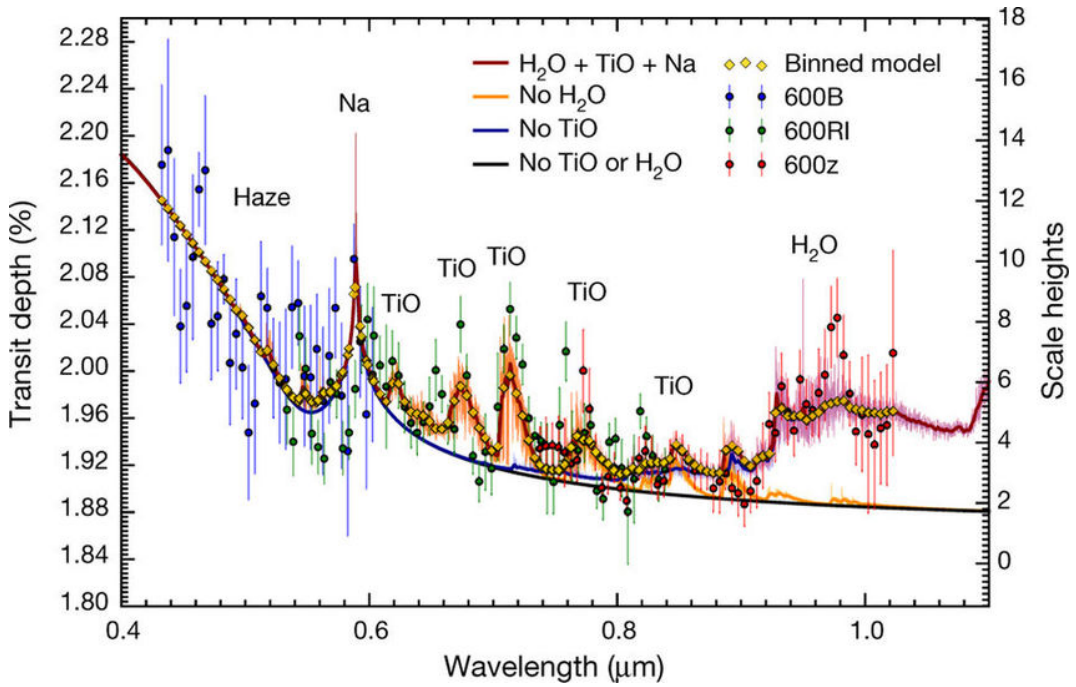


Figura 8. Espectro asociado a la atmósfera del exoplaneta WASP-19b. Licencia: Exoplanets IAC.

Importante **5.4: ¡Midiendo a 815 años luz!**

¿No es increíble? Somos capaces de determinar la composición de la atmósfera de un planeta que está nada más y nada menos que a **815 años luz**. Conviene recordar que hablamos de una distancia resultante de viajar durante 815 años a la velocidad de la luz.

En las técnicas espectroscópicas, ya sean de absorción, emisión o láser, es indispensable 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 9 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.

5.3.2. 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 coloresa (ver Figura 10).

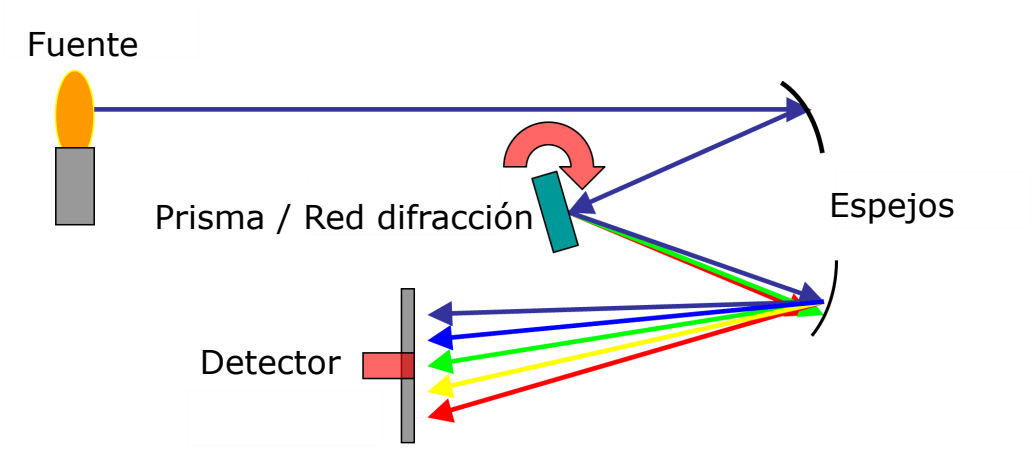


Figura 9. Esquema de un espectrómetro. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2yhWqr9

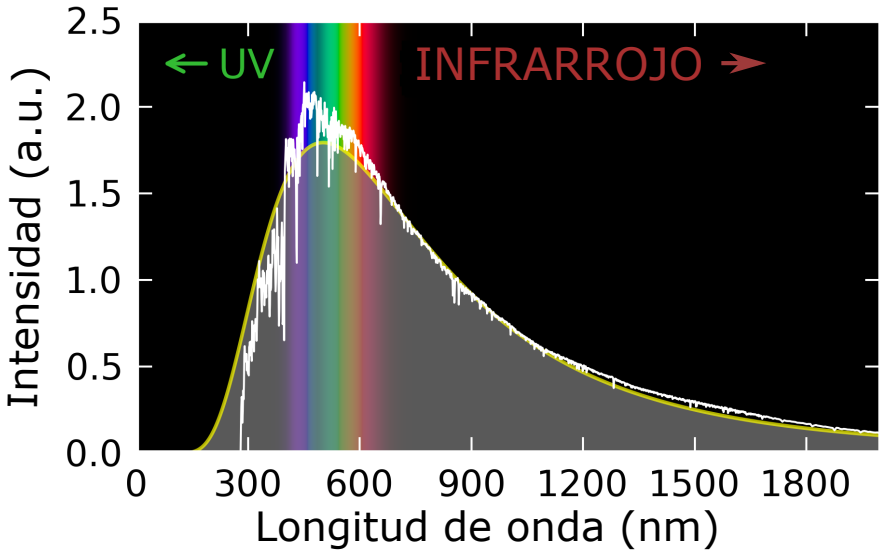


Figura 10. Espectro del Sol. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: Dominio Público. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_AM0_spectrum_with_visible_spectrum_background_(en).png

Un ejemplo de aplicación de la espectroscopía de emisión es el análisis o monitorización[1] 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 11 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

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

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.

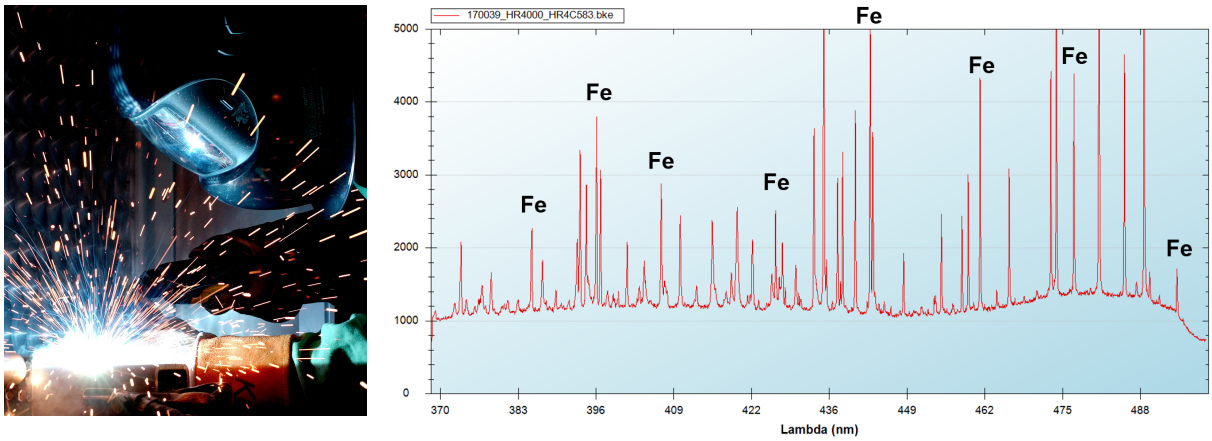


Figura 11. Imagen de un proceso de soldadura y la luz generada durante el mismo (izquierda) y un espectro de soldadura (derecha). Fuente: Wikimedia Commons (izquierda). Licencia: CC-BY-SA 3.0. Imagen de la derecha: elaboración propia.

Importante 5.5: 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 12 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 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.

5.3.3. 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 LIBS[1]. 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.

[1]LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy

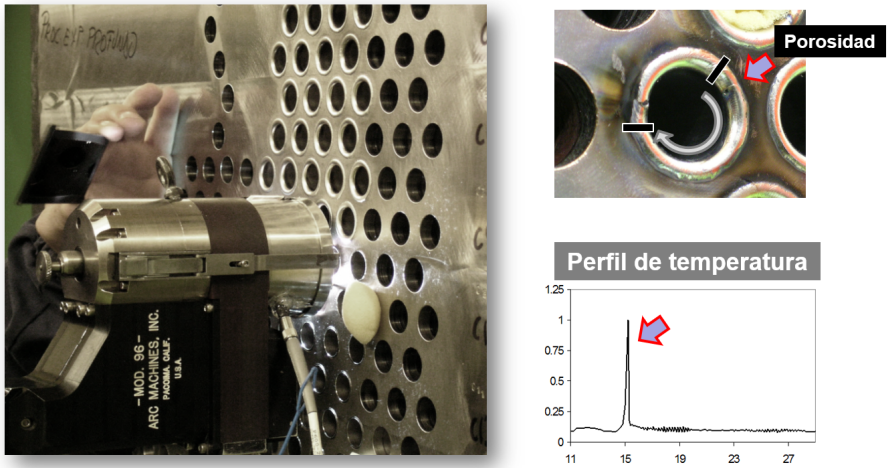


Figura 12. Ejemplo de espectroscopía de emisión aplicado a la monitorización de un proceso de soldadura. Fuente: elaboración propia.

Un muy buen ejemlo de LIBS lo constituye el sistema integrado en el robot Curiosity que desde hace algunos años explora la superficie de Marte[1]. 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 13 ilustra precisamente al Curiosity usando el láser del sistema LIBS para analizar la composición de una roca en Marte.

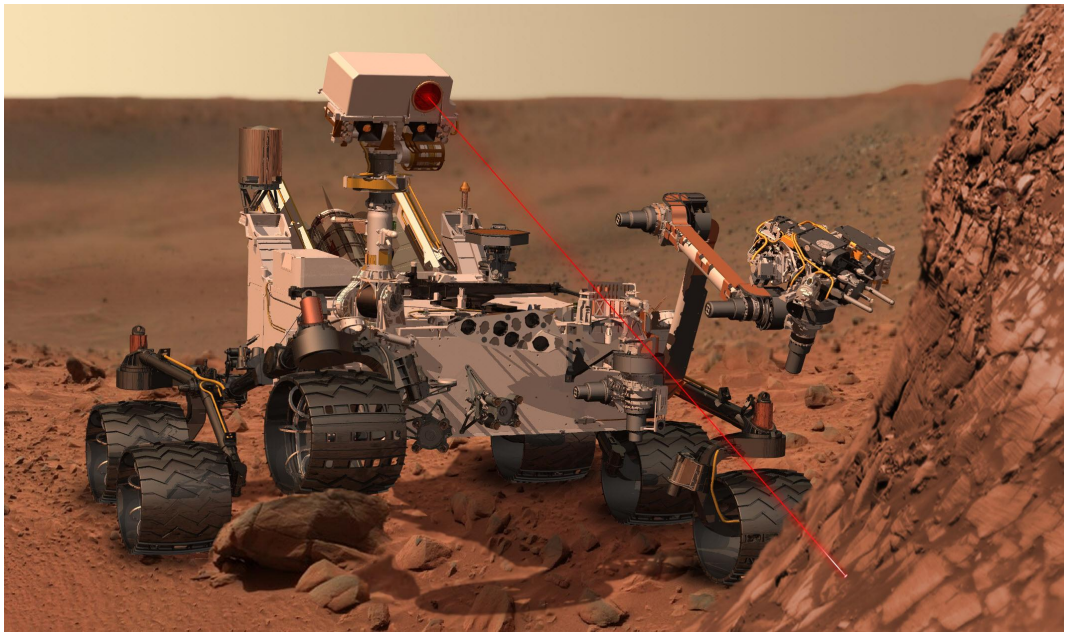


Figura 13. Ilustración del robot Curiosity analizando la composición de una roca en Marte mediante un sistema LIBS. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público http://bit.ly/2zGvgP5

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

Importante **5.6: LIBS**

Por cierto, ya que hablamos del Curiosity, merece la pena incluir la foto realizada por este robot en la superficie de Marte del cielo de este planeta en el que se puede observar la Tierra como un pequeño punto (tan pequeño que igual te cuesta verlo, está en la parte superior izquierda de la imagen) en el firmamento[a] (ver Figura 14). Sin lugar a dudas una imagen evocadora que recuerda a la famosa "pale blue dot" que hiciera famosa Carl Sagan.

[a]Para ponerlo en contexto, la distancia entre ambos planetas en el momento de la foto era de unos 225 millones de kilómetros.



Figura 14. Foto realizada por el Curiosity en la superficie de Marte en la que puede observarse la Tierra en el firmamento marciano. Fuente: NASA.

Importante **5.7: 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 proteinas 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 15, 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.

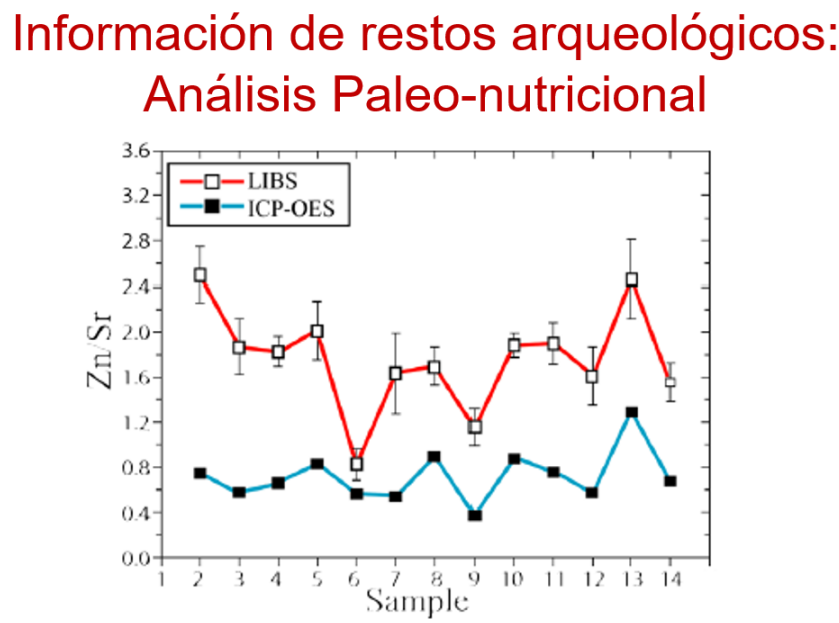


Figura 15. Análisis paleo-nutricional desarrollado mediante LIBS. Fuente: Elaboración propia.

LIBS para datación de momedas 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 16. 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 17 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 16. Denario romano de plata. Fuente: *X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Roman silver denarii* (Pardini et al.).

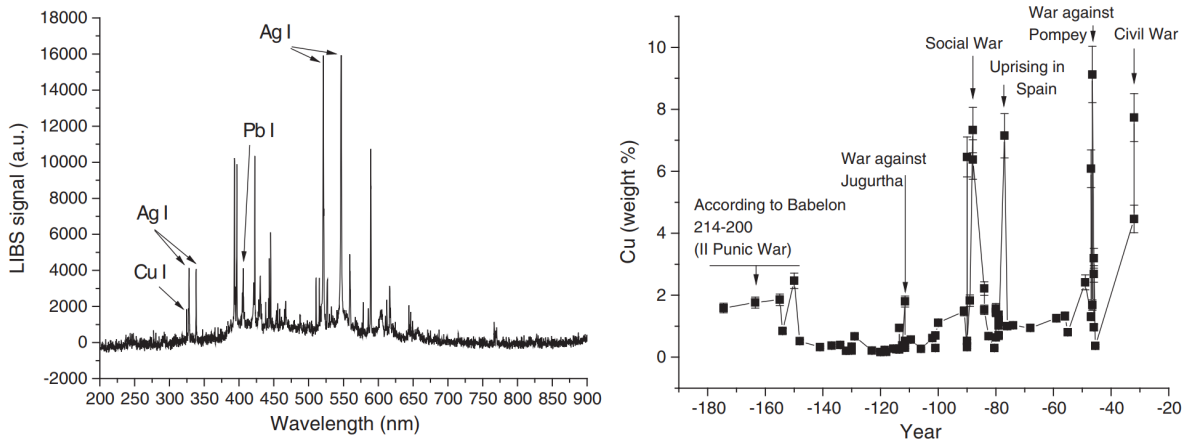


Figura 17. Espectro LIBS de un denario de plata (izquierda) y evolución histórica del contenido de cobre en denarios de plata (derecha). Fuente: *X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Roman silver denarii* (Pardini et al.).

Cuestión **5.3: LIBS**

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

5.3.4. Espectroscopía: ¡miendo distancias en el universo!

Al margen de todas las aplicaciones vistas en esta sección, la espectroscopía también puede servir para determinar la distancia a la que planetas, estrellas o incluso galaxias se encuentran en el universo. ¿Cómo es posible que seamos capaces de determinar dichas distancias? La clave reside en el **efecto Doppler**, fenómeno físico que todos hemos experimentado en alguna ocasión, por ejemplo al escuchar la sirena de un coche de policía acercarse o alejarse de nosotros.

¿Qué ocurre cuando la sirena se acerca hacia nosotros? El sonido de la sirena se va haciendo más agudo; mientras que cuando la sirena se aleja de nuestra posición, el sonido se hace más grave. ¿Cómo puede explicarse este fenómeno?

Empecemos por hablar del sonido: el sonido que nosotros (los humanos) percibimos podemos entenderlo como ondas que se propagan por un fluido, normalmente por el aire (modificando su presión). Así, cuando esas oscilaciones de la presión del aire llegan a nuestros oidos son convertidas en ondas mecánicas y, posteriormente, decodificadas en el cerebro, en concreo en el neocortex. El sonido (sus ondas) se propaga una **velocidad** de 331,5 m/s en el aire[1] y puede tener mayor o menor intensidad, lo que viene determinado por la **amplitud** de la onda. ¿Qué determina entonces que un sonido sea para nosotros más grave o agudo? Su **frecuencia**: si la frecuencia es alta y las ondas viajan "muy juntas", percibiremos un sonido agudo; mientras que si la frencuencia es baja y las ondas viajan más separadas, el sonido que escucharemos será más grave.

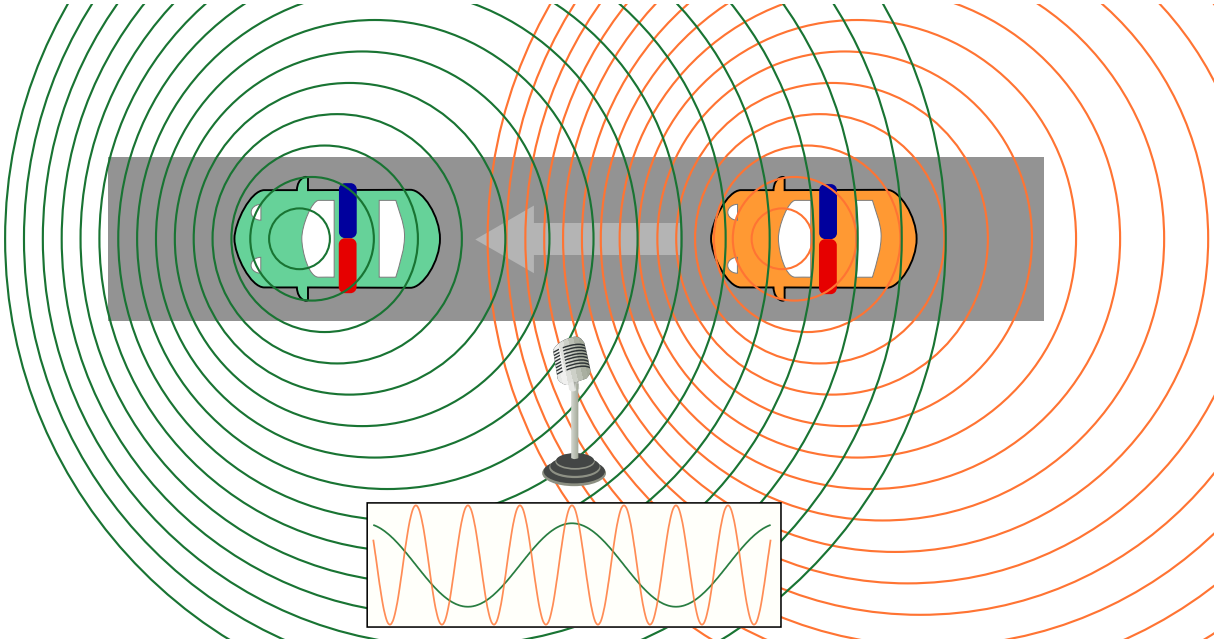


Figura 18. Representación del efeco Doppler. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC-BY-SA-3.0. https://bit.ly/32LXpRs

Precisamente esto es lo que explica el efecto Doppler, tal y como se ha representado en la Figura 18. Cuando el coche naranja con la sirena se acerca, las ondas detectadas por el micrófono cada vez están más juntas (aumenta su frecuencia), haciéndose su sonido más agudo. Por el contrario, cuando la sirena (coche verde) se aleja las ondas se separan, disminuyendo su frencuencia con un sonido resultante más grave.

Para comprender por qué aumenta la frecuencia cuando el coche se acerca al micrófono, pensemos en el siguiente ejemplo: dos personas están situadas a 10 metros, y una de ellas le lanza a la otra una canica cada segundo (por lo tanto, a una frecuencia de 1 Hz). Si las dos personas se mantienen en la misma posición, la frecuencia de llegada de canicas se mantiene constante. Sin embargo, si la persona que las lanza se va acercando a una velocidad

[1] En realidad la velocidad del sonido en el aire depende de la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa.

constante al receptor, éste percibirá un aumento en la frecuencia de llegada de las canicas; esto es: llegarán cada vez más juntas, al igual que ocurre con las ondas sonoras[1].

Todo esto está muy bien pero, ¿qué tiene que ver con medir distancias en el universo? Pues tiene mucho que ver. Comencemos por recordar que somos capaces de analizar el espectro de una estrella, o de la atmósfera de un planeta, usando un dispositivo denominado espectrómetro que es capaz de descomponer la luz en sus diferentes colores o longitudes de onda. De este modo, sabemos qué líneas nos vamos a encontrar en el espectro de, por ejemplo, una estrella, y sabemos a qué longitud de onda deben aparecer (por ejemplo, en una estrella esperamos encontrar líneas asociadas al **hidrógeno**). Así, si las líneas aparecen desplazadas hacia longitudes de onda mayores (frecuencias menores), esto nos indica que la galaxia se está alejando de nosotros (de la Tierra). Desde el punto de vista del espectro óptico, de la luz, esto significa que las líneas se desplazan hacia el color rojo (que, recordemos, tiene una longitud de onda mayor (y una frecuencia menor) que el color azul). Por ello, a esta técnica se le conoce como "red shifting" o **"desplazamiento hacia el rojo"**.

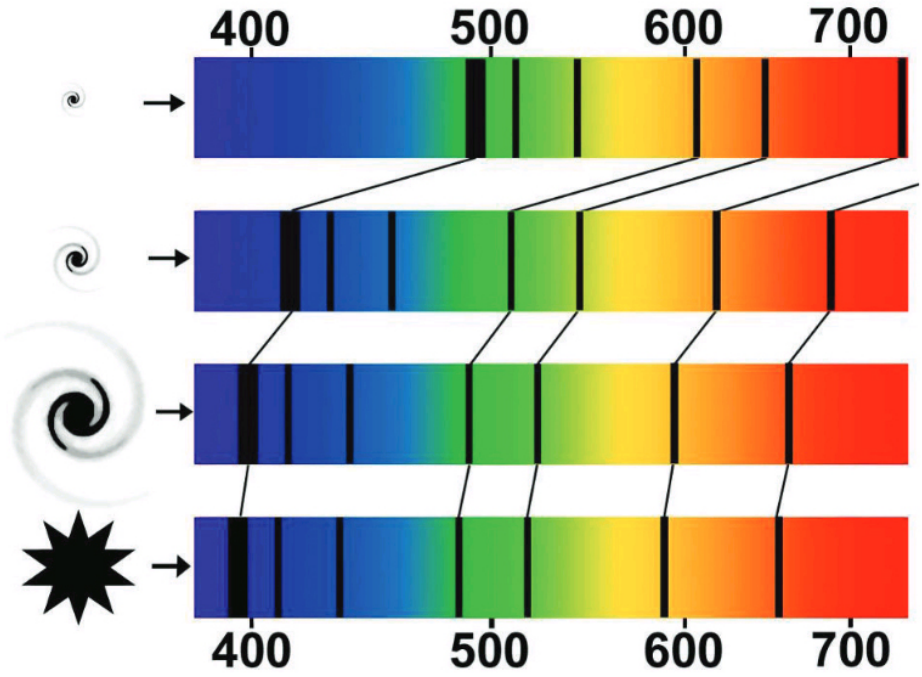


Figura 19. Desplazamiento al rojo de galaxias en función de su distancia a la Tierra. Fuente: blog 20minutos.es https://bit.ly/3py9rHW

En la Figura 19 se muestra un ejemplo de este efecto. En la parte inferior de la figura tenemos un espectro de referencia, que podría ser el del Sol. A medida que subimos en la gráfica nos encontramos con espectros asociados a galaxias más lejanas, lo que hace que éstos se desplacen hacia el rojo, tal y como hemos comentado. Este efecto puede apreciarse algunas líneas espectrales específicas, marcadas en negro sobre el mapa de colores. Por ejemplo, la línea espectral del Sol que aparece en aproximadamente 510 nanometros (en la zona del verde), va desplazándose hacia el rojo a medida que las galaxias están más lejanas,

[1] Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Doppler

llegando a estar aproximadamente en los 650 nanometros en el caso de la galaxia más lejana representada.

¿Y cómo se estima la distancia a esos objetos tan lejanos? Muy sencillo. Cuánto más lejano esté el objeto (estrella, galaxia) en cuestión, mayor será su desplazamiento al rojo. Así es como, comprendiendo cómo cambia el sonido de una sirena que se acerca o aleja de nosotros, y por medio del análisis de la luz de las estrellas, somos capaces de "medir" la distancia a la que se encuentran de nosotros.

Importante **5.8: Un universo en expansión**

Como quizás sepas, el universo se encuentra en expansión, o al menos, eso es lo que sostienen las teorías cosmológicas más aceptadas a día de hoy, así como un gran número de observaciones que parecen confirmarlas. Esta expansión sería un resultado del Big Bang y hace que la distancia entre galaxias aumente, hecho por el cual se produce ese desplazamieno al rojo que hemos estado explicando en esta sección. Obviamente, si la distancia entre una galaxia lejana y nosotros (tomando la Tierra como punto de referencia) fuese constante, no apreciaríamos ningún desplazamiento al rojo.
De hecho, la teoría conocida como "expansión acelerada del universo" sostiene, como siempre en base a evidencias científicas, que la velocidad de expansión del universo es cada vez mayor. La explicación a este hecho se encontraría en un tipo de energía que aún no hemos sido capaces de detectar de forma directa: **la energía oscura**.
¿A qué velocidad se alejan las galaxias de nosotros? Galaxias que se encuentran a unos 50 millones de años luz (por ejemplo, en el cúmulo de Virgo) se alejan de nosotros a velocidades que oscilan entre los 1000 y 2000 kilómetros por segundo. Galaxias más lejanas, como las del supercúmulo de Coma de Berenice, a 300 millones de años luz, se alejan a velocidade de entre 7000 y 8500 kilómetros por segundo[a].

[a] Fuente: blog 20minutos.es https://bit.ly/3py9rHW.

Cuestión **5.4: ¿Velocidades distintas en el universo?**

Revisa brevemente lo que acabamos de comentar en el recuadro anterior: ¿tiene sentido que existan diferentes velocidades de "alejamiento" de las galaxias?
¿Por qué crees que las galaxias más lejanas se alejan de nosotros a una velocidad mayor?



Figura 20. Imagen que muestra parte de las galaxias cúmulo de Virgo. Fuente: European Southern Observatory (ESO). Chris Mihos (Case Western Reserve University)/ESO. Licencia: CC-BY-4.0.https://bit.ly/3f7TXpe

Importante **5.9: ¿Desplazamiento al azul?**

En un universo en expansión, ¿es posible que exista **desplazamiento al azul**? Esto es, ¿hay estrellas u otro tipo de objetos celestes que, en vez de alejarse, se estén acercando a la Tierra? La respuesta es **sí**. En términos generales, todas las galaxias se alejan de nosotros, ya que como hemos visto el universo parece estar en expansión. Sin embargo, a nivel local este fenómeno se ve perturbado por el efecto de la gravedad: las galaxias cercanas se atraen por efecto de la gravedad, agrupándose en lo que se denominan cúmulos y grupos (cúmulos más pequeños). Nuestra galaxia, la Vía Láctea, pertenece al denominado **Grupo Local**.
Así por ejemplo, Andrómeda, galaxia perteneciente al Grupo Local y situada a una distancia de 2537 millones de años luz de la Tierra, se aproxima a la Vía Láctea a una velocidad de 60 kilómetros por segundo. De este modo, se estima que en 4000 millones de años la Vía Láctea y Andrómeda se fusionarán.

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,

[1]LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging

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 21 se muestra un ejemplo de imagen topográfica de Marte creada con el sistema láser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter / Altímetro láser en órbita de Marte).

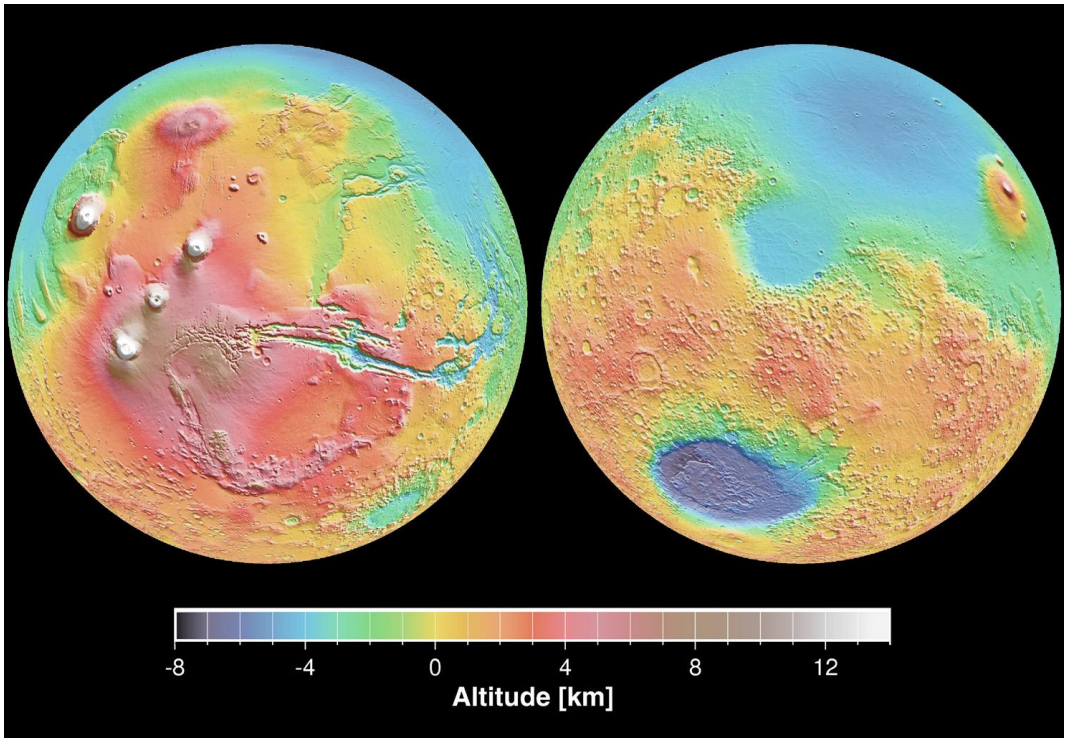


Figura 21. Imagen topográfica de Marte creada en 2001 por el sistema láser MOLA. Fuente: NASA (Jet Propulsion Laboratory). Licencia: Dominio Público. https://go.nasa.gov/2iTd0Hn

Cuestión **5.5: 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 Bragg[1]. 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 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 tensión[2] que sufra la fibra, con lo que se tiene un sensor de temperatura y tensión (strain).

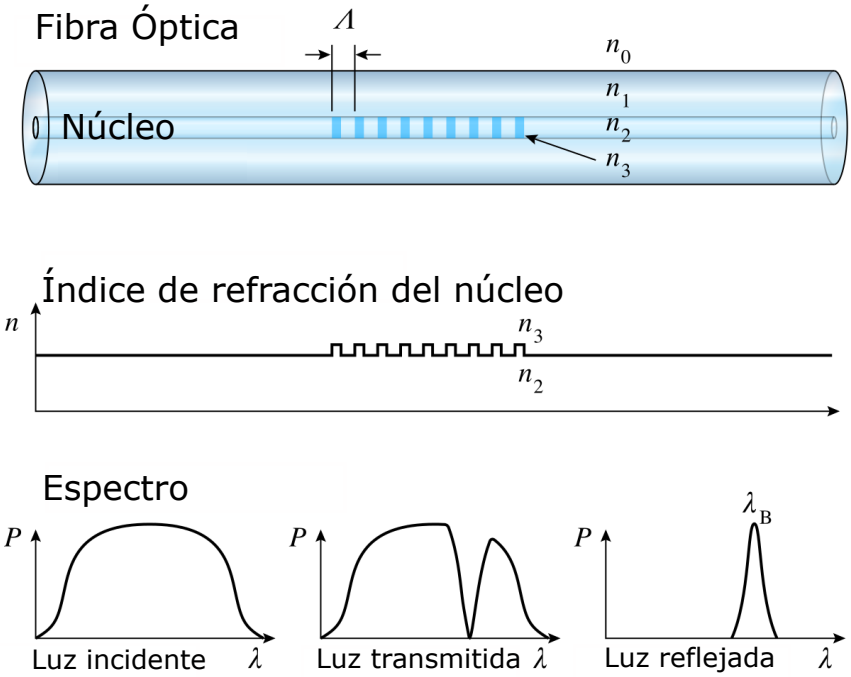


Figura 22. Red de difracción grabada en una finbra óptica. Detalles del cambio de índice de refracción y de los espectros de la luz incidente y reflejada. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0. http://bit.ly/2ztBRJr

En la Figura 22 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*.

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

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



Figura 23. Instalación de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción en el viaductor de Las Navas (año 2000). Fuente: Elaboración propia.

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 23 se han incluido imágenes de la instalación y prueba de un sistema sensor basado en múltiples redes de difracción[1] 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 (*Fiber Bragg gratings*), en infinidad de sectores. En el sector de las **energías renovables** existe una gran demanda de aplicaciones que involucren monitorización y sensado[2]. Un ejemplo son los aerogeneradores, que llegan a generar decenas de señales de control para

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

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

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 turbulencias[1].

En la Figura 24 se muestra el proceso de instalación de un sensor de fibra óptica basado en un *grating* en la pala de un aerogenerador.

Importante 5.10: 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 5.11: 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/ouxPbOuTKcE

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 sensado 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

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

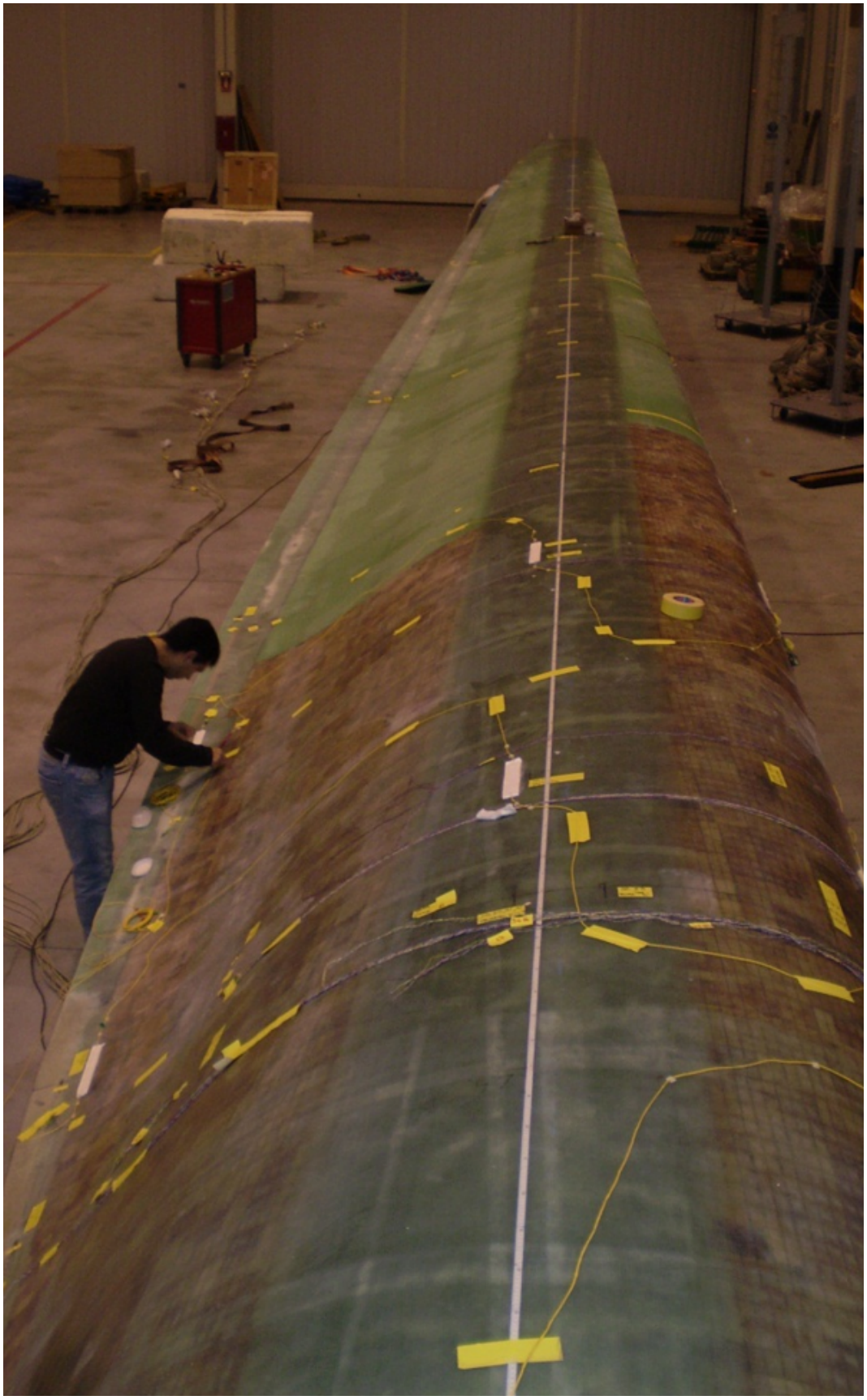


Figura 24. Instalación de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción en la pala de un aerogenerador. Fuente: Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.

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?



Figura 25. Vista del Sol y la Tierra desde la Estación Espacial Internacional. Fuente: Wikimedia (NASA). Licencia: Dominio Público. http://bit.ly/2zSJEUc

Efectivamente, tal y como se aprecia en la Figura 25, 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: a menor longitud de onda, mayor es la intensidad del scattering resultante. Una fórmula simplicada podría ser tal que:

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

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 26 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.

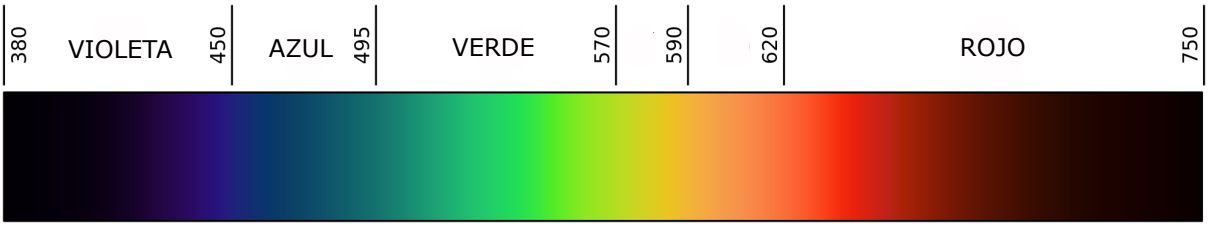


Figura 26. Espectro visible. Fuente: Wikimedia (Original modificada). Licencia: Dominio Público. http://bit.ly/2zBGbIV

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 **5.12: 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 OTDR[1] 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 27 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 analilzada. El "pico" que aparece a continuación es indicativo de una conexión mecánica en la fibra (mediante el uso de una transción). Finalmente, cuando la señal empieza a ser ruidosa, quiere decir que el canal de fibra finalizó.

Al igual que el *scattering* de Rayliegh 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.

[1] *Optical Time Domain Reflectrometry* / Reflectrometría óptica en el dominio del tiempo.

Importante 5.13: 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.

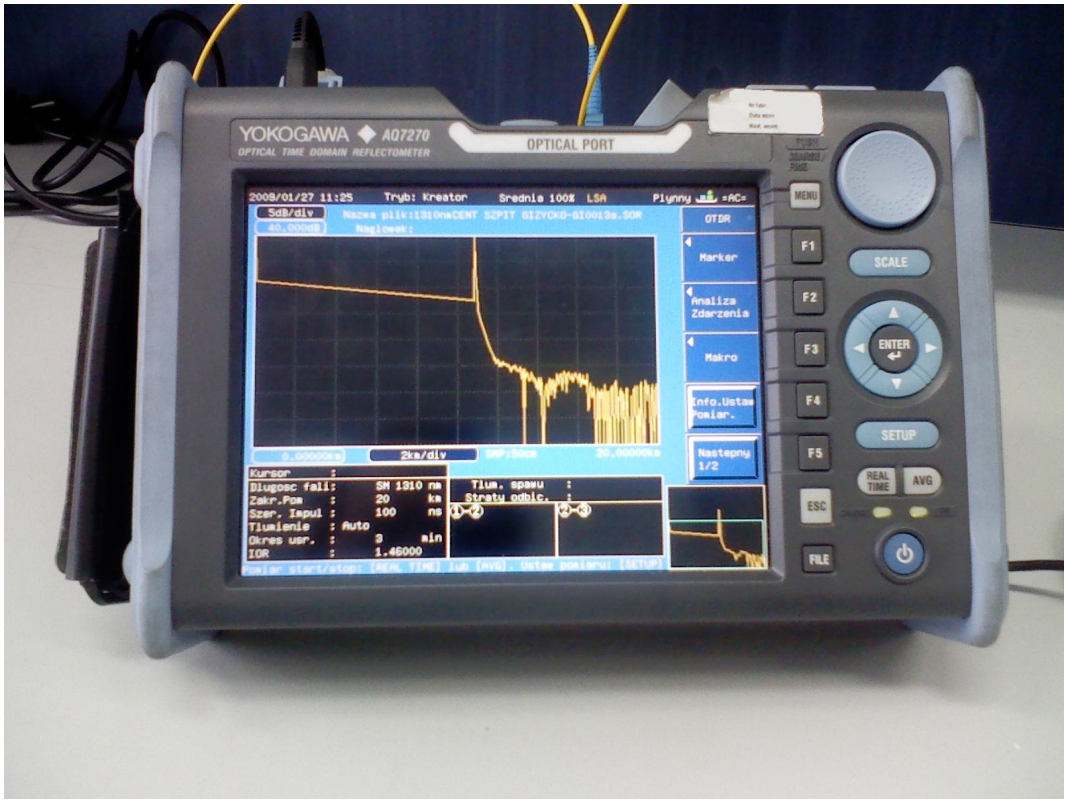


Figura 27. Imagen de un equipo OTDR. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2yxFPj8

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.



Figura 28. Fotografía de Raman. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio Público. http://bit.ly/2hyfiis8

Cuestión **5.6: Sangre azul**

Trata de encontrar alguna explicación de caracter "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 29[1].

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 29 se realiza por media de la conocida como Ley de Beer-Lambert:

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{\alpha \cdot L} \tag{5.3}$$

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

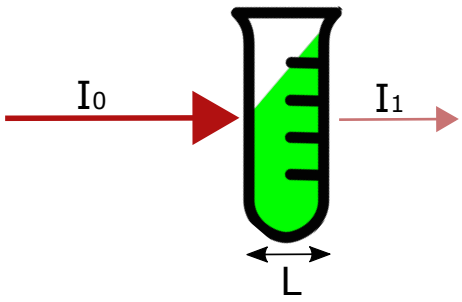


Figura 29. Representación del fenómeno de absorción de la luz. Fuente: Elaboración propia.

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.

Cuestión 5.7: 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 terapeúticos. ¿Por qué la absorción puede servir como herramienta diagnóstica? La respuesta es sencilla si recordarmos 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 30 se ha representado el espectro de absorción de la hemoglobina[1], 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) nanometros.

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

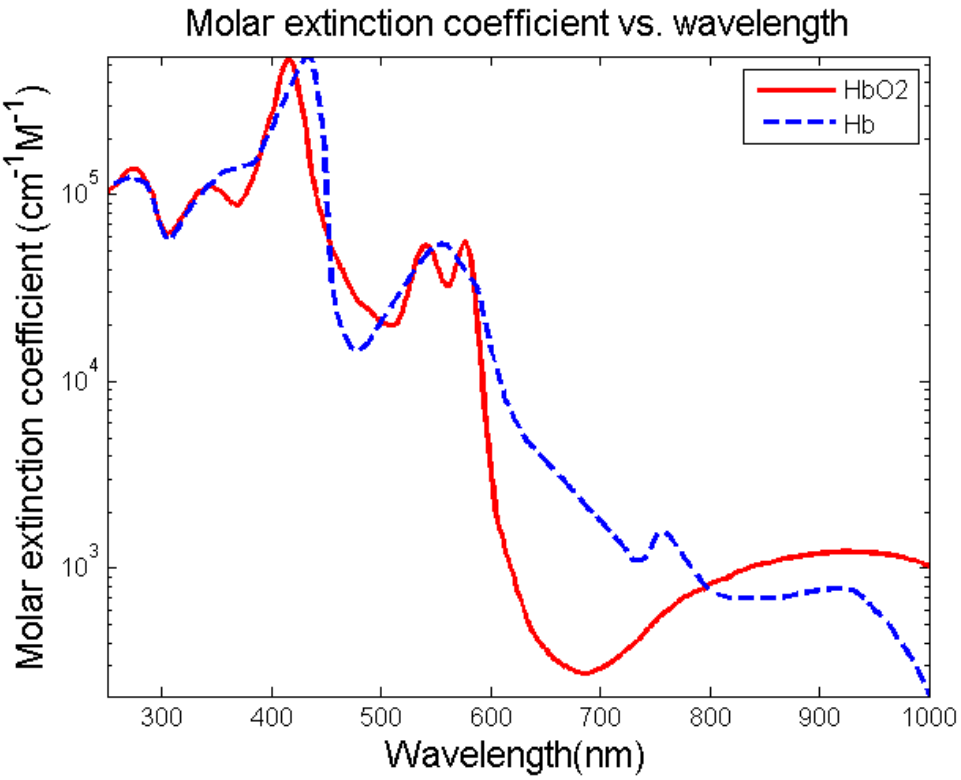


Figura 30. Espectro de absorción de la hemoglobina. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. http://bit.ly/2zLhyJO



Figura 31. 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.

Evidentemente, el ejemplo mostrado para el caso de la hemoglobina es extensible a muchos otros compuestos a encontrar en el cuerpo humano, como proteinas, melanina, agua, colágeno, etc., de los cuales se conoce su espectro de absorción (ver Figura 32).

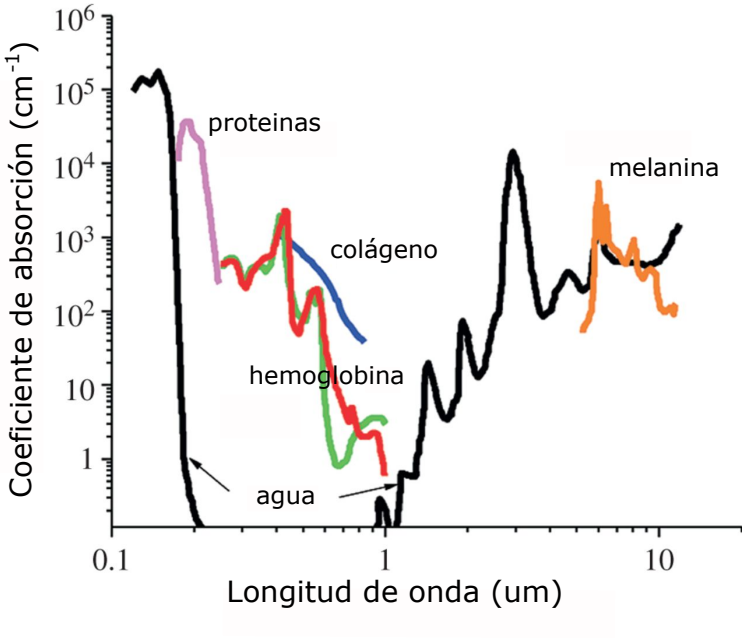


Figura 32. Espectro de absorción de diferentes compuestos del cuerpo humano. Fuente: Lacroix et al. "New generation of magnetic and luminescent nanoparticles for in vivo real-time imaging", Interface Focus.

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 33, 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 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 terapeúticas.

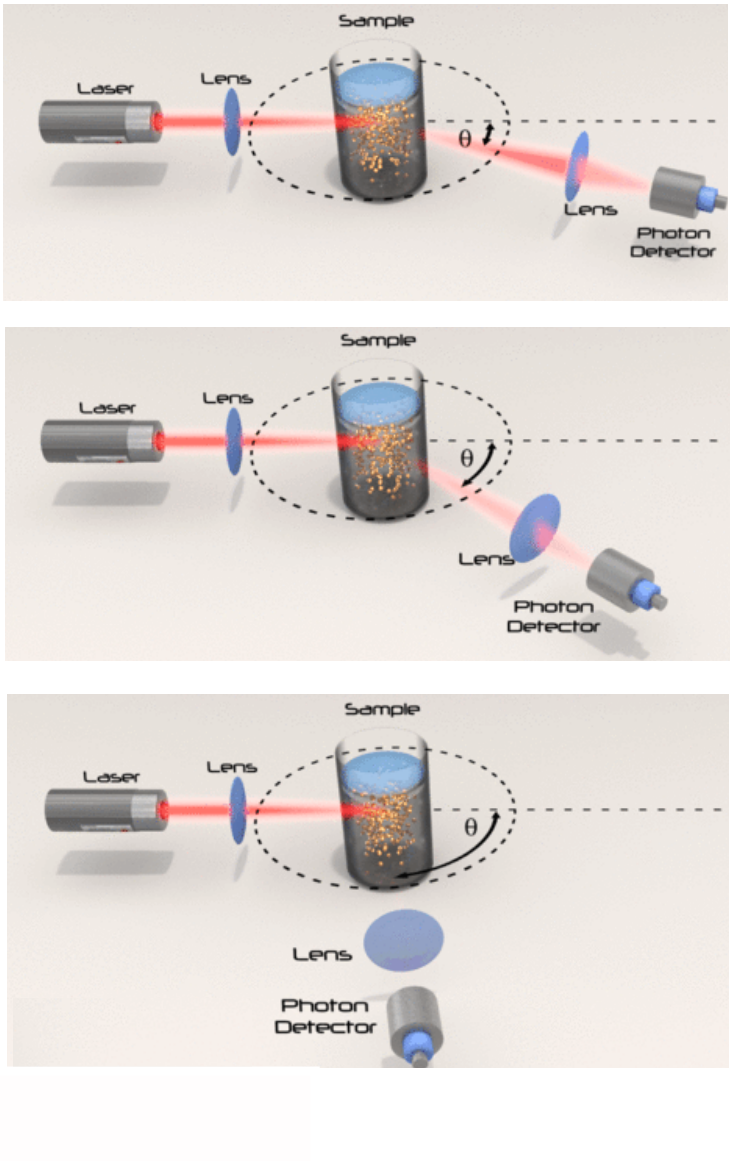


Figura 33. Representación esquemática de un experimento en el que existe *scattering* de la luz. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 4.0. http://bit.ly/2hGAItS

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 34 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.

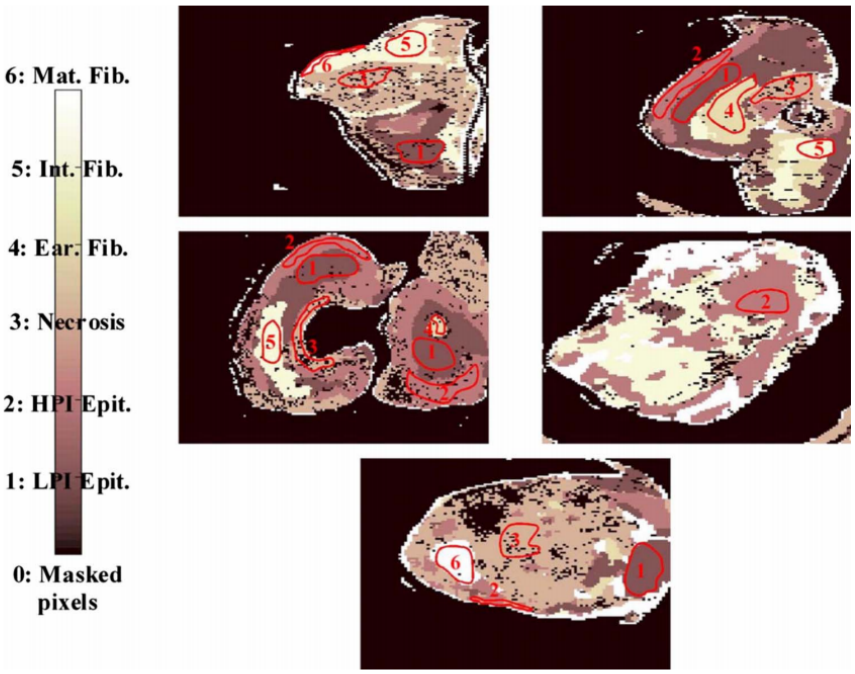


Figura 34. Ejemplo de la aplicación de técnicas ópticas a la identificación automática de zonas afectadas por cáncer en diferentes muestras. Fuente: Garcia-Allende et al. "Automated identification of tumor microscopic morphology based on macroscopically measured scatter signatures', Journal of Biomedical Optics (2009).

5.9. Fototerapia

En términos generales, el término **fototerapia** se suele emplear para referirse al uso de fuentes de luz láser o LED para el tratamiento de diferentes enfermedades dermatológicas. En este tipo de tratamiento se pueden emplear distintos "tipos" de luz, desde luz cercana al ultravioleta (350 nm) hasta luz asociada al infrarrojo cercano (alrededor de unos 1000 nm). En este sentido es interesante analizar cómo cada "color" de la luz, o longitud de onda concreta, es capaz de penetrar de manera distinta en nuestra piel. En la Figura 35 se puede observar cómo las longitudes de onda más pequeñas, en el rango de los 150 a 600 nm (desde el ultravioleta al naranja) tiene una capacidad de penetración limitada, por lo que esos colores serán utilizados para tratar afecciones de las capas más externas de la piel. Por otro lado, la luz de color rojo es capaz de penetrar más en nuestra piel, por lo que se puede usar para tratar tejidos más profundos. El principio de funcionamiento de la fototerapia se basa en que la luz empleada es absorbida por los cromóforos de las células de nuestra piel, activando así (supuestamente) una mayor respuesta celular que puede favorecer la cicatrización y reparación de tejidos.

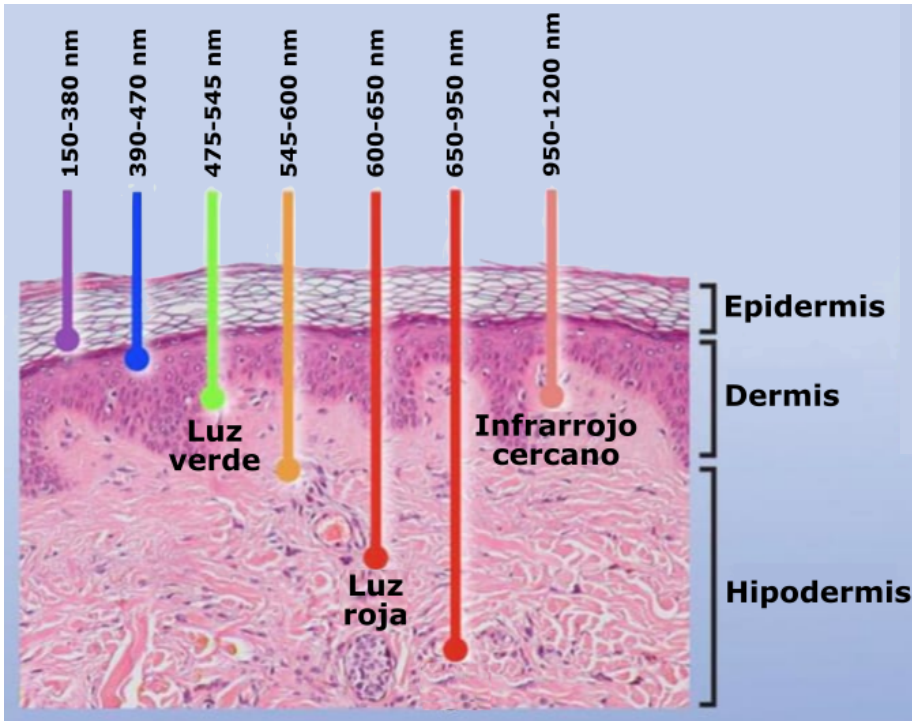


Figura 35. Penetración de la luz de diferentes colores en la piel. Fuente: "Low-level laser (light) therapy (LLLT) in skin: stimulating, healing, restoring". Enlace: https://bit.ly/3GVm73D.

Dentro de la fototerapia existe una variante denominada **LLLT**: ***Low Level Light Therapy***, o **terapia de luz de baja intensidad**, donde se emplean fuentes de luz poco intensas para tratamientos fundamentalmente cosméticos, ya que se cree que la luz puede tener efecto sobre las arrugas, cicatrices o quemaduras. Existen ya equipos comerciales basados en esta tecnología que pueden adquirirse, pero en muchos casos aún no está clara su efectividad real. Un ejemplo lo tenemos en la máscara Led Berillium (ver Figura 36) de tratamiento facial, que asegura que "rejuvenece la piel sin dañarla".



Figura 36. Máscara de fototerapia LED Berillium. Fuente: berillium.com. Enlace: https://bit.ly/3E5refN.

5.10. 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 filamento[1]. 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.

Cuestión 5.8: 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 37. 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.

5.11. Terapia fotodinámica

La terapia fotodinámica emplea la luz, como su propio nombre indica, para **destruir las células tumorales** sin afectar a los tejidos sanos circundantes. En la Figura 38 se muestra de manera esquemática su funcionamiento, que puede resumirse en los siguientes pasos:

Se inyecta al paciente una sustancia denominada fotosensibilizador

Se aplica luz de una determinada longitud de onda para "activar" el fotosensibilizador

Se libera un tipo determinado de oxígeno que ataca a la células cancerígenas

Una de las claves de este proceso es que el **fotosensibilizador** es una sustancia que permanace durante más tiempo en las células cancerígenas. Así, pasadas unos 24 horas las

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

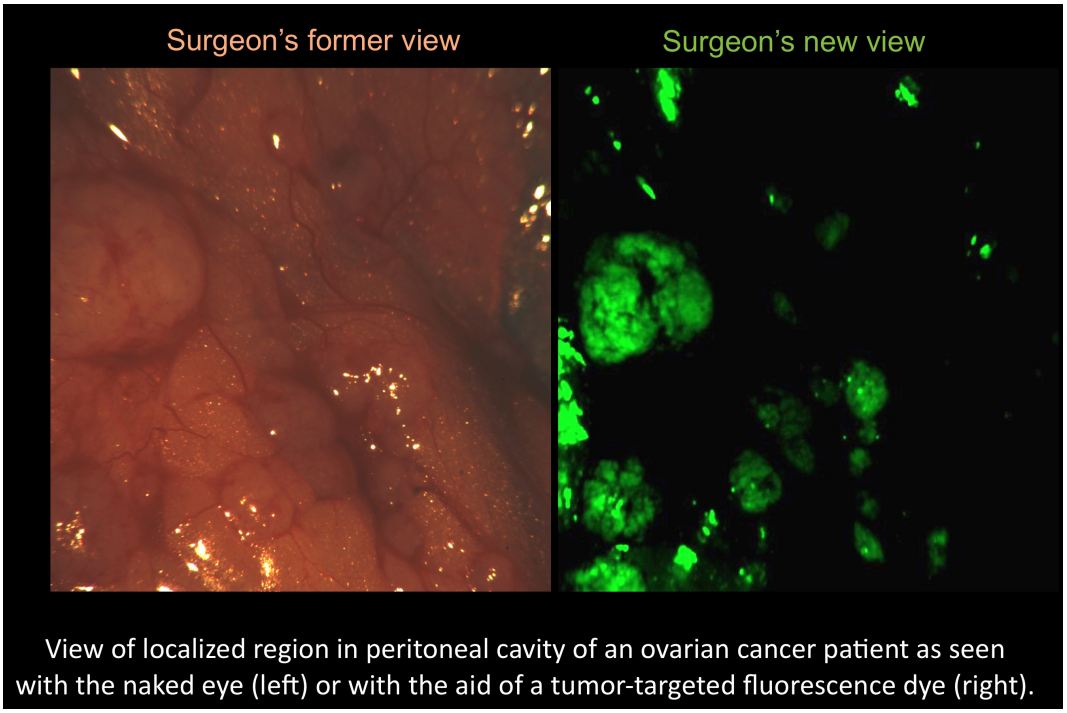


Figura 37. Ejemplo de la aplicación de la fluorescencia al marcado de células cancerígenas. Fuente: imagen cortesía de Gooitzen van Dam (Medical News Today) http://bit.ly/2zLlA57

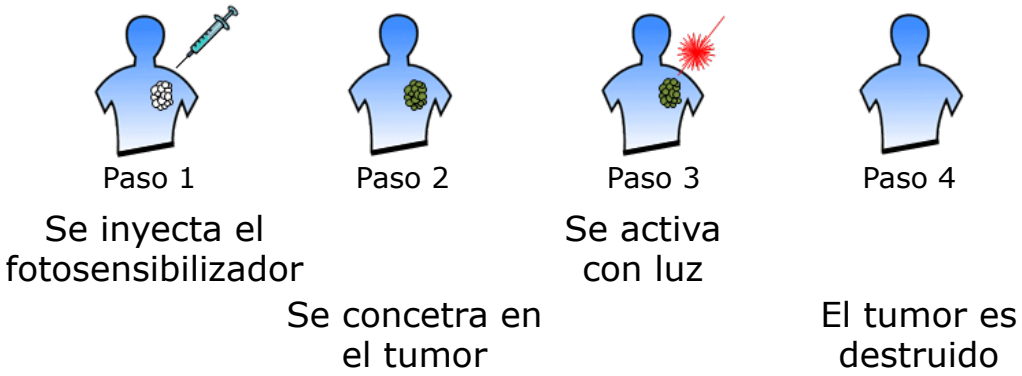


Figura 38. Representación esquemática del funcionamiento de la terapia fotodinámica. Fuente: Photolitec. Enlace: http://bit.ly/2Lsmdsx

células normales ya se han liberado del fotosensibilizador, por lo que éste se puede activar mediante luz sin peligro para los órganos sanos. Cada fotosensibilizador puede ser activado por una longitud de onda específica, por lo que se pueden diseñar fuentes de luz, por ejemplo mediante LEDs o láser asociadas. En términos generales la luz puede penetrar poco en los tejidos del cuerpo humano, por lo que esta terapia es adecuada en principio para tratar afecciones de la piel o de órganos situados por debajo de ésta. Sin embargo, existe la posibilidad de guiar la luz hacia otros puntos de manera poco invasiva mediante un endoscopio que contenga una fibra óptica.

En cuanto a las longitudes de onda empleadas en este tratamiento, las típicas se sitúan entre los **600 y 800 nm**. Por debajo de los 600 nm la absorción por parte del cuerpo humano es muy alta, por ejemplo por parte de la hemoglobina, lo que hace poco apropiado a este

tratamiento si se quiere profundizar algo en los tejidos para alcanzar a las células cancerígenas. Por otro lado, los fotones de longitudes de onda por encima de 800 o 900 nm no disponen de la energía suficiente para generar las reacciones necesarias. Existe algún fotosensibilizador por debajo de los 600 nm, por ejemplo el ALA-5, que tiene su principal pico de absorción en los 410 nm. Este pico podria usarse para tratamiento superficial, por ejemplo en la piel. En caso de tener que tratar una zona con algo de profundidad se podría usar otro pico del ALA-5 (tiene otro pico en los 635 nm) o utilizar otro fotosensibilizador. Por hacernos una idea, alrededor de los 600 nm la luz puede penetrar unos 4 mm, pasando a unos 8 mm si nos situamos cerca de los 800 nm.

En la terapia fotodinámica la luz excita al fotosensibilizador y la energía generada en este proceso es transferida al O2 (oxígeno molecular) y da lugar al denominado **"oxígeno singlete"**, así como a otros tipos reactivos de oxígeno, que forman una cadena bioquímica cuya consecuencia es la muerte celular tumoral de forma selectiva[1]. La acción de este tipo de terapia puede tener como objetivo no sólo la destrucción tumoral, sino también crear trastornos en la vascularización tumoral, afectando así a su desarrollo.

En la actualidad hay diferentes tipos de cáncer que pueden ser tratados mediante terapia fotodinámica, como páncreas, pulmón, piel o esófago. También se utiliza en lesiones de piel que pueden derivar en cáncer, e incluso para otro ripo de afecciones como psoriasis, acné o infecciones por el virus del papiloma. De hecho también tiene aplicaciones meramente estéticas, por ejemplo para rejuvenecer piel que ha sido dañada por el sol.

Una de las áreas de estudio en este campo se centra en el desarrollo de nuevos fotosensibilizadores, así como de agentes que sean capaces de "atacar" determinados tipos de tumores. Por ejemplo, una de las últimas líneas de investigación se centra en que la sustancia tóxica para las células cancerígenas generada en el proceso ataque específicamente las mitocondrias, dado el papel que estas desempeñan en el desarrollo del cáncer.

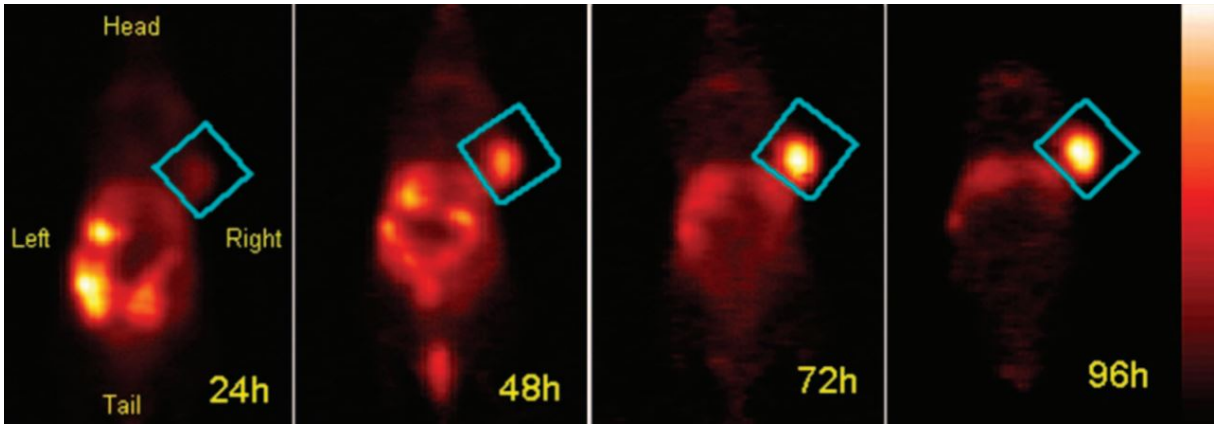


Figura 39. Evolución temporal de un fotosensibilizador en un tumor implantado en un ratón a las 24, 48, 72 y 96 horas. Fuente: Pandey et al. Enlace: https://bit.ly/3nUyT8r

[1]Fuente: "Acción biológica de la terapia fotodinámica sobre el cáncer de vejiga". Enlace: http://bit.ly/3p7v6WE.

5.12. ¿Puede la luz ayudarnos contra el COVID?

Desgraciadamente la pandemia asociada al **COVID** que comenzó a principios del 2020 ha suscitado un gran interés por todo tipo de soluciones que permitan afrontar los diversos problemas asociados que han ido surgiendo. Un problema específico que se ha planteado a la ciencia es el de poder "atacar" al virus, eliminándolo así de cualquier superficie o incluso del aire. **¿Puede la luz ayudarnos en este proceso?**

Desde hace muchos años se emplean diferentes tipos de radiación, como por ejemplo ultravioleta, para llevar a cabo procesos de esterilización. Este proceso, que puede entenderse como de desinfección (también denominado radiación germicida) permite eliminar microorganismos atacando sus ácidos nucleicos, afectando así su ADN y evitando que puedan realizar tareas celulares básicas, como su replicación o la generación de ciertas proteinas, provocando así la muerte o inactivación del organismo.

El tipo de radiación que suele emplearse es la **ultravioleta C (UV-C)**, que comprende las longitudes de onda de **200 a 290 nm**, precisamente porque es la absorbida de manera eficiente por los ácidos nucleicos.

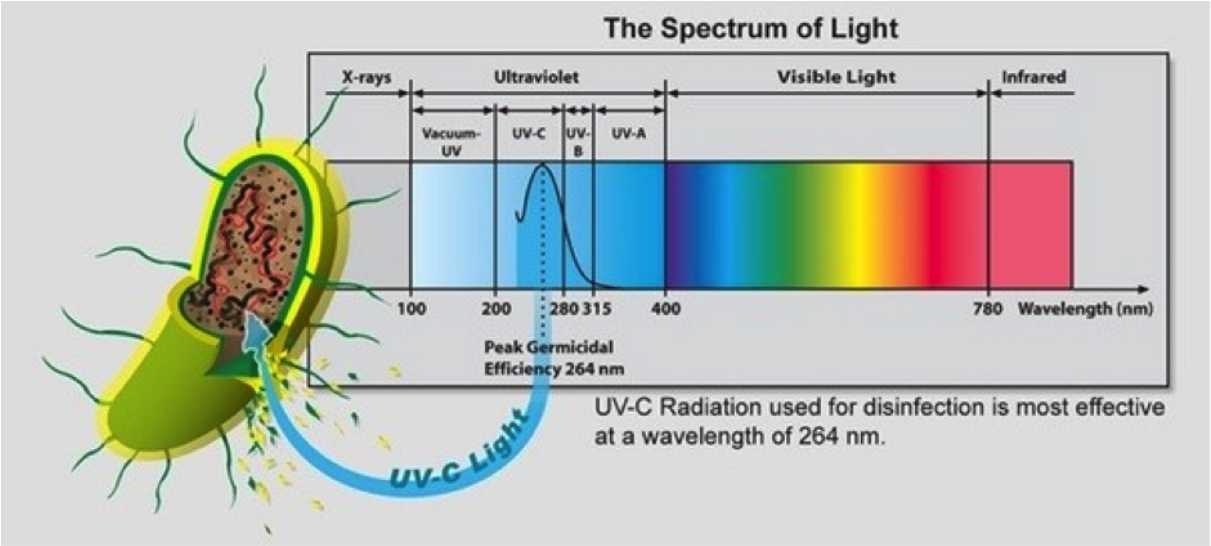


Figura 40. Imagen que ilustra la situación de la luz UV-C (utilizada como germicida) dentro del espectro electromagnético. Fuente: Neptronic. Enlace: http://bit.ly/36kvhH3

Estos sistemas se vienen empleando desde hace tiempo para tratar agua, aire o superficies que puedan estar contaminadas biológicamente. Su uso permite atacar a diferentes tipos de microorganismos, desde **bacterias a hongos e incluso virus**. De hecho, la radiación UV-C también se ha usado en medicina como esterilzante (eliminación de gérmenes) o incluso en la ayuda de cicatrización de heridas.

Un ejemplo de uso en el tratamiento de aguas lo podemos encontrar en la planta *Caskill-Delaware Water Ultraviolet Desinfection Facility* de tratamiento de aguas para la ciudad de Nueva York (inaugurada en octubre del 2013 y que procesa 8.300.00 m^3 de agua al día). En la Figura 41 se muestran diferentes imágenes de esta instalación, considerada la mayor del mundo en cuanto a tratamiento de agua. De izquierda a derecha y de la parte superior a la

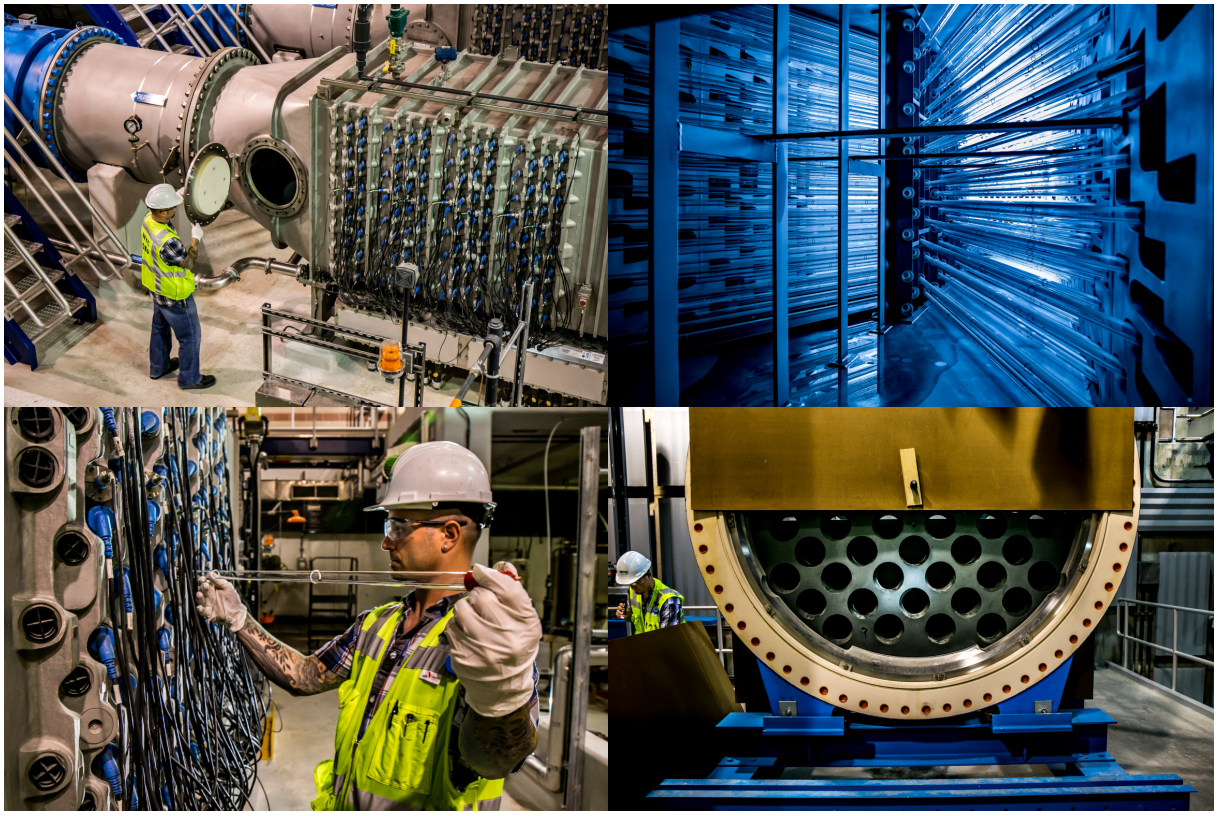


Figura 41. Imágenes de la instalación de tratamiento de agua mediante radiación UV en Caskill-Delaware (NY). Fuente: Adi Talwar (citylimits.org). Enlace: http://bit.ly/2NHZOIm

inferior podemos ver:

Canalización del agua para hacerla pasar por diferentes cámaras donde recibe el tratamiento por medio de la luz UV

Tubos de luz UV situados dentro de la cámara por la que se hace pasar el agua. El objetivo es eliminar los problemas derivados de infecciones por los parásitos *Cryptosporidium* y *Giardia*[1]

Revisión por parte de uno de los operarios de los tubos de luz UV

Pieza diseñada para aumentar o disminuir la velocidad del flujo de agua en la instalación

Existen además equipos comerciales para purificación del aire que una etapa en la que se usa luz UV como germicida. En la Figura 42 se muestra un ejemplo de estos equipos.

En cuanto a la efectividad contra el virus **COVID-19**, la comunidad científica sigue estudiando la efectividad de este método para combatirlo. Hay diferentes estudios que parecen indicar que, efectivamente, el uso de radiación UV es eficaz para eliminar el virus de superficies, ya sea de manera directa o bien mediante el empleo de pequeñas partículas (por ejemplo,

[1] Estos dos pequeños parásitos crean normalmente problemas gastro-intestinales, aunque pueden llegar a causar complicaciones más serias en personas con sistemas inmunitarios débiles.



Figura 42. Ejemplo de purificador de aire que incluye una etapa de radiación UV. Fuente: castellex.com. Enlace: https://bit.ly/39qRiG1

polímeros) que sirvan como vehículo para que la radiación sea realmente efectiva. Un estudio de diciembre del 2020 (ver Figura 43) analiza la viabilidad de este método para eliminar el virus en equipos de imagen médica, con resultados positivos. Como siemore ocurre en ciencia, es necesario que estos estudios preliminares sean corroborados por más pruebas posteriores que avalen su validez.

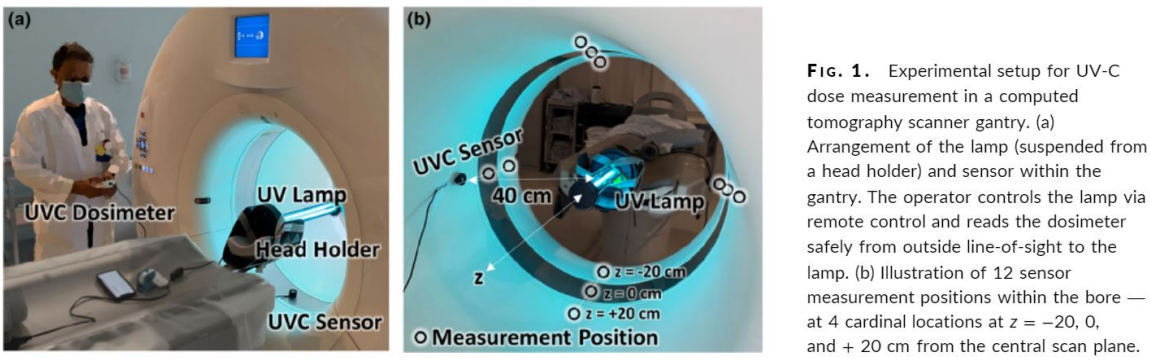


FIG. 1. Experimental setup for UV-C dose measurement in a computed tomography scanner gantry. (a) Arrangement of the lamp (suspended from a head holder) and sensor within the gantry. The operator controls the lamp via remote control and reads the dosimeter safely from outside line-of-sight to the lamp. (b) Illustration of 12 sensor measurement positions within the bore — at 4 cardinal locations at $z = -20$, 0, and + 20 cm from the central scan plane.

Figura 43. Imágenes del artículo "Ultraviolet germicidal irradiation of the inner bore of a CT gantry". Fuente: Mahesh et al. Enlace: https://bit.ly/2NMjlrf

5.13. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado un rápido recorrido por algunas de las aplicaciones que nos permiten interaccionar con el mundo que nos rodea por medio del uso "inteligente" de la luz. En contreto 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 profesor[1] siempre que lo considere necesario.

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