

SISTEMAS DE ILUMINACIÓN
POR LED
APLICADO A LA
ESPELEOLOGIA

BLOQUE ESPECÍFICO

Aitana E. Tamayo Hernando

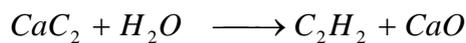
ÍNDICE

1. Introducción	2
2. El espectro electromagnético	5
2.1 ¿Cómo funciona el ojo humano?	6
2.2 La visión	7
3. Magnitudes y unidades de medida	9
4. Diodos de emisión de luz	11
4.1 Un poco de historia	11
4.2 Dispositivos semiconductores	12
4.3 Sistemas de iluminación por LED	14
5. LED comerciales	22
6. Sistemas de iluminación con LED comerciales	24
6.1 Frontales mixtos (halógena + LED)	24
6.3 Iluminación para buceo	27
7. Exploración con LEDs	28
8. Tendencias actuales	31
9. Baterías	33
9.1 Pilas no recargables	34
9.2 Baterías recargables	36
Anexo I	38
Anexo II	39
II.1 Intensidad de corriente	40
II.2 Ley de Ohm	40
Anexo III	42
REFERENCIAS	43

1. Introducción

La característica más relevante de las cavidades es la ausencia absoluta de luz, cual hace que tornen especial relevancia para la práctica de la actividad los sistemas de iluminación dentro del equipo personal del espeleólogo. Los sistemas de iluminación más “rústicos”, por así decirlo constan de una linterna convencional adherida al casco, de manera que se quedan las dos manos libres para realizar todo tipo de maniobras. Este sistema de iluminación, como es de suponer, presenta un gran número de inconvenientes, por lo que la práctica totalidad de los espeleólogos que, convencidos de la importancia vital que tiene un buen sistema de iluminación, emplean otros tales como la iluminación eléctrica y por gas.

Hoy día, muchos espeleólogos emplean como fuente de iluminación principal la que proviene de la combustión de gas acetileno. El acetileno se forma por reacción química entre el carburo cálcico y el agua mediante el siguiente esquema de reacción:



La luz que da el acetileno es una luz blanca muy cálida (con tintes anaranjados), es incoherente y no está dirigida. Es decir, con la luz de acetileno podemos ver los colores “reales” de las cavidades en todas las direcciones sin tener que “apuntar” al objeto que queremos ver. Entre los inconvenientes de esta luz están su inestabilidad (se apagará en el momento más inoportuno), el peso que supone llevar el carburero, el agua, el carburo de recarga y la purga y que no se puede usar en actividades como espeleobuceo o cavidades muy acuáticas y con dificultades.

La iluminación eléctrica es indispensable en determinadas situaciones (por ejemplo para atravesar sifones) y día a día va ganando terreno como fuente de iluminación principal en los equipos de los espeleólogos. La iluminación eléctrica consta de una linterna de poco peso fijada permanentemente (o casi) en el casco, cerrada herméticamente para prevenir la entrada de agua en los circuitos. Las ventajas de este tipo de iluminación, además de su estabilidad y facilidad de manejo, están en su versatilidad de empleo en diferentes situaciones, relativo bajo costo y, cómo no, que reducen el peso de los equipos personales. Como desventajas podríamos encontrar que la luz que proporcionan es menos cálida que la que dan los sistemas de iluminación tradicionales por lámparas de acetileno (especialmente la que proviene de los sistemas de iluminación por LED), no dan el calorcito agradable del carburero (en cavidades frías) y además son más frágiles y con más difícil reparación.

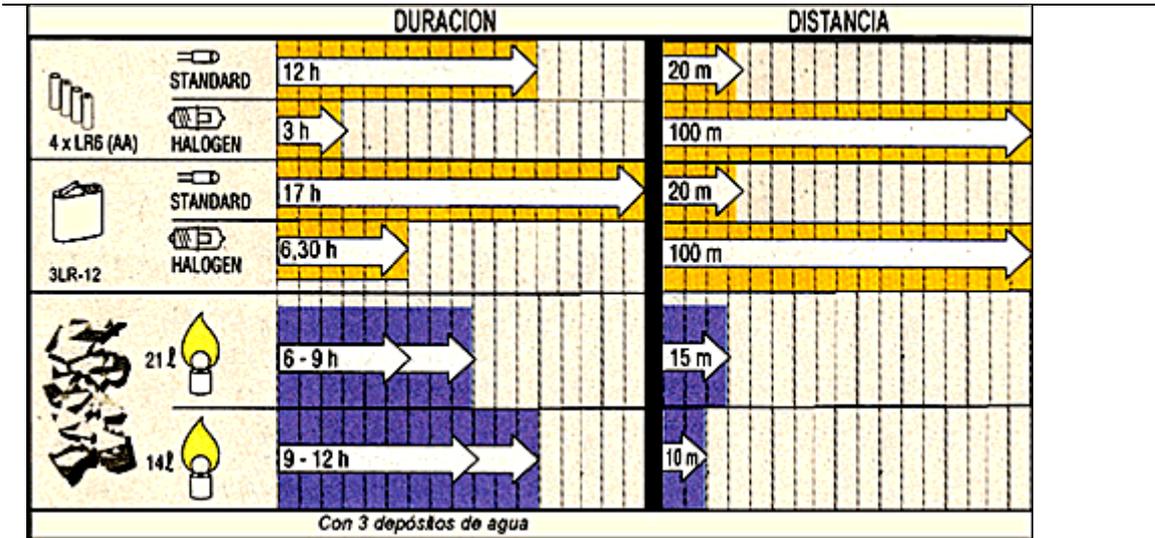


Fig. 1 Cuadro comparativo entre los sistemas de iluminación tradicionales con instalación eléctrica y lámpara de acetileno (Balmat)

Los sistemas de iluminación por LED además están ganando terreno a los sistemas de iluminación eléctrica tradicionales, como las lámparas halógenas. Una de las razones fundamentales es porque se consigue una mayor eficiencia lumínica con las lámparas de LED, lo que se traduce en un menor consumo y un tiempo de vida mucho mayor.

En la tabla 1 se muestra la eficiencia luminosa de varias lámparas de iluminación; estos valores son sólo aproximados y, desde luego, dependen de los avances tecnológicos en cada uno de los campos¹:

Eficacia luminosa (Lm / Watt)	
Incandescente	1 – 6
Halógena	18 – 22
Vapor de Hg	60.5
Haluros metálicos	70
Fluorescentes	4.5 (1 W)
	80 – 90 (20 W)
Na a baja presión	100
LED	3 – 8
LED alta luminosidad	36

Tabla 1. Eficacia lumínica de distintas fuentes de iluminación eléctrica

Los primeros LED empelados como sistemas de iluminación fueron fabricados por la compañía japonesa Nichia, y, posteriormente, HP, Chicago Miniatura Lamp y Sloan Precision Optoelectronics se han sumado al carro de la producción de LED de todos los colores y eficiencias. Cuando Nichia lanza al mercado sus primeros LED, éstos

poseían una eficiencia de aproximadamente 5 lm/watt; en 1998 se alcanzaron los 10 lm/watt y rápidamente los 15 lm/watt.

Como se verá en las páginas siguientes, desde la aparición en el mercado de la Tikka de Petzl (3 LED), se han desarrollado multitud de sistemas frontales para iluminación, no sólo en la práctica espeleológica habitual, sino también específicos para grandes exploraciones. Se pueden encontrar en internet multitud de circuitos y dispositivos “a gusto del consumidor” para sistemas de iluminación por LED, así como adaptaciones de dispositivos comerciales a construcciones “caseras”.

En el presente trabajo se hará primeramente una introducción al espectro electromagnético, la luz, cómo la percibimos y qué es lo que vemos. A continuación se repasan las unidades de medida más empleadas y aceptadas por el Sistema Internacional, así como la relación que hay entre ellas. Describiremos los Sistemas de Iluminación por LED, qué son los LED, los semiconductores, cómo se forman, en qué se basan y qué tendencias son las que se siguen actualmente en el mercado. Finalmente pasaremos a describir brevemente cómo se podríamos hacernos con nuestro sistema de iluminación por LED y los que encontramos en el mercado. Se incluye además un anexo con los principios fundamentales de la electrónica empleada en el diseño de circuitos.

2. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético comprende todas aquellas radiaciones posibles en un amplio rango de frecuencias (ver fig. 2). En función de la longitud de onda o energía de la radiación, encontramos los rayos gamma, con una longitud de onda de hasta 10^{-14} m, Rayos X, Ultravioleta, Infrarrojo, radiación Radar, ondas de radio y circuitos AC, con una longitud de onda de hasta 10^8 m. La región del espectro correspondiente al visible (es decir, aquella a la que el ojo humano es sensible) comprende aquellas radiaciones con longitud de onda entre 350×10^{-9} m (350 nm), que es luz azul o violeta y 700×10^{-9} m (700 nm) correspondiente a luz roja. El espectro visible, por tanto, es una región muy pequeña del espectro electromagnético y, a nuestro alrededor estamos rodeados por multitud de ondas de todo tipo que somos incapaces de ver.

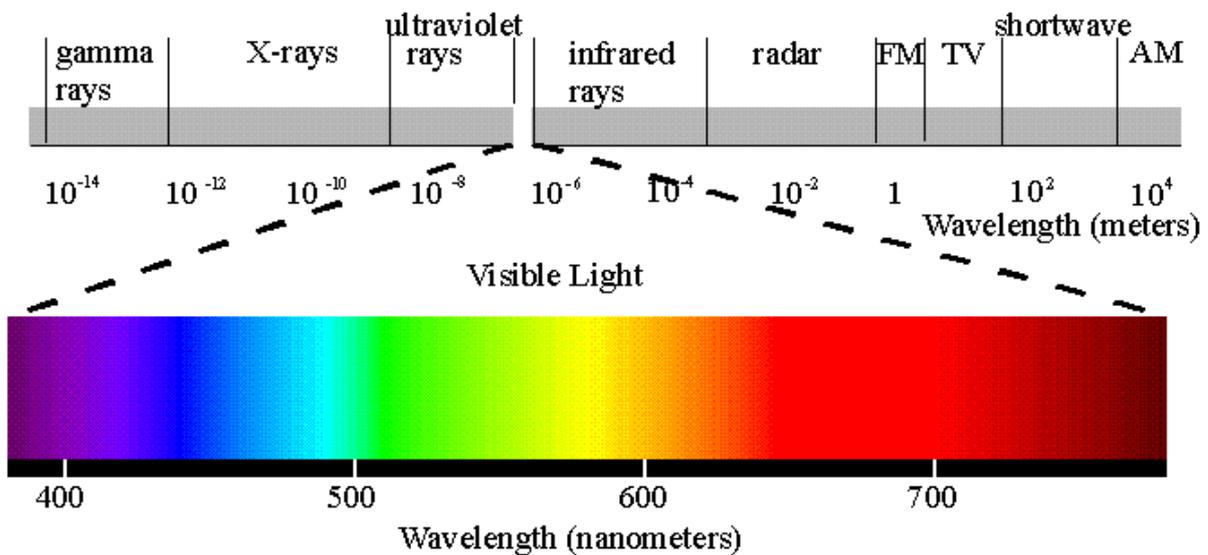


Fig 2. Espectro electromagnético

La energía de una radiación viene definida por la longitud de onda de la misma mediante la siguiente expresión:

$$E = h \nu$$

donde h es una constante y ν es la frecuencia de la radiación. La frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda así, una radiación con mayor longitud de onda será menos energética que una radiación con longitud de onda más baja. En la fig. 2 se representa esquemáticamente cómo es la longitud de onda en cada región del espectro, así, en la región ultravioleta, la longitud de onda es menor que en el infrarrojo.

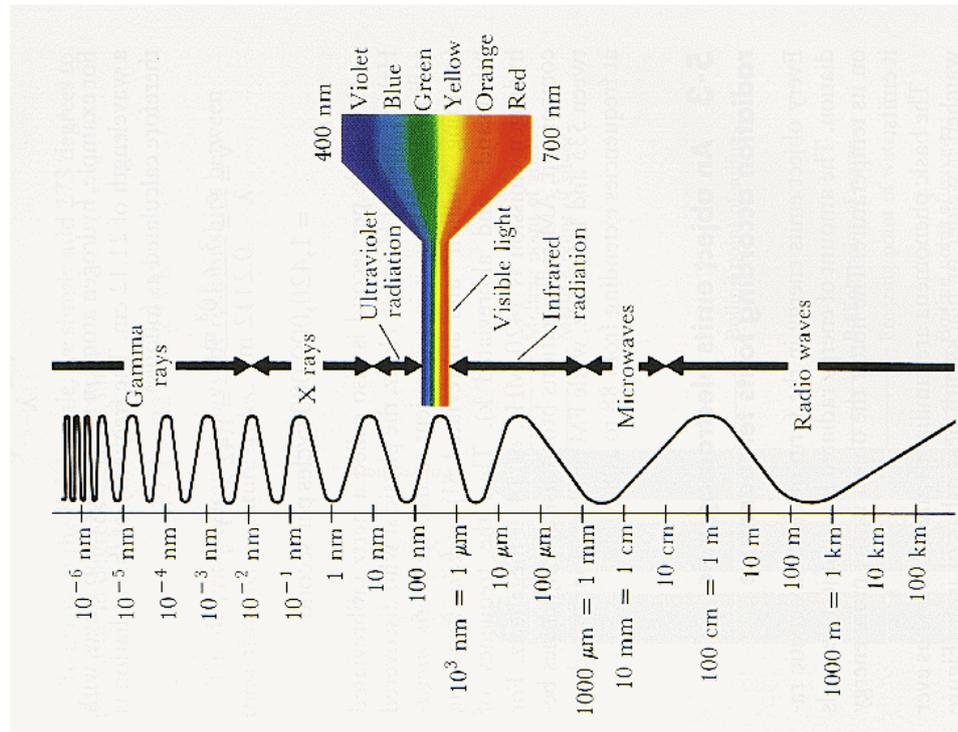


Fig. 3 Relación entre la longitud de onda y el espectro electromagnético

2.1 ¿Cómo funciona el ojo humano?

El ojo humano está compuesto por tres capas superpuestas de tejidos. La capa más externa o esclerótica es de color blanco, excepto donde se encuentra la esclerótica, que actúa como primera lente. La capa media se denomina tejido corioideo, que contiene melanina y es de color negro; esta capa de melanina impide la reflexión de la luz parásita en el interior del ojo.

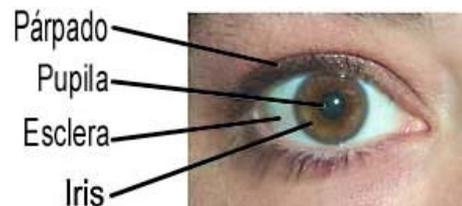


Fig. 4 Partes del ojo

El iris y la pupila, que cambia de tamaño con la intensidad de la luz que recibe, se encuentran en la parte anterior del ojo. En la parte posterior interna se encuentra la retina, que recibe la imagen invertida enfocada por los elementos ópticos de la parte anterior. La retina se forma por la fovea, donde se encuentran los fotorreceptores.

La retina usa unas células específicas llamadas conos y bastones para procesar la luz. En la retina tenemos aproximadamente 120 millones de bastones y 7 millones de conos... en cada ojo.

Los bastones ven en negro, blanco y sombras grises; nos dan información sobre la figura o forma de las cosas. Los bastones no diferencian entre colores, pero nos permiten distinguir cuándo algo está oscuro.

Los conos son los responsables de la percepción del color y necesitan más luz que los bastones para funcionar bien. Los conos son más útiles cuando hay luz. La retina posee tres tipos de conos: rojo, verde y azul. En conjunto, estos conos pueden percibir combinaciones de ondas de luz que permiten que los ojos vean millones de colores.

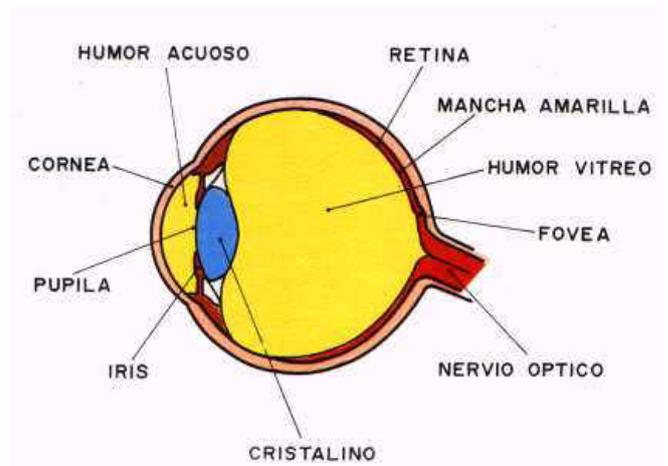


Fig. 5 El ojo por dentro

Los bastones y los conos procesan la luz en su conjunto para dar la información de la imagen completa.

2.2 La visión

La imagen que llega al ojo es la luz reflejada por los objetos de su alrededor. Dependiendo de la intensidad luminosa, la pupila se ajusta de forma automática e involuntaria cerrando más o menos la apertura del iris para que la imagen recibida al pasar sobre el cristalino se proyecte en la retina.

Tal y como hemos comentado anteriormente, en la retina se encuentran los fotorreceptores (conos y bastones) que son, en concreto, las terminaciones de una gran cantidad de fibras nerviosas que forman el nervio óptico, el cual se encarga de transmitir la información a la superficie estriada del cerebro.

En la fig. 5 se muestra esquemáticamente cómo sería la curva de sensibilidad del ojo humano con la longitud de onda de la radiación recibida. Se observa así que, el ojo es más sensible a la zona de azules y verdes, en la zona de 550 nm y que la sensibilidad decae en la zona infrarroja y ultravioleta.

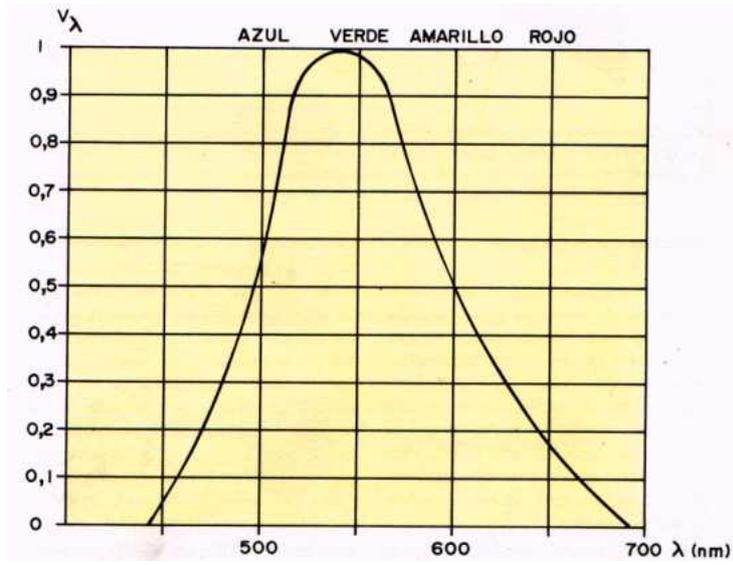


Fig. 6 Curva de sensibilidad relativa del ojo en función de la longitud de onda de la radiación percibida

3. Magnitudes y unidades de medida

Una radiación luminosa puede ser expresada en diferentes unidades, todas ellas recogidas en el Sistema Internacional; así, la unidad de intensidad luminosa, candela (cd) se



emplea para definir la “iluminancia” de la fuente luminosa. La fuente luminosa emite un “flujo luminoso” (ϕ) que viaja en el espacio para iluminar una superficie con “iluminación” (E)². Existen también un buen número de unidades que no están recogidas dentro del Sistema Internacional, pero que en ocasiones nos las podemos encontrar en las definiciones de las propiedades de las lámparas de iluminación, como fotonos, lamberts, etc. En este trabajo definiremos las unidades más empleadas para definir un sistema de iluminación³:

- Lumen

La potencia de la luz o flujo luminoso (ϕ) se mide en Lumens. Como intensidad de potencia luminosa se puede definir en vatios, pero el lumen se refiere específicamente al rango del espectro electromagnético que al que es sensible el ojo humano.

Se define el flujo luminoso como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. La relación entre watts y lumens se llama equivalente luminoso de la energía y equivale a

$$1 \text{ watt – luz a } 555 \text{ nm} = 683 \text{ lm}$$

- Candela

La unidad de intensidad luminosa se denomina Candela y corresponde a la distribución angular del flujo electromagnético o flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido. Si imaginamos el flujo de luz concentrado en un cono de ángulo variable, para la misma potencia, cuanto menor sea el ángulo, más “brillante” es la luz que observamos.



Fig. 7 Diferencia entre flujo luminoso e intensidad luminosa

La apertura de un cono, normalmente se mide en grados, sin embargo, la unidad del Sistema Internacional para describir el ángulo sólido es el **steradian**, que viene dado en metros. La relación entre el flujo luminoso (medido en lumen) y la intensidad luminosa (candela) se describe por la siguiente ecuación:

$$candela = \frac{lumen}{steradian}$$

- Lux

El lux es la unidad de iluminación o flujo luminoso por unidad de área, y, por tanto, se relaciona con las demás unidades como:

$$lux = \frac{lumen}{m^2}$$



Fig 8. Concepto de iluminancia

Como podemos ver en la fig. 8, la iluminancia depende de la distancia entre el foco y el objeto iluminado. La iluminancia se relaciona con la intensidad luminosa mediante el cuadrado de la distancia que separa el foco del objeto.

4. Diodos de emisión de luz

Los materiales luminiscentes son aquellos que son capaces de convertir energía en radiación electromagnética en el rango del espectro visible. Los Diodos Emisores de Luz (LED) convierten la energía producida por un campo eléctrico en electroluminiscencia. Los LED son dispositivos semiconductores que son capaces de emitir luz incoherente en una región muy estrecha del espectro electromagnético.

El color de los LED depende de la composición química del material semiconductor empleado, pudiéndose así obtener LED que emitan en la región del ultravioleta cercano, visible o infrarrojo.

4.1 Un poco de historia

La primera vez que aparecen en la bibliografía este tipo de materiales es en 1955, cuando Rubin Braunstein consigue emisión infrarroja en GaAs (Arsenuiro de Galio) y otras aleaciones de materiales semiconductores. En 1961 Biard y Pittman patentan los primeros LED de GaAs y no es hasta 1962 cuando, Holonyak y los ingenieros de la General Electric Company desarrollan el primer LED para el espectro visible⁴

Desde entonces los LED han experimentado un gran desarrollo, especialmente en el campo de LED de alta luminosidad; en 2004, el incremento de estos dispositivos en el mercado estadounidense supuso alrededor del 37% del total. Este importante crecimiento ha sido debido, en parte, por la reducción de los precios de los dispositivos y su empleo en componentes móviles (PDA's, cámaras, móviles, etc). Hoy día, sin embargo, el mayor desarrollo de la tecnología LED se la lleva el mundo de la automoción, esperándose para principios de 2007 la implantación de estos dispositivos en los sistemas de iluminación automáticos⁵.

En el mundo de la espeleología, ya se reporta en 1986, en la revista *Speleonics*, de la National Speleological Society, la aplicación de LED para iluminación de dispositivos para topografía. En esta publicación se describe cómo montar un dispositivo de iluminación de una brújula empleando un LED rojo a 1.7 V⁶

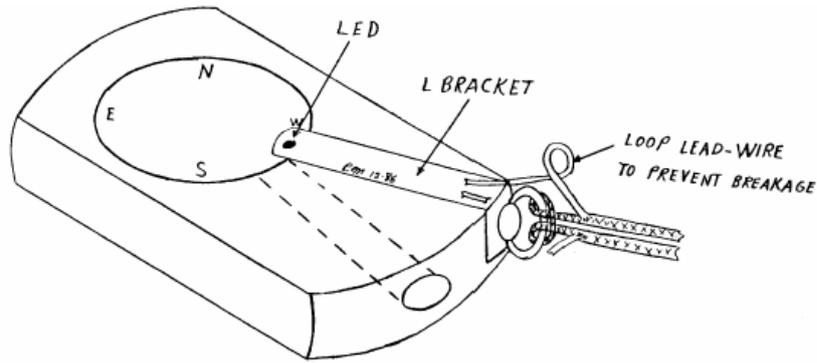


Fig. 9 Propuesta de sistema de iluminación de una brújula Suunto con LED rojo. Extraído de Speleonics 6, vol II nº 2

4.2 Dispositivos semiconductores

Los semiconductores luminiscentes son un importante grupo de materiales empleados en diferentes dispositivos: televisores, materiales electroluminiscentes, LEDs, etc.

Los semiconductores son materiales con una conductividad eléctrica intermedia entre los metales y los no conductores. La conductividad, además, aumenta con la temperatura, al contrario que ocurre con los conductores, cuya conductividad disminuye con la temperatura.

Los semiconductores más conocidos son el Silicio (Si) y el Germanio (Ge), aunque, debido a la mayor estabilidad del Silicio se emplea con mucha mayor profusión. Como todos los demás átomos, el Si tiene tantas cargas positivas en el núcleo como negativas en las órbitas que le rodean, siendo los electrones más cercanos al núcleo los que menos movilidad poseen por experimentar mayor atracción núcleo – electrón. Si se da una pequeña energía a los electrones, aquellos que están más lejos del núcleo, en órbitas más exteriores, pueden quedar libres⁷.

Si se libera entonces un electrón, quedaría el “hueco” que ocupaba este electrón que tendría que ser ocupado por otro para compensar el déficit de carga. Este hueco, como produce una desestabilización de carga, habría más carga positiva que negativa porque hemos quitado carga negativa, podría verse también como una carga positiva.

Como hemos comentado, este hueco o carga positiva lo vendría a ocupar otro electrón que a su vez dejaría otro hueco y así sucesivamente. Podríamos visualizar entonces

los movimientos en el semiconductor como una corriente de cargas positivas (aunque no es completamente cierto ya que los huecos no se mueve, lo hacen los electrones, pero parece que es los huecos los que se mueven)

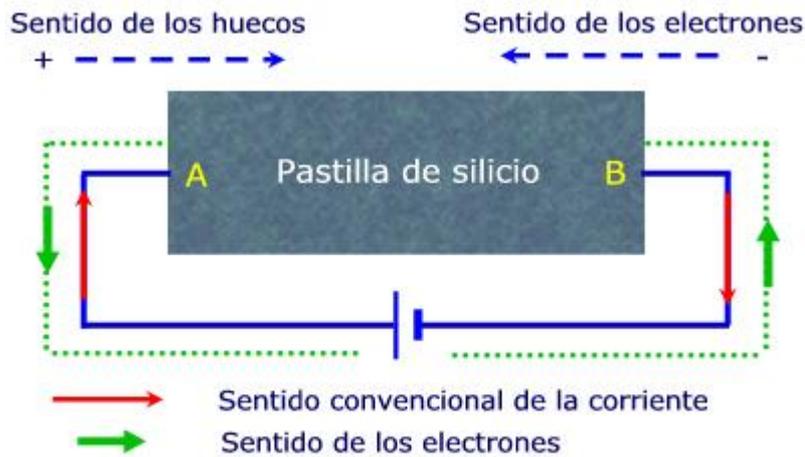


Fig. 10 Sentido del movimiento de un electrón y un hueco en el silicio

La corriente producida por los movimientos hueco – electrón es muy pequeña. Para aumentar el valor de esta corriente tenemos dos posibilidades

1. Aumentar el valor de la corriente aplicada para promover la aparición de más huecos
2. Introducir en el semiconductor electrones o huecos desde el exterior (dopaje)

El segundo caso es el más útil ya que es relativamente sencillo introducir átomos con exceso o con déficit de carga en el Si, mientras que aplicar una corriente de mucho mayor intensidad es menos factible.

El dopaje consiste en sustituir átomos de silicio por átomos de otros elementos denominados impurezas. En función del tipo de impureza que introduzcamos en el Si tendremos dos clases de semiconductores:

- * Semiconductor tipo P – Si se introducen huecos
- * Semiconductor tipo N – Si se introducen electrones

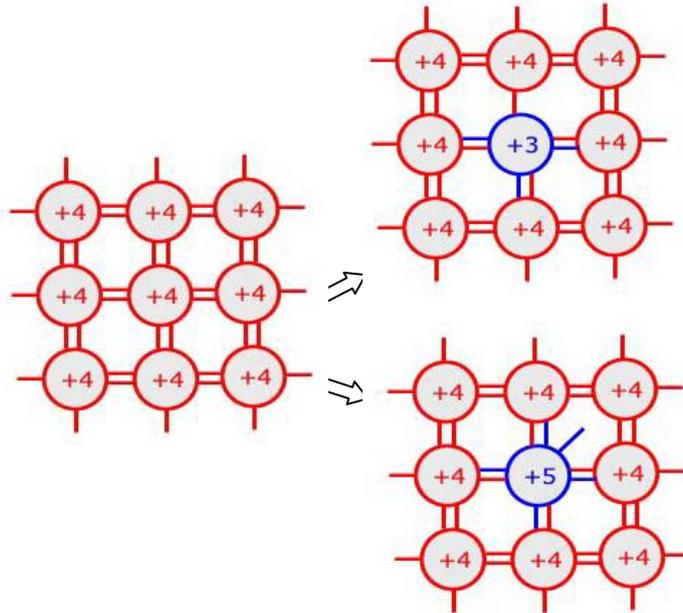


Fig. 11 Dopaje de un semiconductor. Tipo P (arriba) y tipo N (abajo)

4.3 Sistemas de iluminación por LED

Hoy en día, la mayor parte de los espeleólogos emplean como fuente de iluminación principal lámparas de acetileno, producido a partir de carburo cálcico. Sin embargo, especialmente en estos últimos 4 años, cada vez más adeptos a este deporte están sustituyendo sus sistemas de iluminación tradicionales por luz eléctrica, la cual garantiza una mayor estabilidad. En determinadas cavidades, incluso, está vetado el empleo de carburo cálcico como sistema de iluminación siendo obligatorio el empleo de luz eléctrica.

4.3.1 ¿Qué es un diodo?

Un diodo es un componente electrónico que permite el paso de la corriente en un sentido y lo impide en el contrario. Está provisto de dos terminales, un ánodo y un cátodo produciéndose la circulación de corriente en el sentido ánodo – cátodo.

Los diodos P-N son la unión de dos materiales semiconductores tipo P y tipo N; al unir ambos materiales se crea una difusión de electrones entre ambos (del N al P) creándose una zona a ambos lados de la unión denominada **zona de carga espacial** o de **agotamiento**. Al dispositivo así obtenido se le denomina **diodo**. Al extremo P se le denomina ánodo y al extremo N se le denomina cátodo.

Cuando se somete al diodo a una diferencia de potencial, se dice que está polarizado. La polarización puede ser directa o inversa. La polarización directa se produce cuando el polo positivo del generador se une al ánodo del diodo y el polo negativo se une al cátodo; en este caso el diodo se comporta como un conductor y deja pasar la corriente. La polarización inversa se produce cuando el polo positivo del generador se une al cátodo del diodo y el negativo al ánodo; en este caso el diodo no permite el paso de la corriente.

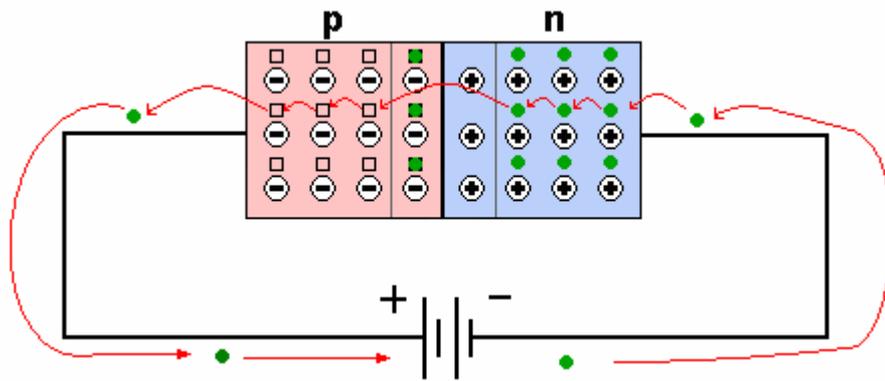


Fig.12 Polarización Directa. El polo positivo de la batería está conectado al ánodo del diodo y el polo negativo al cátodo

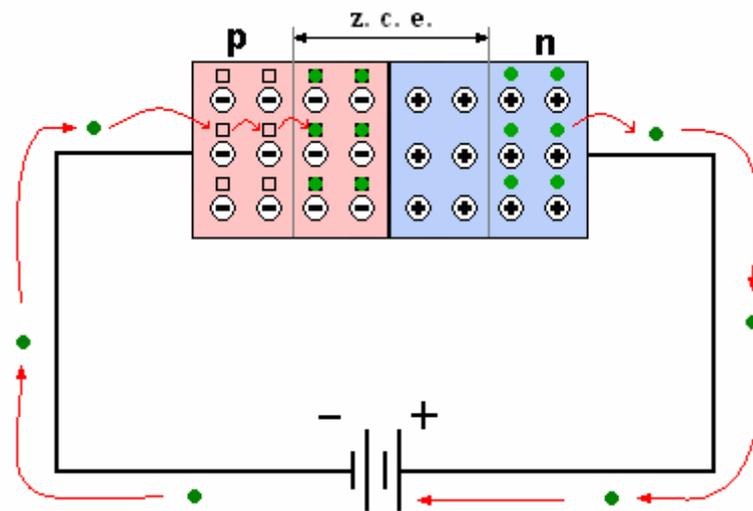


Fig.13 Polarización Inversa. El polo negativo de la batería está conectado al ánodo del diodo y el polo positivo al cátodo

4.3.2 Diodos de Emisión de Luz (Light Emission Diodes - LED's)

Un diodo LED es un dispositivo semiconductor que convierte en luz la energía eléctrica que le llega cuando es polarizado en directa. La luz emitida por un diodo es luz policromática, es decir, con diferentes longitudes de onda, dependiendo ésta del material semiconductor empleado en la construcción del diodo, pudiendo variar desde el ultravioleta, pasando por el espectro de luz visible hasta el infrarrojo.

Compuesto	Color	λ (nm)
Arseniuro de Galio (GaAS)	Infrarrojo	940
Arseniuro de Galio y Aluminio (AlGaAs)	Rojo e Infrarrojo	890
Arseniuro Fosfuro de Galio (GaAsP)	Rojo, Naranja y Amarillo	630
Fosfuro de Galio (GaP)	Verde	555
Nitruro de Galio (GaN)	Verde	525
Seleniuro de Zinc (ZnSe)	Azúl	
Nitruro de Galio e Indio (irgan)	Azúl	450
Carburo de Silicio (SiC)	Azúl	480
Diamante (C)	Ultravioleta	
Silicio (Si)		

Los primeros diodos construidos fueron los diodos rojo e infrarrojo, obteniéndose los primeros diodos azules a finales de los 90⁸ (Shuji Nakamura, Premio de Tecnología del Milenio 2006), añadiéndose los LED rojos y verdes desarrollados con anterioridad para obtener luz blanca por combinación de los mismos. El diodo de ZnSe permite obtener también luz blanca i se combina con roja y verde creada por fotoluminiscencia.

Los diodos azules y ultravioletas (tecnología más reciente para producción de luz blanca) son caros respecto a los más comunes (rojo, infrarrojo, verde y amarillo), por lo que son menos empleados en aplicaciones comerciales. A finales del s. XX se han comenzado a desarrollar los diodos de LED orgánicos (OLED), fabricados con materiales poliméricos semiconductores. La principal ventaja de estos materiales es que su fabricación es mucho más barata, siendo además posible la deposición de una gran cantidad de diodos sobre cualquier superficie empleando técnicas relativamente asequibles.

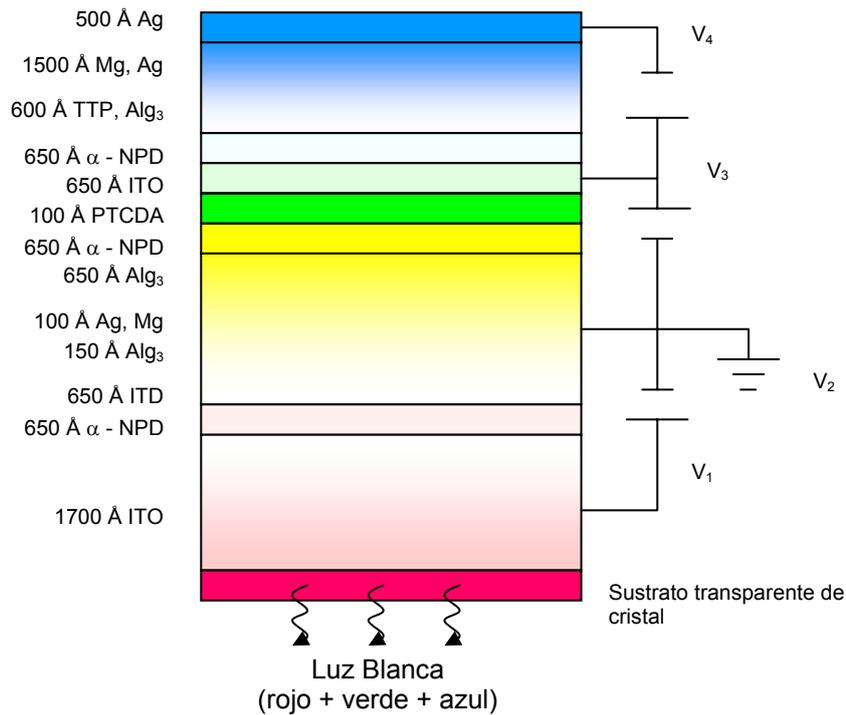


Fig. 14 Esquema de un Diodo de Emisión de Luz Orgánico (OLED)

4.3.3 LED's blancos

El elemento semiconductor de los LED's transforma la energía eléctrica en radiación luminosa monocromática, es decir, en una sola longitud de onda (un solo color), lo que no permite saber cual es el color exacto del material que se esta observando. A fin de obtener un color blanco, se introduce un material fosforescente en la superficie de los LED, dándole una tonalidad amarilla, de manera que absorbe el azul y emite de nuevo sobre todo el espectro visible (correspondiente a la luz blanca). La luz azul se encuentra en el límite de sensibilidad del ojo, mientras que el fenómeno de fosforescencia se encuentra a la respuesta máxima. La frecuencia así emitida se parece quizá más a la de la luz de la luna⁹.

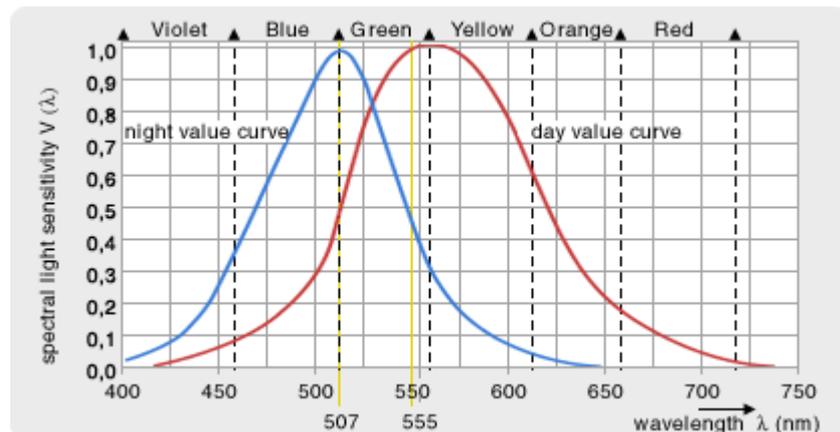


Fig. 15 Sensibilidad del ojo humano a la radiación lumínica (Fuente Osram)

Como se ha introducido anteriormente, los LED se componen de un material semiconductor, lo que les proporciona una primera ventaja frente a las tradicionales fuentes de iluminación por filamentos ya que los primeros son más estables frente a los choques y vibraciones. Este material está adherido a una superficie sólida que hace a la vez de soporte metálico, conexión eléctrica y elemento reflector. La conexión entre el soporte y el electrodo se realiza a través de unos hilos muy finos de Au o de Al. El conjunto se recubre de una resina epoxídica transparente que hace las funciones de protector y de lente. Como los LED carecen de filamento, trabajando en condiciones óptimas, prácticamente no se calientan y tienen un tiempo de vida estimado de aproximadamente 100000 horas de trabajo

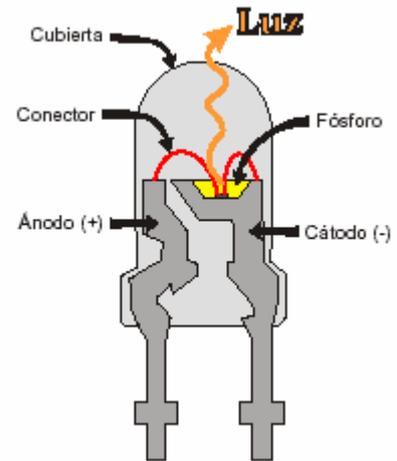


Fig. 15 Estructura de un LED

Además del color, otro parámetro a tener en cuenta es el radio de curvatura de la cubierta plástica. Cuanto mayor es el radio, más se concentra el haz de luz y viceversa. Los frontales de LED más empleados en espeleología tienen un radio de curvatura de aproximadamente 5 mm¹⁰.

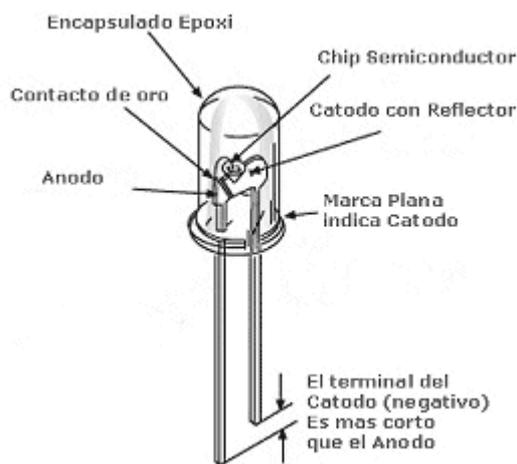


Fig. 16 Partes de un LED

El ánodo y el cátodo se identifican a simple vista ya que el primero es siempre más estrecho. El cátodo se encuentra unido al reflector parabólico, que sirve de terminal de salida y es por el cual se disipa la mayor parte del calor generado durante el funcionamiento del LED. Existen LED con distintos reflectores, lo que permite variar el ángulo de apertura del haz. La mayoría de los LED de luz blanca empleados para la fabricación de frontales de uso comercial poseen ángulos de visión de 20, 50 y 70°.

Este ángulo corresponde al doble de la apertura en la cual la intensidad luminosa ha disminuido la mitad respecto a la máxima central. La apertura no cambia la cantidad de luz emitida, sino sólo la forma en que ésta se distribuye¹¹.

Existen, básicamente 4 tipos de encapsulado¹²:

- Transparente: El empleado en LED de alta luminosidad; lo más importante es que el encapsulado no absorba de ninguna manera la luz emitida
- Coloreados: Similar al anterior pero coloreado con el color de emisión del sustrato similar al vidrio de algunas botellas. Se emplean en LED de baja potencia o cuando fuera necesario identificar el color del LED aún apagado.
- Difuso: De aspecto más opaco que los anteriores y coloreados con el color de emisión; poseen pequeñas partículas microscópicas en suspensión que son las responsables de desviar la luz. Este tipo de encapsulado le quita mucho brillo al LED pero le añade ángulo de visión.
- Lechosos: Es de tipo difuso pero sin colorear y se emplean en LED bicolor o multicolor. El LED bicolor es, en realidad, un LED doble con un cátodo común y dos ánodos o dos LED colocados en contraposición.

Los LED de luz blanca más empleados en espeleología se caracterizan por los siguientes parámetros:

- Color
- Encapsulado
- Intensidad luminosa: medida en Candelas (actualmente los mejores LED de 20° dan una luminosidad de 8000 mCd)
- Tensión de la fuente de alimentación (3.6 V para los LED blancos de GaN)
- Homogeneidad de la luz
- Precio

4.3.4 Circuitos de LED

La respuesta de los LED a la intensidad de corriente no es lineal. Con una intensidad de corriente típica de 20 mA, la intensidad luminosa que proporciona un LED de de aproximadamente 4000 mCd.

La diferencia de potencial aplicada varía de acuerdo a las especificaciones relacionadas con el color y a la potencia soportada por cada uno de ellos. Así, en términos generales puede considerarse:

Rojo	1.6 V
Rojo alta luminosidad	1.9 V
Amarillo	1.7 V – 2 V
Verde	2.4 V
Naranja	2.4 V
Blanco brillante	3.4 V
Azul	3.4 V
Azul 430 nm	4.6 V

Los LED funcionan con una intensidad comprendida entre 10 y 20 mA, de manera que, para evitar que se fundan se suelen conectar a una resistencia. Mediante la ley de Ohm, puede calcularse la resistencia adecuada para la tensión de la fuente de alimentación que utilizemos

$$R = \frac{V_{fuente} - (V_{d1} + V_{d2} + \dots)}{I}$$

El problema de este sistema es que la corriente que llega al diodo es muy sensible a las fluctuaciones de voltaje que pueda tener la fuente de alimentación. Para aplicación como fuente de iluminación principal, el circuito mejor sería aquel que proporcionara a los LED un potencial constante aunque el voltaje de la batería fuera variable. En su forma más simple, serían 2 resistencias con 2 transistores. El transistor únicamente aumenta la intensidad que puede suministrar el circuito integrado. Variando la resistencia mediante un conmutador se modifica la intensidad y, por tanto, la luz que suministran los LED.

Como hemos comentado anteriormente, en realidad los LED no presentan una respuesta lineal de la intensidad frente al voltaje, encontrándose diferencias incluso entre diodos del mismo lote. Estas variaciones pueden originar distribuciones inhomogéneas de corriente en los LED o grupos de LED que operan en paralelo. En la bibliografía¹³ se ha descrito un criterio que nos pueda ayudar a testar la viabilidad del circuito propuesto: Para un determinado grupo que opera a una intensidad media de 25 mA, descartar aquellos cuyo voltaje sea 0.1V menor que la media del grupo o más, a una intensidad de corriente de 30 mA; para un grupo de intensidad media 30 mA, se desechan aquellos con al menos 0.05V a esa intensidad de corriente.

Los LED blancos son sensibles a las descargas por corriente electrostática. Durante su manejo es preciso mantener unas condiciones óptimas de higiene y manejar



Fig. 17 Pulsera antiestática

los elementos con cuidado. Es muy útil el empleo de una pulsera antiestática para no dañar los componentes. Esta pulsera, si no se tiene, se puede fabricar artesanalmente¹⁴ a partir de material de electrónica y mercería (una oreja de conexión, corchetes, cable telefónico y una resistencia).

Los LED tienen un coeficiente térmico negativo, lo que quiere decir que el potencial disminuye al aumentar la temperatura. Con un voltaje constante, un ligero aumento de temperatura hace que disminuya ligeramente el voltaje y aumenta la intensidad de manera significativa, de modo que aumenta todavía más la temperatura por un aumento de potencia. Así, existe un nivel de potencia máximo al cual la temperatura es incapaz de mantenerse constante y puede llegar a quemar los LED. Regulando la potencia que llega a cada LED podemos, además de prevenir un aumento incontrolado de la temperatura, conseguimos una mayor luminosidad en un rango más amplio de temperaturas¹⁵.

Para un sistema multi – LED se pueden poner los diodos en paralelo con únicamente una resistencia para toda la cadena. El voltaje total será la suma de toda la serie, que no debe exceder en más de un 80 % el potencial de la batería para garantizar un consumo de corriente estable y homogéneo. Si se ponen los LED en paralelo, aunque en teoría funcionaría, se calientan más, lo que puede dar lugar a inestabilidades en la intensidad de corriente. Para un sistema en paralelo se necesitan resistencias individuales para cada serie en paralelo¹⁶.

5. LED comerciales

Si queremos fabricarnos nuestro propio sistema de iluminación, tendremos que elegir los diodos que más se ajusten a nuestras necesidades. Para optimizar el diseño, aparte de los componentes anteriormente mencionados, es útil combinar varios tipos de LED y así obtener las prestaciones deseadas.

En este apartado se muestran algunas de las características más importantes de los LED comercializados por la casa Nichia¹⁷. Todos ellos proporcionan una luz blanca (que denominan “blanco cálido”) y son aptos para el acoplamiento en sistemas de iluminación portátil para cavidades.

	Tipo de lente	Producto	Coordenadas cromáticas (x,y)		Intensidad luminosa (mcd)	Potencial V_F (V)		Ángulo (grados)	Condiciones
			Op	Max					
	Φ5	 NSPL500S 	*	*	*	3.6	4.0	15°	$I_F=20\text{mA}$
	Φ5	 NSPL510S 	0.41	0.39	1,800	3.6	4.0	50°	$I_F=20\text{mA}$
	Φ5	 NSPL505S 	0.41	0.39	6,400	3.6	4.0	15°	$I_F=20\text{mA}$
	Φ5	 NSPL515S 	0.41	0.39	1,250	3.6	4.0	55°	$I_F=20\text{mA}$

La primera columna de esta tabla indica la curvatura de la lente o resina epoxi que recubre al dispositivo. En todos los casos, la curvatura de la lente son 5 mm. En la siguiente columna se indica la referencia comercial del producto comercializado por Nichia y en documento aparte (vínculo a formato pdf) se encuentran las especificaciones técnicas del mismo. Estos documentos de especificaciones técnicas se encuentran recogidos en el Anexo III del presente trabajo.

Las coordenadas cromáticas del espacio de color CIE 1931 definen exactamente el color, tal y como se muestra en la figura 18. El sRGB define el rojo, el verde y el azul como colores primarios, donde uno de los tres canales está en su valor máximo y los otros dos a cero.

6. Sistemas de iluminación con LED comerciales

Si, por el contrario, no queremos fabricarnos nuestro propio sistema de iluminación y queremos recurrir a los sistemas de iluminación comerciales, aquí presentamos algunos de los ejemplos que se pueden encontrar actualmente en el mercado¹⁸:

6.1 Frontales mixtos (halógena + LED)

- Black Diamond – Vectra IQ

Frontal de montaña y alpinismo de 4 LEDs y una bombilla de Xenon con circuito inteligente IQ para mayor eficacia de alumbrado.



Distancia bombilla de Xenon: 150 metros / 100 metros / 50 metros
Autonomía: 3 horas / 8,5 horas / 14 horas
Distancia con LEDs: 18 metros / 15 metros / 12 metros
Autonomía: 110 horas / 135 horas / 160 horas
IQ, circuito inteligente para mayor ahorro y eficacia de alumbrado
Autonomía con intermitente: 300 horas
Baterías: 4 pilas AA (incluidas)
Tipo de bombillas: 1 Xenon y 4 Superbrights LEDs
Peso sin baterías: 126 gr.
Peso con baterías: 195 gr.

- Black Diamond – Helion

Frontal de 3 LEDs y una bombilla de Xenon. Compacto y ligero, es ideal para todo tipo de actividades al aire libre.



Máxima distancia bombilla de Xenon: 110 metros
Baterías: 3 pilas AA (incluidas)
Autonomía: 7 horas (Xenon), 220 horas (LEDs)
Tipo de bombillas: 1 Xenon y 3 Superbrights LEDs
Peso sin baterías: 126 gr.
peso con baterías: 195 gr

- Black Diamond – Gemini

Excelente frontal tipo Leds, funciones estándar y halógena.(500horas)



Frontal con tecnología de LEDS Xenón halógena y LED standart.
El regulador de voltaje mantiene la luz constante sin intermitencias.
El frontal Gémini funciona con tres pilas AA que tienen una duración de 500 horas (no incluidas).
Incluye una bombilla superbrillante de LED, que ilumina a 10 m (no se puede cambiar por otro modelo) y otra de larga duración de Xenón Halógena con una duración de 7 horas y que ilumina a una distancia de 70 m.
Esta última se puede sustituir por la bombilla brillante de Xenón Halógena de una duración de 3.5 horas y ilumina a 100 m o la superbrillante también de Xenón Halógena que dura 4.5 horas y que ilumina hasta 140 m.

- Petzl –Duobelt LED 14

Linterna frontal estanca de doble foco: halógena / 14 LED con 3 niveles de iluminación y caja portapilas separada.



Adaptación de la DUO LED 14 que permite una autonomía excepcional incluso a temperaturas muy bajas.

Caja portapilas separada: Se fija en la cintura o bajo la ropa, poco peso en la cabeza (140 g)

Protege las pilas en ambiente frío y húmedo.

Pilas de gran capacidad: autonomía halógena de 11:30 horas y 14 LED de hasta 280 horas (con iluminación de supervivencia)

Otras características idénticas al DUO LED 14.

Se sirve con un ACCU DUO + cargador y bombilla halógena de recambio.

Alimentación: Acumulador ACCU DUO o con 4 pilas AA/LR6 (con cajón para pilas E60650)

Peso: 550 g

- Petzl –MYO XP

Linterna frontal de 1 LED potente con 3 niveles de iluminación y un modo boost. Peso: 175 gr.



Ofrece una iluminación potente blanca y homogénea regulable, con gran autonomía.

Una única fuente de luz que responde a múltiples necesidades.

Foco puntual con 3 niveles de iluminación (máximo, óptimo y económico) y un modo intermitente, para adaptar mejor la luz a la actividad según la autonomía que necesites.

Modo boost: 50% de luz más que el nivel máximo durante 20 segundos.

Lente gran angular para una iluminación de proximidad más amplia.

Indicador de descarga de las pilas (indicador luminoso + intermitencia del LED):

avisa a un 70% y después, a un 90% de la descarga de las pilas.

Bloque óptico orientable, fácil de manipular.

Protección de interruptores para evitar que se enciendan involuntariamente.

Cinta elástica regulable, cinta superior incluida (no montada)

Resistente al agua para utilizar en cualquier condición climática.

Distancia de iluminación hasta 45 metros (65 metros en modo boost)

Autonomía hasta 170 horas.

Funciona con 3 pilas AA/LR6 (incluidas)

Peso: linterna (100 gr.) + pilas (75 gr.) = 175 gr.

- Petzl – MYO 5

Linterna frontal Xenón + 5LED, 6V + pilas.



La Myo 5 está pensada para los usuarios más exigentes y apasionados por múltiples actividades al aire libre y que alternan iluminación de largo alcance y de proximidad.

El anillo zoom permite seleccionar fácilmente entre los tres niveles de iluminación de los LED y la visión de lejos de la bombilla de Xenón. Así, el usuario adapta el nivel de iluminación a sus necesidades. Ideal para los alpinistas que necesitan adaptar constantemente el nivel de iluminación. Estos tres niveles de iluminación de los LED están regulados por un sistema electrónico:

-un nivel óptimo ideal para caminar.

-un nivel máximo ideal para correr o escalar en terreno escarpado.

-un nivel económico ideal para leer en la tienda.

Cuando la autonomía de las pilas llega a su fin, la Myo 5 pasa automáticamente a modo de supervivencia.

Iluminación máxima de 100 mts.(bombilla de Xenón), iluminación de proximidad modulable (5 LED).

Se sirve con bombilla de Xenón de 6v. de recambio y con 4 pilas alcalinas AA/LR6.
5 LED máximo: 10 horas y 15 mts.(110horas)
5 LED óptimo: 10 horas y 10 mts.(110horas)
5 LED económico: 90 horas y 5 mts.(160horas)
Bombilla Xenón: 100 mts. y 4 horas

6.2 Frontales sólo LED

- Black Diamond –Moonlight Pro

Excelente frontal de 4 LED's, hasta 15 metros y duración pilas 70 horas



Es una versión con pilas AA (LR6) del popular frontal Moonlight. Con esto la Moonlight Pro dispone de un increíble potencial de tiempo de uso y una capacidad de batería incrementada.
Con tres pilas AA de litium, este frontal os iluminará durante más de 400 horas, mientras que tres pilas AA alcalinas os iluminará durante más de 200 horas.
Este frontal tiene las mismas características que el Moonlight.
Cuatro leds blancas ultra brillantes.

Una caja conmutadora.
Un departamento compacto para las pilas.

- Petzl – Tikka Plus

Linterna frontal 4 Led, 4.5V + pilas. Nuevo modelo con cabezal móvil y 3 niveles de iluminación. Peso: 78 gr. (pilas incluidas)



Para la Tikka, Petzl utiliza la nueva tecnología de iluminación L.E.D. (Light Emitting Diode). Los LED producen una luz blanca homogénea.
Muy resistentes, tienen una duración de varios años en utilización continuada y consumen menos energía que las bombillas tradicionales. Ya no hay bombillas que cambiar.
Los LED no son desmontables. Después de su uso en medio húmedo, retira las pilas y sécalas. Si penetra agua salada en el interior, retira las pilas, enjuaga con abundante agua dulce la linterna y sécala.
Potencia económica: 3 m. / 150 h.
Intermitente: 400 h.

- Petzl – Tikkina Plus

Linterna frontal de 2 LED. Modelo ideal para niños. peso: 78 gr.



Gama compacta, ofrece una iluminación de proximidad blanca y homogénea con gran autonomía.
Compacta y ligera.
Foco orientable articulado.
Cómoda y estable: cinta elástica regulable y ajuste ergonómico.

Resistente al agua para utilizar en cualquier condición climática.

Distancia de iluminación: 13 metros.

Autonomía: 120 horas.

Funciona con 3 pilas AAA/LR03 (incluidas)

Peso: linterna (42 gr.) + pilas (36 gr.)= 78 gr.

- Tecsol – Frontal 8 LED

Linterna frontal de 8 LED con distintas posiciones de alumbrado. Peso: 120 g.



3 posiciones: utilizar 2 LED, 4 LED o 8 LED.
Vida estimada de los LED: 100.000 horas.
Tapa protectora resistente a los golpes.
Resistente al agua (no sumergible)
Cabezal regulable.
Alimentación: 3 pilas AAA.
Duración aproximada de las pilas: 2 LED (80 horas), 4 LED (40 horas), 8 LED (20 horas)

Aunque no se ha pretendido aquí hacer un monográfico de Petzl y de Black Diamond, lo que sí es seguro que la mayoría de los frontales mixtos y de iluminación sólo LED que se comercializan actualmente en España son de estas dos marcas. En Francia, la marca que más se comercializa es Petzl mientras que en el EEUU, donde los sistemas de iluminación eléctrica han experimentado un mayor desarrollo, una buena parte del mercado de sistemas de iluminación frontal se lo lleva la casa Speleo Technics.

6.3 Iluminación para buceo^{19,20}

Algunas de las linternas que se venden para actividades subacuáticas pueden ser acopladas al casco, bien para emplearlo como iluminación de emergencia o como fuente principal. Algunos modelos son relativamente pequeños y ligeros y proporcionan una eficiencia lumínica extraordinaria.

Entre otras, en España encontramos fácilmente:

- Subaqua – LED light 4x4W 50W
- Subaqua – Linterna 1 LED
- Dragonsub – Dragon Trilux
- Dragonsub – Dragon Microlitium

7. Exploración con LEDs

Muchas de las ventajas e inconvenientes de los sistemas de iluminación por LED que se han comentado anteriormente son aplicables a una exploración en cavidad. En exploración, tanto el peso del equipo personal como los desechos que se generan suponen un lastre importante a la hora de introducir y sacar el material de la cavidad. Los sistemas de iluminación por LED, además de proporcionar la estabilidad que no posee el carburo, reducen significativamente el tema del peso y volumen de material del equipo.

Es frecuente, además, encontrarse con sifones o incluso estrechamientos con una gran cantidad de aire, lo que dificulta la progresión con iluminación intermitente. Las tareas de espeleobuceo, por su parte, son impensables con los sistemas de iluminación tradicionales. Incluso una buena frontal eléctrica queda pobre en espeleobuceo si se compara con un frontal de LED.

A la hora de topografiar, los sistemas de iluminación eléctrica proporcionan un mayor campo de visión que la iluminación por carburo, lo que permite proyectar la luz a mayor distancia y, por tanto, facilitar las tareas de topografía. Sin embargo, hay que considerar también la desviación de los sistemas de medición por el campo electromagnético de los sistemas eléctricos. Es necesario mantener siempre los instrumentos de medición alejados de los sistemas de iluminación y, en cualquier caso, tener en cuenta la desviación que se produce por el mero hecho de estar los LED (o la fuente de alimentación) presentes.

Se han desarrollado además algunas lámparas de LED de dimensiones considerables empleadas en exploraciones con muy buenos resultados. Un ejemplo es el que se muestra en la figura 18, desarrollado por LNS Technologies²¹ que funciona con una batería de 12V o un transformador. Su diseño en forma de panel permite el acoplamiento de varios módulos proporcionando así una gran versatilidad para el diseño de lámparas multi - LED

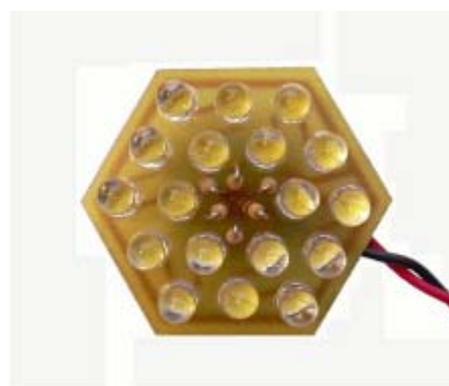


Fig. 18 Módulo de 18 LEDs para exploración en cavidades

Otro diseño de lámpara es la NOVA de Speleo Technics que funciona con LED de 5W proporcionando una extraordinaria luminosidad. Una de las ventajas de este sistema es su reducido tamaño, resistencia al agua y que es fácil regular la intensidad de los LED, permitiendo así un uso razonable de las baterías. En cuanto a las fuentes de alimentación, es muy versátil permitiendo baterías de ion – Li y pilas alcalinas²², aunque, realmente, es difícil que las pilas alcalinas den 5 W durante mucho tiempo. Una de las precauciones que hay que tener con este diseño es que hay que desconectar la lámpara de las baterías cuando no se use, y que deja una corriente residual que podría llegar a agotarlas.

Bateria	Low Level	High Level
Nova Nickel	18	8
FX-ion	22	10
Headlite (mk II)	12	5
FX3	50	13
Alcalina (MN 1203)	50	30
Alcalina (3x AA)	25	15

Tabla 3. Duración aproximada de la lámpara NOVA con diferentes fuentes de alimentación

En función, pues de los objetivos de la exploración, se puede optar por un sistema u otro de alimentación de la lámpara.

En la Fig. 19 se muestra una comparación realizada por la Escuela Francesa de Espeleología entre un sistema de iluminación formado por 5 LED y la frontal DUO de Petzl. Los LED funcionan incluso varios días después de que se apaga el DUO. La luz de los LED va disminuyendo progresivamente en intensidad durante varios días. Con lo cual, parece lógico pensar que se pudieran sustituir los sistemas de iluminación eléctrica tradicional por sistemas de iluminación por LED en aquellas actividades que vayan a durar varios días (como las campañas de exploración).

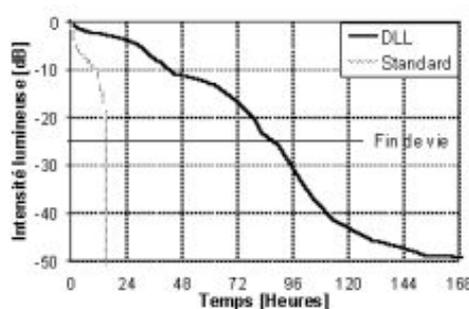


Fig. 19 Comparación entre un sistema de 5 LED y el frontal DUO de Petzl.

En equipos personales, la tendencia está en emplear sistemas frontales diseñados para buceo adaptados a los cascos de espeleología. La casa Dragonsub diseña un buen número de frontales estancos para actividades de buceo de 1, 3, 7 y hasta 14 LED que se pueden emplear, según modelos, con pilas o baterías. La autonomía de éstos ronda las 10 o 14 horas, siendo, en cualquier caso, el factor limitante la batería o las pilas.

Lo más interesante para exploración es el empleo de frontales con baterías que proporcionan una buena iluminación durante más de 15 horas. El ejemplo de la figura



de la derecha es un frontal de LED constituido por un LED de alta luminosidad que opera a 1 W y otros 6 mini LEDs que proporcionan luz a 0.4 W. El peso de este frontal (batería y cable incluido) es de 550 g, lo que le hace ser ideal para un equipo de progresión personal²³.

Fig. 20 Frontal de LED con batería ion - Li

8. Tendencias actuales

Como se puede observar, existen numerosos puntos a favor del empleo de la iluminación por LED en cavidades, siendo casi las principales desventajas las inherentes a la propia luz que suministran los LED y que no se puede utilizar para calentarse cuando hace demasiado frío. A su favor tiene, entre otras muchas ventajas que proporciona una muy buena intensidad de luz ocupando mucho menor volumen que en el empleo de lámparas de acetileno.

Una de las mejoras más inmediatas que se tiene que hacer en los LED (y que, cada día se está consiguiendo más) es la calidad de la luz. La luz que proporcionan los LED, como tiene tintes azulados, es demasiado fría, pero es simplemente una cuestión de acostumbrarse. Y uno se puede acostumbrar pronto puesto que la luz es muy homogénea. Además, daña los ojos si se mira directamente, lo que no ocurre con el carburo.

En la Sección Técnica de la Escuela Francesa de Espeleología se apuntan algunos indicios sobre las tendencias de la iluminación por LED:

- a) LED focalizados a menos de 10 grados para permitir iluminar mayores distancias, lo que permitiría reemplazar las lámparas halógenas convencionales
- b) Nuevos LED blancos de mayor capacidad en color y luminosidad. Existen LED blancos con un color más cálido que el que estamos habituados en los LED comerciales; son más amarillentos, pero todavía menos luminosos
- c) Desarrollo de pilas y baterías más ligeras y con mayor capacidad haciendo que el peso de los equipos disminuya



Como hemos visto anteriormente, existen multitud de diseños, casi para todos los gustos, de sistemas de iluminación por LED. No obstante, y debido a su relativa facilidad de montaje, siendo un poco manitas y con los componentes adecuados, uno puede fabricarse su propio sistema de iluminación. Se han encontrado descritas en la bibliografía un buen número de adaptaciones de frontales tradicionales a frontales de LED, obteniendo muy buenos resultados en incursiones a cavidades “normales”, pudiendo realizar visitas de 8 y 10 horas con iluminación únicamente por LED.

Otro sistema de iluminación eléctrica que podría desarrollarse son las lámparas fluorescentes en miniatura, ya que estas poseen una gran eficacia, aunque son muy frágiles. El fenómeno de fluorescencia no se puede regular, lo que supondría, en muchas ocasiones, un gasto innecesario de batería. Pero nunca se sabe dónde puede continuar el desarrollo.

9. Baterías

Las lámparas, sean LED o de cualquier tipo, necesitan energía eléctrica para poder funcionar. Por ello, por la importancia de la fuente de alimentación en el funcionamiento y rendimiento de nuestros sistemas de iluminación empleados en espeleología, no podemos dejar pasar este tema.

Las pilas y baterías son dispositivos destinados a producir energía eléctrica manteniendo una diferencia de potencial entre los dos bornes. Se fundamentan en la diferencia de potencial originales entre los dos metales que constituyen los electrodos y los elementos en que van sumergidos. En una pila actúa de borne positivo el electrodo cuya fuerza electromotriz sea mayor.

La pila más conocida es la de Volta, que consta de una lámina de cobre (Cu) y otra de Zinc (Zn) sumergidas en una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4). El Cu al ser el metal menos soluble que en Zn actúa como polo positivo y el Zn como negativo. La f.e.m. o d.d.p. es de aproximadamente 1 V. La energía que suministra la pila tiene su origen en los procesos químicos que se producen por la electrolisis del H_2SO_4 . Esta pila disminuye rápidamente su f.e.m. al captar el Cu los H libres del ácido produciéndose un fenómeno de polarización de la pila.

La pila común es la de Leclanché o pila seca que evita la polarización por la adsorción del MnO_2 . El electrodo positivo o cátodo de esta pila es una lámina de carbón rodeada de MnO_2 y una aleación de Zn conforma el polo negativo o ánodo. Ambos electrodos están sumergidos en una amalgama de mercurio y cloruro amónico, NH_4Cl . Esta pila proporciona un voltaje inicial de 1.58 a 1.7 C, el cual disminuye tras uso hasta 0.8 V

En cuanto a las pilas de mayor duración, recargables o de gran capacidad, podemos recurrir a las pilas alcalinas, de Ni – Cd o a los acumuladores de plomo. Las pilas alcalinas presentan una mayor duración que las normales aunque son más caras. Las baterías de Ni – Cd sin recargables pero también resultan más caras, lo que las hace más aconsejables para actividades específicas. En cuanto a los acumuladores de plomo, el peso es su principal desventaja, quedando reducidos únicamente para trabajos profesionales.

La duración de las pilas depende, fundamentalmente, del tipo de lámpara utilizado y de la utilización que demos a nuestro sistema de iluminación²⁴. Generalmente, para calcular la autonomía de la fuente se calcula la relación capacidad / intensidad, así, para una batería de 1200 mAh (NiMH) que alimenta 3 LED a 30 mA

$$1200 \text{ mAh} / 3\text{mA} \times 3 = 13 \text{ h}$$

Si queremos que un montaje nos dure más tiempo, podemos alimentar los LED con 1mA o 5mA, lo que nos daría una autonomía para unas 80 horas²⁵.

Es importante no perder de vista que la eficacia de los LED disminuya al aumentar la intensidad. De esta manera, se obtiene una luz mejor con 2 LED alimentados a 15 mA que uno sólo que trabaje a 30 mA.

Puesto que la fuente de alimentación es un elemento indispensable en cualquier montaje de iluminación mediante LED, vamos a hacer un breve repaso sobre las fuentes de alimentación más habituales disponibles en el mercado

9.1 Pilas no recargables

9.1.1 Salinas

Son las más antiguas y también son las más baratas, aunque como proporcionan tan poca energía, terminan saliendo caras. Se componen fundamentalmente de Zn y carbón y, debido a su limitada eficacia, se emplean en aparatos de bajo consumo. El contenido en mercurio de estas pilas se ha reducido considerablemente, así, si antes llegaba hasta el 6 – 8 % ahora se comercializan con un contenido en Hg que anda el 0.15 % para así reducir el impacto ambiental.

9.1.2 Alcalinas

Las más populares debido a su larga duración y potencia. Son más estables en el tiempo que las anteriores y poseen una buena relación energía / precio. Son ideales para dispositivos de bajo consumo o que se emplean esporádicamente. Las pilas alcalinas proporcionan una intensidad de corriente mayor que las salinas normales, de 1.35 a 1.5 V constante, pero se pueden gastar rápido si se les demanda una intensidad demasiado elevada. Las características propias de esta pila se consiguen añadiendo Hg, lo que las hace muy tóxicas.

En el mercado se pueden encontrar también un tipo de pilas alcalinas “verdes”, biopilas o ecopilas, que han reducido o eliminado su contenido en Hg y son, por tanto, menos agresivas para el medio.

Las pilas de Hg – ZnO se han empleado fundamentalmente como pilas “botón”; estas pilas tienen una densidad energética de aproximadamente 4 veces más que las pilas salinas

Marca	SAMSUNG	CEGASA	VARTA	PANASONIC	VARTA	CEGASA	ENERGIZER	DURACELL
Designación	R6 salina	R6 salina	R6 salina	R6 salina	LR6 alcalina	LR6 alcalina	LR6 alcalina	LR6 alcalina
Precio (euros)	0,25	0,25	0,46	0,15	0,80	0,79	1,06	1,02
Información y protección al consumidor								
Marcado CE	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
Instrucciones de uso y mantenimiento	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
Información de seguridad	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
Garantía	No indica	No indica	No indica	No indica				
Características técnicas								
Peso (g)	17,79	15,65	17,77	17,98	22,85	23,51	24,40	23,99
Dimensiones (longitud x diámetro cm)	50x14	50x13,5	49,5x14	50,2x13,9	50x14	50,3x14	50,2x14	50,1x14
Tensión nominal (V)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Tensión en vacío (V)	1,651	1,615	1,677	1,587	1,611	1,604	1,591	1,591
Aspecto exterior y acabado	Bien	Normal	Normal	Muy bien	Bien	Bien	Muy bien	Muy bien
Aptitud a la función								
Duración continua								
- Resistencia 75 Ω (radios) (horas:min)	50:41	66:27	65:05	60:51	165:08	171:03	165:59	162:39
- Resistencia 10 Ω (walkmans) (horas:min)	6:00	6:22	5:59	4:55	18:02	18:49	19:05	17:13
- Resistencia 3,9 Ω (juguete a radiocontrol) (horas:min)	1:46	1:29	1:21	1:20	5:48	6:10	6:51	4:48
- Resistencia 1 Ω (flash cámara) (horas:min)	0:9:12	0:3:11	0:4:29	0:3:19	0:51:27	0:44:55	0:54:40	0:48:10
Calentamiento	Normal	Bien	Bien	Muy bien	Mal	Muy Mal	Mal	Mal
Funcionamiento continuo	Bien	Muy bien	Muy bien	Mal	Muy bien	Muy bien	Muy bien	Muy bien
Funcionamiento discontinuo	Muy bien	Muy bien	Bien	Normal	Muy bien	Bien	Muy bien	Normal
Valoración global	3,9	4,0	3,5	3,4	3,8	3,5	3,4	3,8
Calidad global	Muy bien	Bien	Bien	Normal	Muy bien	Bien	Bien	Normal

Tabla 4. Tabla comparativa entre pilas alcalina y pilas salinas (extraída de la revista Consumer)

9.1.3 Litio

El área de investigación de las pilas que ha atraído más la investigación en los últimos años ha sido el campo de las pilas con ánodo de Li. Debido a su alta actividad química, se deben usar en electrolitos no acuosos, como sales, de manera que no hay separación entre ánodo y cátodo. El Li forma una capa protectora en su superficie que se rompe a voltajes cercanos a 3.6 V. Por esta razón, las pilas de litio poseen una mayor cantidad de energía, sin embargo son mucho más caras que las anteriores. A su favor tienen una gran autonomía y que son las únicas pilas que se pueden usar, casi sin problemas a muy bajas temperaturas (hasta 15 °C). Estas baterías, además, permanecen casi inalteradas durante un periodo de vida media de unos 10 años.

9.2 Baterías recargables

9.2.1 Ni – Cd

Las más antiguas y también las más baratas. Tienen la característica de poder dar corrientes excepcionalmente altas, pudiéndose cargar rápidamente cientos de veces. Estas baterías tienen como principales ventajas su estabilidad en el tiempo, su rápida respuesta a la intensidad de corriente y la tolerancia al abuso de sobrecarga, mientras que sus principales inconvenientes residen en que, primero, son muy pesadas y, debido a su limitada capacidad se hace necesario transportar varios juegos, lo que supone un importante aumento de peso en el material personal del espeleólogo. Otro punto a favor de estas pilas es que se comportan muy bien a bajas temperaturas.

Estas pilas funcionan mejor si se dejan descargar completamente antes de cargarse, ya que puede producirse un efecto conocido como “efecto memoria” en el que las baterías se comportan como si tuvieran menos capacidad.

9.2.2 Ni – MH

La tecnología de baterías Ni – MH ha supuesto un importante desarrollo en todos los campos. Poseen una excelente capacidad energética y proporcionan una intensidad de corriente óptima para un buen número de dispositivos. Estas baterías pueden durar hasta 2 veces más que unas alcalinas normales.

Otra de las ventajas de este tipo de baterías es que no tienen efecto memoria y se cargan rápidamente. La tensión de corriente proporcionada ronda los 1.5 V y se pueden recargar entre 500 y 100 veces. Su mayor inconveniente es que se pueden descargar relativamente rápido y no las podemos tener cargadas en previsión de ser empleadas en caso de imprevisto (nos pueden jugar una mala pasada).

9.2.3 Ion Litio

De muy buenos resultados pero no disponibles en el formato Standard AA/R6. Además, un cortocircuito o una mala recarga pueden hacer que exploten. Para darles más seguridad, se puede adjuntar un circuito electrónico de seguridad y encerrarlo en un compartimento estanco. Como ventajas posee una mayor relación energía / tamaño y que se puede conocer en cada caso el nivel de carga de la batería. Como principal desventaja es que los fabricantes no tienen tamaños estandarizados, cargadores excesivamente caros y difíciles de encontrar y por tanto, podrían hasta ser sustituidos por otros dispositivos en breve.

9.2.4 Ácido – Plomo

Este tipo de pila ha sido la pila recargable más ampliamente usada en el mundo. La mayoría de este tipo de pilas son contruidas de planchas de plomo o celdas, donde el electrodo positivo está cubierto de PbO cristalino. El electrolito es H₂SO₄, participando éste de forma activa en las reacciones con los electrodos. En estas reacciones se forma PbSO₄ y lleva la corriente en forma de iones.

Estas pilas poseen una densidad energética de aproximadamente 20 veces mayor que las anteriores, sin embargo son extremadamente pesadas y no se pueden emplear en equipos portátiles.

Anexo I

Ventajas e inconvenientes de los sistemas de iluminación por carburo e iluminación por LED

	Acetileno	20 LED, 4 pilas LR14
Peso	El peso del carburero muchas veces es superior a 1000 g	400 g. El peso de las pilas, frontales y acumuladores disminuye cada año
Volumen	El carburero ocupa unas 4 veces más que un paquete de pilas y estorba en cavidades estrechas	Las pilas se pueden llevar en el mono. Cada año las pilas son más pequeñas y ofrecen mejor relación energía / volumen
Autonomía	8 horas de luz con 3 cargas de agua. Se consumen aproximadamente 50 g de acetileno por hora y es muy difícil (o imposible) regular el consumo	Alrededor de 20 h de luz. El consumo es de unos 14 g/h (las pilas) y es fácil regular la intensidad de la luz (y por tanto economizar el gasto)
Calidad de la luz	Fuerte e intensa. Luz cálida y no dirigida	Luz azulada y ligeramente focalizada. Hace daño a la vista del compañero
Fiabilidad	Sin comentarios	Muy estable durante un buen número de horas. Insensible al viento, agua o inestabilidades
Calor	Fuente de calor	Ninguno
Ecología	Impacto de las purgas en las cavidades. Necesario sacar desechos al exterior	Pilas muy contaminantes si se abandonan. Necesario sacarlas al exterior
Precio de compra	Unos 100 € carburero y aceto	Unos 300 € un buen frontal
Gasto en uso real	El carburo, aunque no es caro, cada vez cuesta mas comprar	7 – 33 cts la hora en pilas

Anexo II

La electrónica es la rama de la Ciencia y la Tecnología que se ocupa del estudio de las leyes que rigen el tránsito controlada de electrones a través de la materia, gases o semiconductores, así como del estudio y desarrollo de los dispositivos en los que se produce este movimiento controlado y de las aplicaciones que se ello se deriven.

La materia está formada por átomos, y éstos, están formados, entre otros, por protones, con carga positiva, y electrones, con carga negativa. Según el modelo atómico más aceptado, los protones se encontrarían todos juntos en un núcleo, y los electrones se encontrarían girando en forma de órbitas alrededor del núcleo central. Los electrones, por tanto, tienen mucha mayor movilidad que los protones, de manera que se pueden describir los movimientos eléctricos de los materiales en función de la adición o sustracción de electrones a

los átomos. El balance total de protones y electrones, en principio es igual a cero (n° protones = n° electrones). Así, un material cuyos átomos tienen un exceso de electrones, se dice que está cargado negativamente, mientras que si se quitan electrones, lo que se hace es cargar positivamente al material.

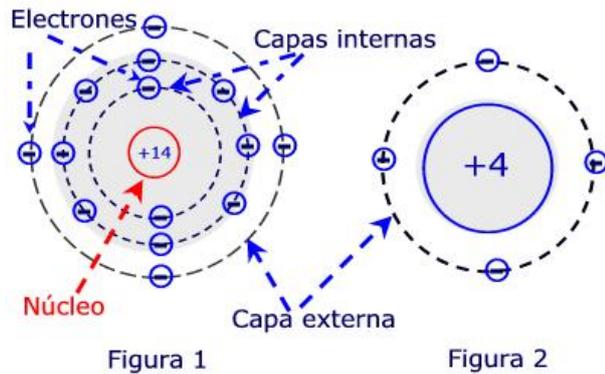


Fig. 1 Esquema de un átomo

En un conductor existen cargas libres que se mueven por la fuerza ejercida sobre ellas por un campo eléctrico. Estas cargas libres son los electrones. Un gas en condiciones adecuadas, como el de un anuncio luminoso de neón o el de una lámpara fluorescente es también un conductor.

Existe cierto número de dispositivos eléctricos que tienen la propiedad de mantener constantemente sus bornes a potenciales diferentes. Los más conocidos son la pila seca, la batería de acumuladores y la dinamo. Si los extremos de un hilo metálico se conectan a los bornes de uno de estos dispositivos, se genera un campo eléctrico o gradiente de potencial dentro del hilo en el que se produce un movimiento de electrones desde el polo negativo hacia el positivo.

Una gran parte de los estudios que asientan las bases de la electrónica y electricidad son anteriores a los postulados sobre la estructura de la materia, por lo que se ha generalizado, y se mantiene hoy en día, que el flujo de cargas es desde el polo positivo hasta el negativo. Se admite pues, que la circulación de cargas se lleva a cabo desde los puntos de potencial positivo a los puntos de potencial negativo.

II.1 Intensidad de corriente

El transporte de cargas de un extremo a otro a través del conductor se realiza con una cierta velocidad, de tal manera que se puede “contar” el número de electrones que pasan por una determinada sección por unidad de tiempo. El transporte de cargas en sí se denomina **corriente eléctrica** y la cantidad de carga que pasa por unidad de tiempo se denomina **intensidad de corriente**

$$I = \frac{Q}{t}$$

La intensidad de corriente se mide en Amperios (A)

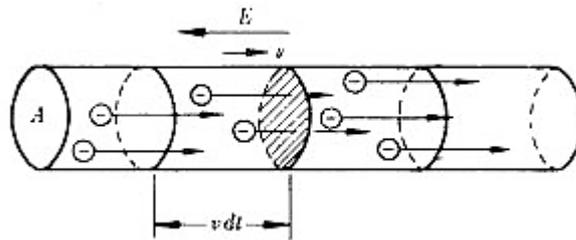


Fig. 2 Movimiento de electrones libres en un hilo metálico

II.2 Ley de Ohm

Tal y como hemos visto anteriormente, los materiales se comportan como conductores o como aislantes en función de la facilidad para transportar la corriente eléctrica. Ningún material, sin embargo, es estrictamente aislante o conductor, ya que todos presentan una cierta resistencia al transporte de la corriente, siendo esta resistencia mayor en el caso de los materiales aislantes que en el caso de los conductores.

La dificultad que ponen los materiales al paso de la corriente eléctrica se denomina **resistencia eléctrica**, la cual depende de la naturaleza del material y sus dimensiones.

Como hemos visto en el apartado anterior, la circulación de corriente eléctrica se produce porque existe una diferencia de potencial entre dos puntos. La intensidad de corriente es mayor cuanto mayor es la diferencia de potencial entre ambos, y es inversamente proporcional a la resistencia que el material pone al movimiento de cargas. Es lo que se conoce como **Ley de Ohm**

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

Anexo III

Especificaciones Técnicas de LED fabricados por la casa Nichia

REFERENCIAS

- ¹ M. Corvi. Appunti Speleo (2005)
- ² "All the word units", Joint Press & Publications
- ³ D. Gibson, CREG Journal 27 (1996)
- ⁴ www.wikipedia.com
- ⁵ The Advanced Semiconductor Magazine 18(2) (2005) 20
- ⁶ R. Market, Speleonics 6(2) (1986) 14
- ⁷ www.ifent.org
- ⁸ S. Nakamura, J. Crystal Growth, 201-202 (1999) 290
- ⁹ M. Demierre, Spelunca 89 (2003)
- ¹⁰ I. Vázquez de la Torre 1861 6(1) (2005) 47
- ¹¹ R. Zaragoza Cardéis, G.E.C.
- ¹² www.forosdeeletronica.com
- ¹³ D. Strait, Speleonics 22 (2001) 3
- ¹⁴ www.pasarlascanutas.com/pulsera/pulserantiestatica.htm
- ¹⁵ H. Schneiker, HDS Systems (de www.hdssystems.com)
- ¹⁶ www.theledlight.com
- ¹⁷ www.nichia.co.uk
- ¹⁸ www.aresta.com
- ¹⁹ www.cascoantiguo.com
- ²⁰ www.dragonsub.com
- ²¹ www.techkits.com
- ²² D. Gibson, Descent 175 (2003)
- ²³ www.ledcavinglamp.co.uk
- ²⁴ N. Tallada, M. Fernández. "Fundamentos de la práctica espeleológica" F.M.E. (1987)
- ²⁵ <http://olivier.testa.free.fr/leds.html>