

Iluminación con LEDs blancos

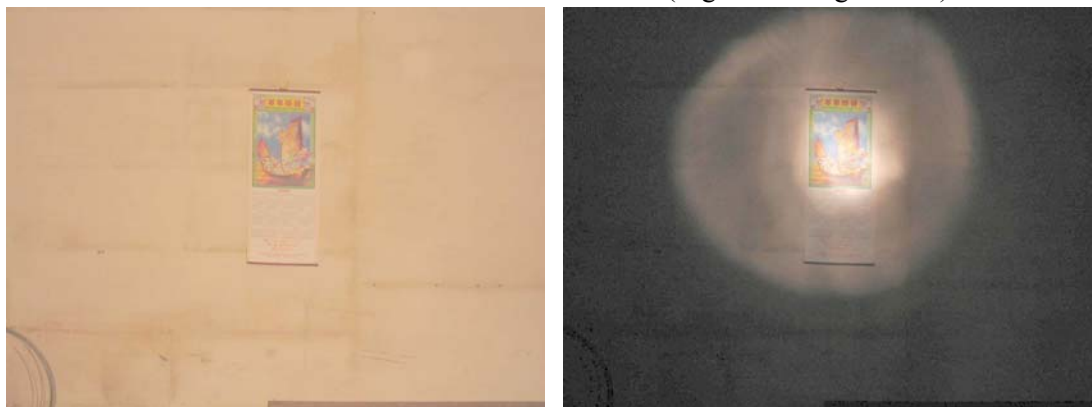
Autor: Ramón J. Zaragoza Cardells

Perteneciente al Grupo de Espeleología Comando (G.E.C.)

E-mail: ramon.j.zaragoza@uv.es

-1.Introducción

El sistema de iluminación en espeleología es vital para la buena visión y seguridad en las cavidades, sin embargo apenas ha cambiado en las últimas décadas, por no remontarnos incluso a los comienzos de la espeleología. El sistema más utilizado sigue siendo la luz del carburero como sistema principal y la frontal eléctrica con una o dos bombillas como sistema secundario. El carburero posee una luz muy uniforme pero de escaso alcance y muy rojiza, la frontal eléctrica normal posee un haz de luz más concentrado de mayor alcance pero muy irregular en la distribución de la intensidad luminosa (Fotos 1 y 2). Ambos sistemas se complementan pero suelen presentar numerosos inconvenientes. Por suerte hoy en día ya es posible disponer de la iluminación casi perfecta, para ello se hace uso de un nuevo tipo de diodos luminosos de alta eficiencia. Estos son los LEDs (Light Emitting Diodes) de luz blanca.



Fotos 1 y 2. Visión suministrada por el carburero a máxima potencia (izquierda) y una frontal eléctrica convencional (derecha)

Aquí presentamos la descripción de las características de este tipo de diodos así como una visión general para el diseño y construcción de sistemas de iluminación basados en este tipo de tecnología, tanto para frontales auxiliares como para frontales usadas como luz principal en cavidades. Haremos mención especial a dos modelos de frontales desarrollados por nosotros, cuyas primeras pruebas las iniciamos a mediados del 2000 y el primer sistema completamente terminado, para uso en cuevas, se realizó a principios del 2001.

-2.LEDs de luz blanca. ¿Qué son?

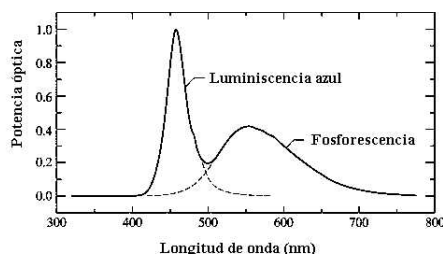


Figura 1. Espectro de emisión de un LED de luz blanca

Los LEDs de luz blanca son diodos azules, que emiten luz a una longitud de onda de unos 460nm, recubiertos con una capa de un derivado de fósforo. El fósforo absorbe la luz azul y la reemite a distintas longitudes de onda en el espectro visible, generando luz blanca (Figura 1). Están basados en semiconductores de InGaN (Nitruro de Indio y Galio), difíciles y raros, y por tanto caros. Los primeros diodos de este tipo surgieron a mediados de los 90, desarrollados por la casa Nichia.

Existen varios formatos de LEDs de luz blanca, pero quizá el más adecuado para nuestros propósitos sea el de 5 mm de la Figura 2 y Foto 3. La parte negativa del diodo (cátodo) se encuentra unida directamente a un pequeño reflector metálico parabólico que a su vez sirve de terminal de salida. Por este terminal se disipa la mayor parte del calor generado durante el funcionamiento del LED. El polo positivo del diodo se encuentra soldado al terminal de salida (ánodo) a través de un fino conductor metálico, normalmente de oro. El diodo se encuentra recubierto de una película del derivado de fósforo que le da una tonalidad amarillenta. El conjunto se encuentra encapsulado en una resina epoxídica de calidad óptica (alta transparencia) que sirve de soporte, protección y óptica de enfoque

Existen LED con distintos reflectores lo que permite variar el ángulo de apertura del haz luminoso. La mayoría de los LEDs de luz blanca, útiles a nuestros propósitos, se comercializan con ángulos de visión de 20°, 50° y 70°. Este ángulo no es el de apertura máxima, sino que se refiere al doble de la apertura en la cual la intensidad luminosa ha disminuido la mitad respecto a la máxima central. Por ejemplo, en uno de 20°, la intensidad ha disminuido a la mitad a los 10° de apertura respecto al centro focal. La apertura no cambia la cantidad de luz emitida

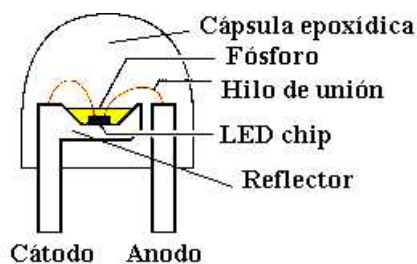


Figura 2. Visión esquemática de un LED de luz blanca



Foto 3. LED

(se suele dar en lumen), solo la forma en que ésta se distribuye.

Veamos las características eléctricas que más nos pueden interesar:

-En primer lugar destacar que estos LEDs son sensibles a la electricidad estática y por tanto es mejor mantenerlos, antes de ser montados en el sistema, en plástico antiestático o en papel de aluminio. Para su manipulación es aconsejable descargarse de electricidad estática tocando una buena toma de tierra (puede ser una tubería de agua metálica) y trabajar con soldador y pulsera antiestática conectados a tierra.

-Un LED al ser un diodo posee una polaridad que debe ser respetada, una inversión de polaridad con voltaje excesivo los puede dañar. Normalmente el voltaje inverso máximo es de unos 5v.

-La intensidad nominal es de 20mA (miliamperios) con una caída de tensión típica de 3.6V, lo que corresponde a una potencia disipada de 72mW (milivatios). Los parámetros máximos son de 30mA y 120mW, siempre que se mantenga el conjunto a temperaturas inferiores a 25°C. Si se supera la temperatura máxima de la unión semiconductora (unos 100°C) el diodo se funde. En realidad, los LEDs poseen una respuesta no lineal de la intensidad frente al voltaje, incluso entre diodos de la misma procedencia se observan variaciones notables de estas características. Por ejemplo, nosotros medimos entre un total de unos 200 diodos de la casa Nichia, variaciones de voltaje entre 3.27V y 3.85V a una intensidad fija de 27mA (Figura 3).

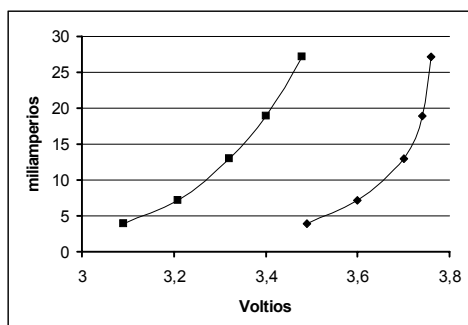


Figura 3. Relación entre la intensidad y el voltaje para dos diodos de la casa Nichia

-Teóricamente con los LEDs se pueden conseguir eficacias luminosas de más de 200 lumen/vatio, aunque actualmente está entre 15 y 25 lumen/vatio. En algunos sitios se dice que su eficacia está muy por encima que la mayoría de otras fuentes luminosas, pero esto es totalmente falso. Por ejemplo una bombilla normal de las utilizadas en una frontal tiene unos 5 lumen/vatio, una buena halógena puede estar sobre 15-20 lumen/vatio, las fluorescentes rondan los 80 lumen/vatio y las de sodio de baja presión (esas amarillentas utilizadas en alumbrado

público) los 150 lumen/vatio. Como se ve superan a las lámparas de wolframio normales y están en el orden o ligeramente por encima de las halógenas, pero están bastante alejadas aun de otros sistemas de iluminación.

-La duración de los LEDs de luz blanca es de unas 100.000 horas. Esta es una duración del elemento semiconductor y en condiciones de laboratorio. En realidad el fósforo, incluso el encapsulado epoxídico se degradan con el tiempo y sobre todo con la temperatura, lo que se traduce en una pérdida progresiva de la luminosidad y el color. Un cálculo más realista puede situar la duración en unas 10.000 horas, con una pérdida luminosa del 50%.

-La intensidad luminosa depende también de la temperatura de la unión semiconductora de forma que cuanto más baja sea ésta, mayor es la intensidad.

-La luz que emiten es una luz blanca ligeramente azulada (Foto 4). Para la medida de la tonalidad de la luz blanca se utiliza como referencia la luz emitida por un cuerpo negro ideal a distintas temperaturas medidas en grados Kelvin (K). A temperaturas bajas la luz tiene una tonalidad amarillo-naranja y conforme aumenta la temperatura la tonalidad se vuelve azulada. Por ejemplo las lámparas de wolframio estándar emiten por debajo de 2900 K (muy amarillas), las halógenas entre 2900-3100 K, las fluorescentes entre 2700-4000 K y los LEDs blancos de la casa Nichia a 6500 K (existen de otros rangos). Como referencia indicar que la luz del día es de 5800 K. Como se ve la luz de los LEDs es muy parecida a la luz del día, pero un poco más azulada.

-3.Ventajas e inconvenientes de los LEDs de luz blanca.

Existen unas ventajas obvias como son la resistencia mecánica (algunos de nosotros hemos llevado LED rojos en el casco, directamente expuestos a los golpes, durante más de 3 años y han sobrevivido), luz parecida a la del día (mucho más adecuada al ojo humano), no queman ni contaminan y larga duración eléctrica (prácticamente toda la vida), mientras que una bombilla de frontal suele durar menos de 100 horas y con un golpe se pueden romper.

Sin embargo algunas diferencias no son tan obvias, pero son las que marcan una clara ventaja respecto a otras iluminaciones eléctricas o de carburo. Cabe destacar:

-Son totalmente regulables y podemos trabajar a distintas intensidades sin perder eficacia, incluso con bajas intensidades esta aumenta hasta en un 30-40%. Se puede aprovechar totalmente la capacidad de las pilas. Son una clara diferencia con las frontales normales, las cuales difícilmente son regulables y aunque producen una luz razonable con las pilas nuevas, ésta decae rápidamente al bajar un poco el voltaje de éstas. El hecho real es que a pesar de que el rendimiento luminoso de los LEDs y de las buenas halógenas es similar el aprovechamiento de las pilas por parte de los LEDs es tal que su duración se multiplica por 5 o 10 y sin pérdidas de intensidad o color.



Foto 4. Visión suministrada por la frontal-1 a LEDs a máxima potencia

-Al disponer los LEDs de su propio proyector no necesitan de uno adicional y lo que es más importante, toda la luz se dirige de manera uniforme hacia la zona de visión del ojo, con mayor intensidad en la zona central y disminuyendo suavemente hacia la periferia (Foto 4). En una frontal convencional, por muy buena que sea la parábola proyectora (no suele ser el caso), siempre existen unas zonas de mucha más intensidad que otras y además la luz suele acabar de manera abrupta a determinados ángulos de visión (Foto 2). Esto es fatal para la adaptación del ojo que ajusta la apertura de su iris a los puntos de máxima intensidad y por tanto no ve correctamente en las zonas oscuras

que deja el haz de la frontal. El resultado es que a pesar de poseer en algunos casos una buena

intensidad, la visión es bastante defectuosa hasta el punto de arriesgarse a sufrir algún percance no deseado. El carburero en cambio posee una iluminación mucho más agradable y uniforme (Foto 1) y si se le da potencia, de gran cantidad de lúmenes. Pero por la forma de la llama y al no poseer normalmente proyector (y si se tiene se inutiliza con el negro del humo), irradia en todas las direcciones de una esfera con la pérdida considerable de luz en la zona de visión y el deslumbramiento y consiguiente pérdida de adaptación ocular al resto de espeleólogos próximos (el ojo tarda entre 15 y 30 minutos para adaptarse a la oscuridad). Como todo el mundo sabe, solo permite visionar objetos relativamente cercanos.

Algún inconveniente también tienen los LED blancos, por ejemplo no son baratos y resultan difícil de conseguir, pero esto se solucionará con el tiempo. Pero quizá el mayor inconveniente es que para su correcto funcionamiento necesitan trabajar a intensidad constante. No les gusta en absoluto trabajar a voltaje constante ya que si éste se mantiene, sucede que conforme aumenta la temperatura de la unión semiconductora se produce un aumento de la intensidad a través del diodo. Este aumento de intensidad genera a su vez un nuevo aumento de temperatura y el LED puede entrar en una avalancha térmica y ser destruido. Si se observa la Figura 3, es como si el aumento de temperatura provocara el desplazamiento de la respuesta intensidad/voltaje hacia la izquierda de la gráfica. Por tanto cualquier montaje con LEDs, para que sea estable, debe de poseer algún tipo de limitación de intensidad y una buena disipación térmica.

-4.Diseño de una frontal con LEDs

Hay que distinguir entre el diseño de una frontal con pocos LEDs usada como luz auxiliar o como iluminación en el exterior de cavidad y el diseño y desarrollo de un sistema de luz principal capaz de sustituir al carburero y a la frontal convencional.

-4.1-Frontal auxiliar.

En este caso los requisitos de fiabilidad y duración no son muy exigentes y bastará con evitar la inversión de la polaridad de las pilas y utilizar algún tipo simple de regulación de intensidad para evitar la avalancha térmica. Como los requerimientos de disipación no son muy grandes puede ser construida aprovechando la carcasa de una frontal comercial. No vamos a entrar en detalles de construcción ya que existen muchas posibilidades (tantas como frontales comerciales). Únicamente haremos mención a las formas más habituales y simples del control de intensidad mediante el uso adecuado de resistencias limitadoras (Figura 4).

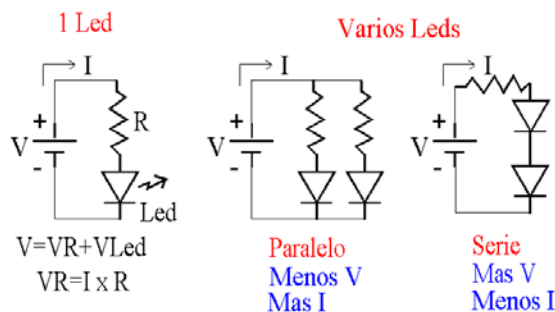


Figura 4. Opciones para una frontal auxiliar

Con un solo LED el uso de una resistencia adecuada (R) en serie evitará el problema de la avalancha térmica ya que cualquier aumento de intensidad provocará un aumento de la caída de voltaje en la resistencia ($V_R = I \times R$). Como el voltaje total (V) se mantiene, no le queda más remedio al LED que bajar su voltaje (V_{Led}) por lo que automáticamente baja la intensidad. Este sistema tan simple no mantiene la intensidad constante a largo plazo, ya que conforme las pilas se van agotando el voltaje total (V) y por tanto la intensidad (I) bajan y además parte de la potencia de las pilas las disipa la resistencia (R). Veamos un caso práctico: Tenemos un LED que consume 20 mA a 3.6V (es lo más habitual pero como hemos indicado antes existe una variación de LED a LED, si no podemos o queremos medir cada LED podemos asumir el valor habitual), y queremos hacerlo trabajar a una intensidad máxima de 20 mA. (0.02A) Necesitamos 3.6V o más para alimentarlo, elegimos 4.5V (pila de petaca o tres pilas en serie) y por tanto la resistencia tiene que eliminar

0.9V (4.5V pila-3.6V LED). La resistencia tendrá que ser de 45 ohmios ($0.9V/0.02A$). Se elige el valor estándar más próximo de 47 ohmios.

Con dos o más LEDs tenemos la opción de montarlos en serie o en paralelo. En el primer caso solo hace falta una resistencia limitadora, pero necesitamos el doble (o el triple con tres LEDs...) de voltaje. En el segundo caso necesitamos una resistencia limitadora por cada LED y multiplicar la intensidad. Los cálculos son similares al caso anterior.

-4.2-Frontal principal.

Para el diseño y construcción de una frontal a LEDs, que pueda ser utilizada como luz principal en una cavidad y por tanto como sustituto del carburero, se debe considerar todo lo anteriormente mencionado y debe ser construida robusta y fiable. Se debe prestar especial atención al control de la intensidad y a una eficaz disipación térmica.

Únicamente vamos a comentar dos sistemas desarrollados por nosotros, pretendiendo dar una idea suficiente para que cualquier persona con unos conocimientos mínimos de electrónica y algo de habilidad manual pueda construirlos o basarse en ellos para desarrollar su propio sistema. El primer modelo realizado, al que llamaremos frontal-1, se finalizó al inicio del año 2001 y se construyeron 8 montajes. El segundo modelo, con 9 montajes realizados, se hizo al año siguiente y lo llamaremos frontal-2.

Vamos a considerar tres apartados:

- 1-Tipo y número de LEDs.
- 2-Disposición y control eléctrico/electrónico de los LEDs.
- 3-Construcción mecánica.

Veamos cada uno de estos apartados.

-4.2.1-Tipo y número de LEDs.

Un carburero, con una llama estable potente, suele suministrar entre 200 y 300 lúmenes, con potencias punta de 400 lúmenes difíciles de mantener. Un LED trabajando a su potencia nominal de 72 mW, considerando una eficacia de 20 lumen/vatio, produce 1.44 lúmenes y harían falta 277 LEDs para generar 400 lúmenes. Esos 400 lúmenes se distribuyen a lo largo de una esfera y solo una parte se dirige hacia la zona de visión del ojo. Aunque el ángulo de visión humana abarca algo más de 180° en realidad sólo en la zona central tenemos la máxima resolución visual, y ésta es la que necesita ser iluminada con la máxima intensidad. Se puede considerar esta zona de 90° e incluso inferior. Según esto para iluminar esa zona con la misma potencia que el carburero necesitaríamos unos 60 lúmenes, que serían 42 LEDs. Esta es una cantidad más razonable, pero aun excesiva.

Podemos enfocar el problema desde otro punto de vista, es decir en vez de hablar de potencia luminosa (lúmenes) hablemos de intensidad luminosa (candelas). El carburero a plena potencia produce una intensidad luminosa de unas 30 candelas (cd) de manera uniforme en cualquier parte de su esfera de iluminación. Los LEDs producen la máxima intensidad en el centro y luego, dependiendo del ángulo de apertura, desciende esa intensidad de manera progresiva hasta unos $120-180^\circ$. Los de 20° producen en el centro 5.6 cd y los de 50° 1.56 cd (datos de mediados del 2000 de LEDs de la casa Nichia). Por las características y antecedentes, parece que lo más adecuado es usar los de 20° . Usando estos LEDs, para producir 30 cd en el centro de visión, necesitamos únicamente 5 ó 6 unidades (fantástico!!!). Pero claro esta intensidad es en el centro, por ejemplo a 10° la intensidad será de 15 cd (la mitad). Un número más adecuado es 24 diodos que permite multiplicar por 4 ó 5 la intensidad en el centro, respecto al carburero, y mantener una intensidad suficiente en ángulos de visión de hasta 40 u 80° , muy adecuado al ojo humano. Esto nos permite visualizar objetos a una distancia muy superior a la del carburero, con lo que prácticamente no va a ser necesaria una luz auxiliar de profundidad, salvo que se quiera ver objetos situados a más de 30 o 40 metros.

Esta es la opción elegida en la frontal-1. Un ligero inconveniente es que a muy cortas distancias, cuando uno se mira los pies o un par de metros más adelante, el haz luminoso presenta mucha intensidad en el centro respecto a las orillas. Esto se puede solucionar, a costa

de perder algo de profundidad, cambiando algunos LEDs de 20° por otros de 50°. Esta es la opción utilizada en la frontal-2 que lleva solo 18 LEDs, cinco de ellos de 50°

-4.2.2-Disposición y control eléctrico/electrónico de los LEDS.

Para la frontal-1 los 24 LED se han dispuesto en 8 series en paralelo de 3 diodos cada una ($8 \times 3 = 24$). Los diodos están calibrados de forma que el voltaje de cada serie, medido a la máxima intensidad de uso, sea idéntico (ver Figura 5). En nuestro sistema la máxima intensidad es de 22.5mA por LED (consumo total de $22.5 \times 8 = 180\text{mA}$) y el voltaje de 10V. Esto evita el uso de resistencia limitadoras lo que aumenta la eficacia del conjunto y por tanto la duración de las pilas, pero requiere una medida minuciosa de cada LED y su posterior selección, entre un gran numero de ellos. La frontal-2 posee los 18 LEDs en paralelo, cada uno con su resistencia limitadora calculada para cada LED. La máxima intensidad es de 15mA por LED (consumo total de $15 \times 18 = 270\text{mA}$) y el voltaje de 3.7v. Posee menor rendimiento, mayor estabilidad y no se necesita tantos LEDs para realizar la selección.

El control de la intensidad de los LED, para un sistema estable con el tiempo, es uno de los problemas más difíciles de resolver. La opción mejor, desde el punto de vista del aprovechamiento energético, es el uso de un conversor de corriente continua a intensidad que puede ser ascendente (step up) o descendente (step down). Esta opción la descartamos ya que es un sistema bastante complejo, con componentes difíciles de encontrar, extraordinariamente sensible a la humedad y además trabaja a altas frecuencias con lo que al ir cerca de la cabeza, no muy recomendable. Finalmente nos decidimos por una fuente electrónica de intensidad constante de alta eficacia (ver Figura 5) que mantiene estable la intensidad de la luz con el tiempo y permite un buen aprovechamiento de las pilas. Todo el control lo realiza un pequeño integrado (LM334), que es capaz, mediante una pequeña caída de tensión de solo 0.064v en la resistencia conectada entre R y V-, de regular perfectamente la intensidad que atraviesa los LEDs. El transistor PNP (BD136) únicamente aumenta la intensidad que puede suministrar el integrado. Variando la resistencia, mediante el conmutador, se modifica la intensidad y por tanto la luz que suministran los LEDs. El frontal-1 posee un conmutador rotativo que permite 6 potencias luminosas. El frontal-2 posee un conmutador de palanca (más fiable que el rotativo) que solo permite 3 posiciones y la matriz de 24 diodos se sustituye por los 18 diodos con resistencias limitadoras en serie (similar a Figura 4, opción paralelo). En este último caso, la potencia mínima está entre la 2 y 3, la media entre la 3 y 4 y la máxima como la 5 de la frontal-1.

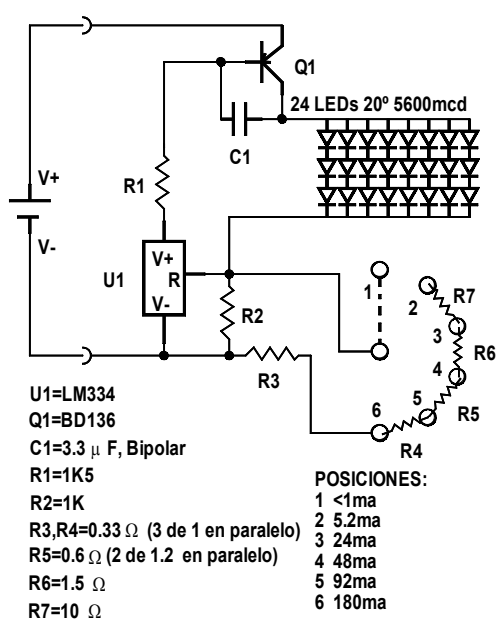


Figura 5. Esquema electrónico del frontal-1.

Por precio, asequibilidad, autonomía y peso, las pilas tipo AA (LR6) alcalinas son las ideales. Por supuesto se pueden usar de otro tipo e incluso recargables.

Hemos utilizado 9 pilas alcalinas tipo AA soldadas en serie, para evitar fallos debido a falsos contactos en la frontal-1. Esta opción permite aprovechar las pilas desde su carga máxima a 13.5V (9×1.5), hasta unos 10V a máxima potencia o hasta unos 7.2V con potencias mínimas (0.9V por pila). La falta de aumento de intensidad luminosa en las potencias superiores nos avisa de un cambio de pilas.

Además hemos incluido en el frontal-1 un sistema de emergencia con 3 diodos y resistencias limitadoras con dos potencias no reguladas y con sistema de baterías (tres pilas alcalinas tipo AAA soldadas en serie) totalmente independiente de la luz principal. Este sistema auxiliar es similar en prestaciones a la Tikka de Petzl.

La frontal-2 utiliza 4 pilas alcalinas tipo AA, en un portapilas. No lleva luz de emergencia y pesa menos que la frontal-1. En este caso es aconsejable llevar una pequeña linterna auxiliar.

-4.2.3-Construcción mecánica.

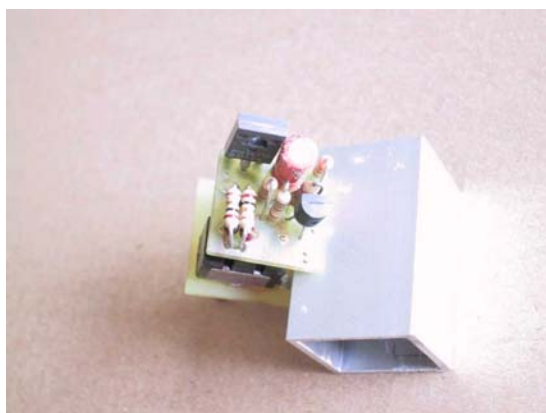
Todo el montaje mecánico se diseñó a partir de cero y usando una carcasa de aluminio (uno de los metales más ligeros y que mejor disipan el calor) fabricada a partir de un perfil estandarizado rectangular, de 60x40mm para el frontal-1 y de 60x20mm para el frontal-2.

En el caso del frontal-1, los 27 diodos y electrónica van soldados, con soldadura doble, en una placa de circuito impreso de doble cara diseñada ex profeso. Todo el conjunto y las pilas de emergencia van alojados en esta carcasa frontal, que aunque no se ha diseñado para ser sumergible, si que es estanca y permite ser mojada he incluso soporta pequeñas inmersiones. Solo las baterías principales van alojadas en una caja situada en la parte posterior (o en el interior incluso) del casco y unidas mediante un conector RCA (Fotos 5 y 6). Esto permite desconectar fácilmente las pilas y ser sustituidas en caso necesario. El conjunto total es muy ligero, unos 400 g. Teniendo en cuenta que solo las pilas ya pesan 250 g, el resto apenas llega a los 150 g. Para que sirva de comparación solo la frontal, el piezo, salida de acetileno y tubo de los sistemas tradicionales pesan entre 400 y 500 g y son más voluminosos. Además está el carburero, carburo y agua que añaden entre 500 y 1000 g más.



Fotos 5 y 6. Vistas lateral y frontal del primer montaje a LEDs (frontal-1)

La frontal-2, posee la electrónica separada de los LED en su caja estanca independiente y alojada en la parte trasera del casco junto con las pilas (fotos 7, 8 y 9). La carcasa frontal solo lleva los 18 LEDs y sus resistencias limitadoras, con un sistema de enfriamiento más eficaz.. Su peso total es de 230 g.



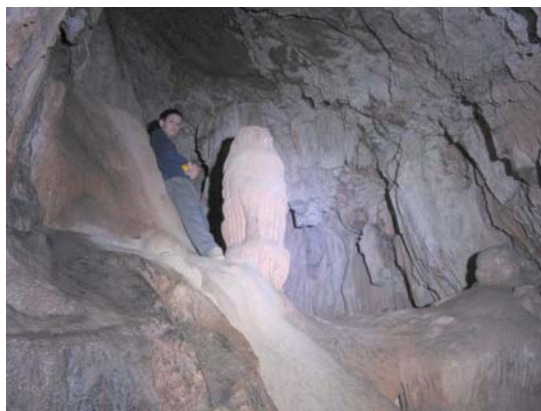
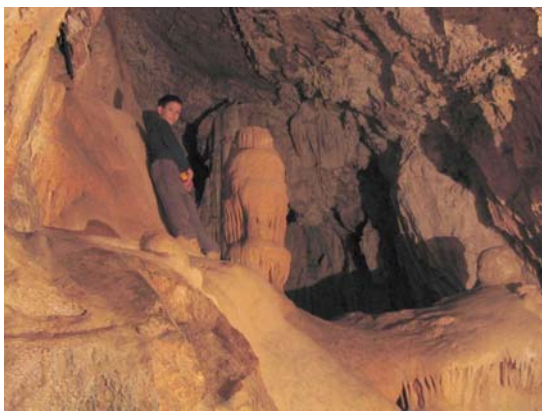
Fotos 7 y 8. Electrónica y montaje de los LEDs en la frontal-2

-5. Uso práctico y futuras expectativas



Foto 9. De izquierda a derecha, sistema convencional, frontal-2 y frontal-1

En las fotos 10-13 se puede apreciar la diferencia de tonalidad y visión de la luz de carburero frente a la frontal-1. A máxima potencia (fotos 10 y 11) el carburero suministra una mejor visión de la zona periférica pero la frontal-1 le supera limpiamente en la zona central. Además hay que recordar que mientras la frontal-1 puede mantener esta potencia indefinidamente, el carburero solo la mantiene durante unos segundos antes de caer a su intensidad normal que viene a ser la de la foto 12. En este caso la frontal-1 (foto 13) le supera en todos los sentidos.



Fotos 10 y 11. Fotos con el carburero (izquierda) y la frontal-1 (derecha) ambas a máxima potencia. Notar el aumento de visibilidad en profundidad y el cambio de tonalidad en la frontal-1



Fotos 12 y 13. Equivalente a las fotos 10 y 11, pero a media potencia (condiciones usuales en cavidad). Observar el notable aumento de visibilidad del frontal-1 frente al carburero

La verdad es que los resultados de los sistemas en cavidad han sido asombrosos superando las expectativas que se tenían. Quien lo ha probado ya no quiere ni oír hablar del carburero y frontal. Es una verdadera gozada llegar a la cavidad y no tener que llenar de carburo (con el incomodo troceado previo), agua y seguramente desatascar el carburero con la consiguiente perdida de tiempo y desesperación en algunos casos cuando el carburero da problemas. Basta con dar un interruptor y listo!!!. Al salir basta con desconectar y encima se evita el consabido perfumado del coche.

Ya dentro de la cavidad el ahorro de peso y sobre todo la ausencia de apagones y enganchones empiezan a notarse en la primera gatera o paso estrecho. Cuando la situación se pone realmente embarrada aun se aprecian mas las ventajas, ni un solo apagón, no es necesario estar regulando continuamente la luz. En situaciones extremas el carburero se tapona completamente y deja de funcionar y cuando recurre uno a la frontal, esta empieza a fallar por suciedad de los contactos eléctricos o se queda uno sin pila en el momento más inoportuno. Sin mencionar el poder respirar en zonas estrechas sin el enrarecimiento del aire por la combustión y los humos del carburero. Pero lo que deja a uno asombrado la primera vez que usa el sistema es cuando ilumina alguna colada o zona con formaciones blancas. Estas destacan en todo su esplendor y uno se queda atónito ante su blancura (fotos 10-13). Cuando uno sale al exterior, la tenue iluminación del sol que penetra por la boca, parece amarilla.

Como hemos mencionado anteriormente, el frontal-1, posee 6 intensidades reguladas distintas. La primera de ellas (1) no tiene utilidad práctica ya que esta diseñada únicamente para conseguir que el casco este permanentemente iluminado y se pueda localizar en la oscuridad. A pesar de eso uno se ve las manos y a veces incluso los pies. En esta situación las pilas pueden durar más de 3 años. Las otras 5 potencias ya son utilizables. Según las características de las pilas utilizadas y el consumo de cada una de las posiciones se puede establecer la duración de las pilas en, aproximadamente, y empezando de la máxima potencia (6) a la mínima (2): 10h(6); 28h(5); 60h(4); 120h(3) y 600h(2). Puede que parezca poca autonomía con altas potencias, pero es que realmente uno no gasta la 5 y la 6 nada más que para ver grandes salas, objetos muy lejanos (25-50 m) o impresionar al personal. Con la potencia 2 uno ve perfectamente en gateras, pequeñas galerías y cuando esta descansando o comiendo. Puede ver objetos situados a 5 m de distancia. Con la 3 y 4 uno se desenvuelve fácilmente en cualquier tipo de galería y situación.

Desde el punto de vista práctico la duración de las pilas es extraordinaria, en los ocho diseños gemelos que se han construido el primer cambio de pilas se ha realizado entre las 100 y 150 horas de funcionamiento. Esto ha supuesto entre 12 y 18 entradas de 8 h de duración. No es necesario entrar un juego de pilas a la cavidad (salvo que se quiera hacer permanencia de varias semanas), ya que realmente uno no se puede quedar sin pilas, incluso usando las máximas potencias. Esto se debe a que el sistema electrónico mantiene constante la intensidad de la luz, pero cuando las pilas empiezan a agotarse la intensidad luminosa baja progresivamente alargando enormemente la duración de las pilas. A pesar de todo (aunque difícil) puede fallar todo el sistema electrónico; para eso esta el sistema de emergencia que sin ningún tipo de electrónica puede suministrar luz durante más de 30 h. De hecho en más de 4000 horas de funcionamiento de los montajes, no ha sido indispensable el sistema de emergencia. Incluso se han realizado pruebas entrando en cavidades con las pilas ya casi agotadas, en las cuales las potencias superiores ya no eran utilizables, y se ha podido trabajar durante varias horas y salir de la cavidad.

El frontal-2, posee menos autonomía, ya que en uso regular las 4 pilas duran entre 30 y 40 horas, realizándose su cambio cada 3 a 5 entradas en cavidad.

Actualmente ya se ha aumentado la eficiencia luminosa de los LED, lo que permite utilizar menos. Incluso ya están saliendo al mercado diodos con potencias del orden de 10 a 15 veces más y algunos con 50 veces de potencia a punto de salir. También es más fácil de conseguir los LEDs, ya que ha aumentado el número de casas que los fabrican. Pero hay que asegurarse de que produzcan la potencia luminosa adecuada y sobre todo de que el haz luminoso no muera de manera abrupta y se extienda de manera progresiva hasta el ángulo de visión del ojo. Sin duda alguna los días de nuestro viejo y conocido carburero se han acabado y entramos en una nueva era de la iluminación en cavidades.

-Bibliografía

-Información sobre pilas se puede encontrar en <http://www.duracell.com>

-Para ampliar información sobre medidas de luz (lumen, candela...) <http://www.caves.org.uk/led/> y referencias aquí indicadas

-Una frontal especial para espeleología juntamente con numerosa información sobre características de los LEDs y diseño de una luz adecuada al ojo humano se puede encontrar en <http://www.hdssystems.com>

-Para ampliar información de cualquier aspecto sobre el presente artículo dirigirse al G.E.C. o a la dirección de correo electrónico ramon.j.zaragoza@uv.es