

## Tema 5. Sistemas de Iniciación

---

*Índice del Tema:*

- 1. Introducción**
- 2. Mecha y detonador ordinario**
- 3. Cordón detonante y relé de retardo**
- 4. Multiplicadores**
- 5. Sistema eléctrico**
- 6. Sistema no eléctrico**
- 7. Sistema electrónico**

### 1. Introducción

---

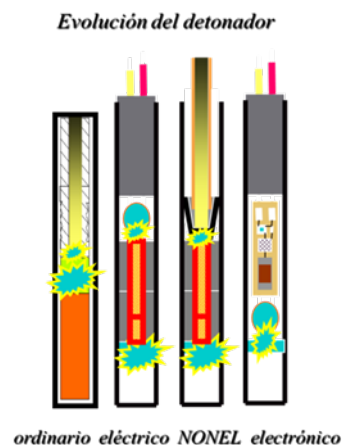
Ya desde la introducción de la pólvora negra hubo una gran preocupación en desarrollar un método fiable y seguro para su iniciación - que culminó con la mecha de seguridad de Bickford.

Desde entonces el desarrollo de estos sistemas ha sido concomitante al de los explosivos. Con la aparición, a mediados del s.XX, de los explosivos de baja sensibilidad, explosivos que requieren para su iniciación la generación y activación de un número suficiente de puntos calientes, fue necesario introducir sistemas de iniciación más potentes y fiables a la par que más seguros para el artillero.

Estos sistemas además tienen la misión de secuenciar la salida de la voladura, tarea obligada si se quiere cumplir con las exigencias de:

- Máxima productividad: mayor tonelaje de roca volada por disparo y mayor control de la fragmentación
- Máxima seguridad en el entorno del perímetro volado: mayor control de proyecciones, onda aérea y vibraciones

En este tema se expondrán los sistemas de iniciación habitualmente utilizados en la voladura de rocas.



## 2. Mecha y detonador ordinario

La mecha lenta, creada por Bickford en 1831 para iniciar la pólvora negra, está constituida por un núcleo de pólvora negra rodeado por dos capas de papel sobre las que se arrollan fuertemente dos hilados de viscosilla. Luego se le da un baño de alquitrán y se le pueden arrollar otras capas de hilados (mechas dobles, triples) y de nuevo una capa de brea o de PVC si se quiere mejorar su resistencia al agua, mecánica y a la abrasión.

Al prender la mecha se desprenden gases originando un aumento de presión en el núcleo que disminuye conforme se expansionan hacia el trenzado y las capas impermeabilizantes, produciendo el chisporroteo lateral. Cuando la combustión de la mecha (120 s/m) llega al final de la misma se produce un dardo de fuego que iniciará la carga primaria del detonador ordinario.

Dos fenómenos muy peligrosos pueden suceder durante la combustión:

- Corrimiento: si el núcleo de la mecha no está bien compactado los gases del frente penetran entre los intersticios de la pólvora sin quemar aumentando la presión y la temperatura lo que aviva –acelera- la combustión
- Mechazo: en caso de falta de continuidad del núcleo la combustión puede propagarse lentamente a través de los hilos de viscosilla y desde estos, de nuevo, al núcleo de pólvora. Por ello siempre hay que contar los tiros y, en caso de la menor duda, esperar al menos media hora antes de retornar al frente

El detonador ordinario -inventado por Nobel en 1864- está constituido por un casquillo de aluminio, abierto por un extremo, en el cual lleva alojado un tapón con un opérculo a continuación el explosivo iniciador y finalmente la carga base –unos 450 mg de PETN el nº 8.



Casquillo

Una vez cortada la mecha transversalmente se comprueba el perfecto estado de la pólvora y se introduce con suavidad en el detonador. A continuación, con unas tenacillas, se engarza cuidadosamente el detonador a la mecha por el extremo en el que se introdujo la misma. Si la mecha inicia cordón se adosa apuntando el culote en el sentido de propagación de la detonación; si inicia un cartucho éste se perfora con un punzón de madera o cobre y se aloja el detonador en el interior.

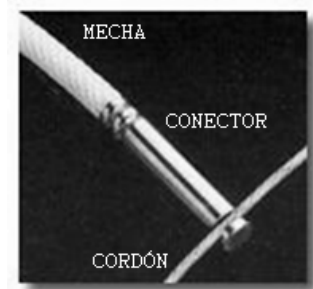




**Mecha negra más detonador ordinario**

La mecha se comercializa en rollos – de 100 m- y el detonador en cajas – de 100 unidades. Su uso se limita a la iniciación de la pólvora o del detonador ordinario.

Cuando se inicia con mecha lenta, el RGNBSM prescribe un máximo de seis barrenos por pega salvo que para su iniciación se utilice cordón de ignición o mecha rápida –un cordón de hilos trenzados e impregnados de una composición pirotécnica recubierto por una capa plástica que arde con llama intensa por el exterior- y conectadores de mecha –conectores compuestos por un casquillo metálico que contiene una pasta incendiaria en el extremo de unión con el cordón-.



La iniciación se realiza siempre en cabeza con una longitud mínima de mecha de 1.5 m desde la boca del barreno, y en el caso de utilizar mecha testigo ésta será la primera que se inicie siendo su longitud igual a 0.75 m.

### 3. Cordón detonante y relé de retardo

El cordón es de constitución parecida a la de la mecha, pero en este caso el núcleo está compuesto por pentrita y el recubrimiento siempre es plástico. Características esenciales de un buen cordón son su resistencia al agua, a la tracción, a la abrasión y su flexibilidad para facilitar las conexiones. Su velocidad de detonación es muy elevada – por encima de 7000 m/s- prácticamente independiente del diámetro de los diferentes gramajes en que se comercializa.

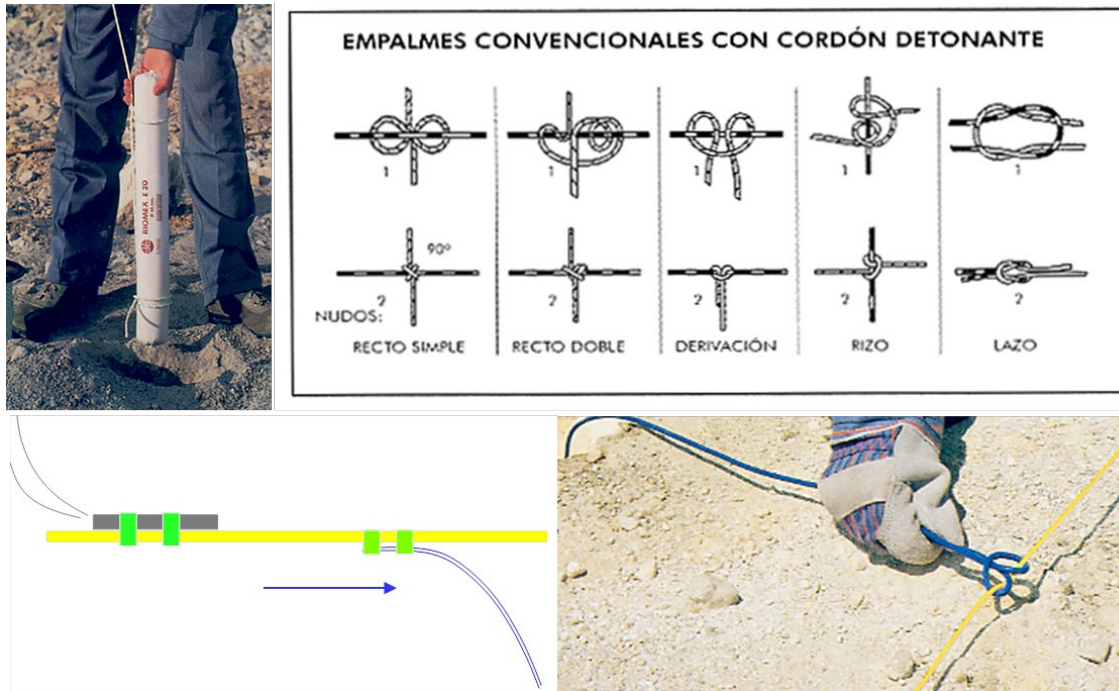


Se inicia mediante detonador u otro cordón e inicia bien a un explosivo bien a un multiplicador bien a otro cordón. Cuando se utilizar el cordón para llevar la línea de fuego a los diferentes barrenos hay que realizar conexiones entre los cordones. Las conexiones con nudo se hacen a 90°. Los nudos rectos se utilizan para llevar la línea de fuego a la hilera siguiente y el lazo para



empalmar cordones. La derivación se utiliza para llevar el fuego desde la línea maestra al barreno.

Siempre hay que comprobar que en el punto de iniciación el cordón esté seco.



#### Conexiones con cordón detonante

El cordón tiene diversas aplicaciones en función del gramaje siendo los de uso más habitual:

- 6 g/m: línea maestra para sistema nonel
- 12 g/m: corte en roca ornamental e iniciación lateral de explosivos y multiplicadores; línea maestra
- 20 g/m: iniciación lateral de explosivos, prospecciones sísmicas
- (40 - 80 - 100) g/m: voladuras de contorno de interior y a cielo abierto



También existe el **cordón reforzado** -de mayor resistencia a la tracción y abrasión- y el **cordón anti-grisú** – recubierto con inhibidor debe alojarse completamente en el interior del barreno-.

El cordón se comercializa en carretes o rollos de longitud entre 50 m y 400 m codificados por colores. Un inconveniente del uso del cordón es la fuerte onda aérea que produce pudiéndose reducir en gran medida si se cubre dicho cordón con una capa de tierra.



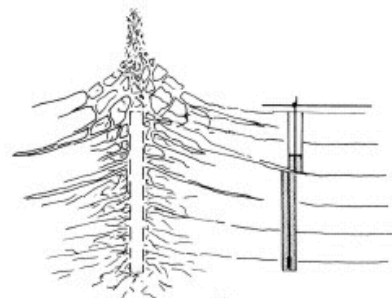
El **relé de retardo** permite temporizar la salida de los barrenos cuando se inician con cordón. Consiste en un tubo metálico o de plástico en cuyos extremos se insertan los cordones fijándolos con una cuña. En el interior del tubo hay una pasta retardadora (15 ms - 25 ms) con una pequeña carga iniciadora a cada lado de modo que, cuando le llega la señal por un extremo, se inicia la carga iniciadora que a su vez inicia el retardo y éste a la carga del otro extremo, transmitiendo finalmente la señal al otro cordón.



**Relé de micro-retardo y rollos de cordón –el rayado es reforzado**



Cuando se trabaja con cordón detonante y temporización con relés de retardo en superficie existe riesgo de rotura de la línea de tiro – vea la figura de la derecha. Para reducir dicho riesgo se recomienda que el retardo máximo entre barrenos contiguos sea de 1 milisegundo por pie de distancia entre los barrenos.

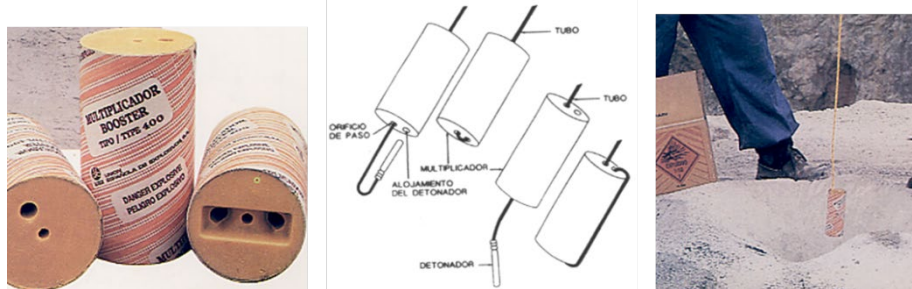


## 4. Multiplicadores

Son composiciones: PETN-TNT (Pentolita), RDX-TNT (Hexolita) de alta densidad (1.6 g/cc - 1.7 g/cc) y alta velocidad de detonación (7000 m/s - 8000 m/s) por lo que su poder de iniciación es muy elevado. Aun estando compuestos por SIE, son bastante insensibles a estímulos subsónicos y tienen una gran resistencia al agua.

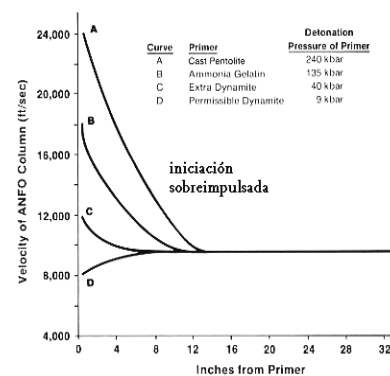
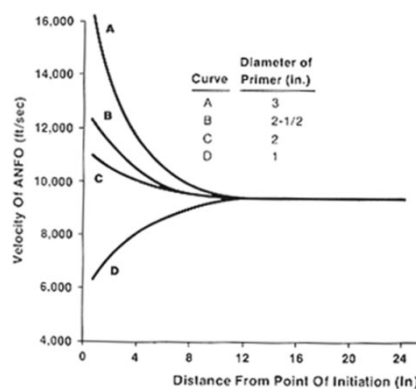
Presentan forma cilíndrica con varios orificios longitudinales para facilitar su conexión con el detonador –el nº 8- o con el cordón detonante. El fabricante debe especificar los gramajes del cordón recomendados para su iniciación - entre 6 g/m y 12 g/m habitualmente.

Se comercializan en diámetros de 36 mm (150 g) a 74 mm (800 g) y se utilizan para iniciar los agentes de voladura vertibles o bombeables: anfos, emulsiones, anfos pesados e hidrogeles.



### Multiplicadores y su cebado

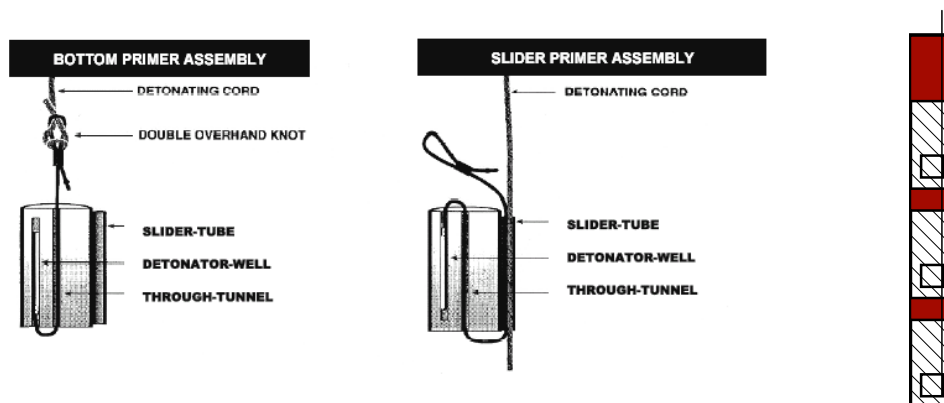
Para garantizar el desarrollo del máximo poder rompedor de los explosivos de baja sensibilidad el iniciador debe proporcionar una presión y velocidad de detonación superior a la del explosivo a iniciar. Además, el diámetro del multiplicador debe ser adecuado al del barreno, con una esbeltez superior a 2 para que éste alcance la velocidad de régimen.



### Velocidad de detonación del ANFO vs diámetro del "primer" (izda) y vs tipo de "primer" (dcha)

Al ser sensibles al detonador de potencia óctuple, puede realizarse secuenciación en el propio barreno – para control de vibraciones y de la fragmentación– con cualquier tipo de detonador temporizado.

También existe la posibilidad de secuenciación en barreno con cordón detonante de 6 g/m. En este caso el multiplicador lleva una camisa que engarza un detonador tipo nonel. El cordón inicia el tubo nonel que a su vez iniciará el detonador nonel y éste al multiplicador.

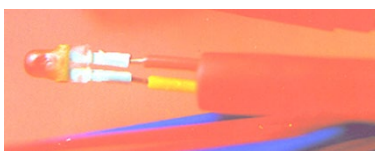


Secuenciación en barreno con cordón, nonel y multiplicador

## 5. Sistema eléctrico

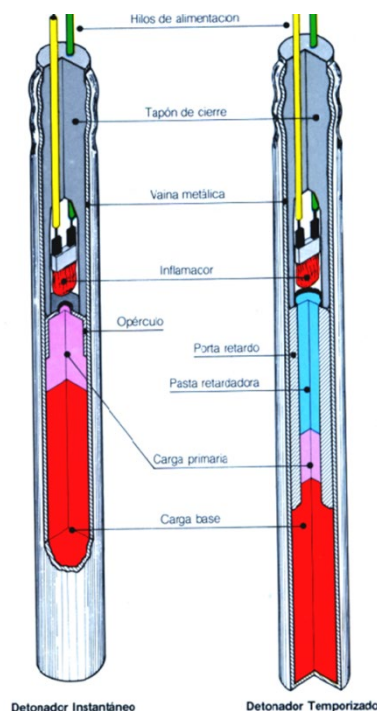
Este sistema aprovecha la energía calorífica producida por el paso de una corriente eléctrica a través de una resistencia eléctrica para inflamar una composición pirotécnica muy sensible al calor que a su vez iniciará bien a la carga primaria bien a la pasta retardadora del detonador.

El detonador eléctrico está constituido por una cápsula externa metálica de Cu o Al, a cuyo interior llegan dos hilos



de alimentación- de cobre o de hierro- conectados al inflamador (figura de la izda.).

El inflamador consta de dos electrodos, separados por una pila de plástico, que engarzan un filamento de Cr-Ni calibrado –puente de incandescencia- recubierto de una composición pirotécnica. Tanto el recubrimiento de los hilos de conexión como el tapón de cierre (ver figura) están fabricados de material plástico antiestático.



Si es temporizado, la cerilla provoca el encendido de la pasta retardadora que a su vez iniciará a la carga primaria y ésta a la carga base. Si no lo es, actuará directamente sobre la carga iniciadora.

La sensibilidad eléctrica del detonador dependerá del inflamador - resistencia del puente y composición de la cerilla-; el retardo de la pasta pirotécnica - longitud y tipo de pasta -; y la potencia del explosivo base -explosivo y masa-.

## Mecanismo de encendido

Cuando una corriente eléctrica de intensidad  $i$  atraviesa el puente eléctrico de resistencia  $R$  durante un cierto tiempo éste se calienta debido a la energía calorífica producida:

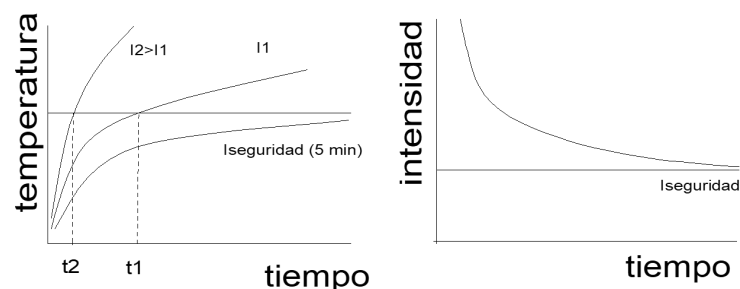
$$E = \int Ri^2 dt$$

Al elevarse la temperatura del filamento la píldora alcanzará su temperatura de inflamación  $\theta_i$ . La inflamación no es instantánea, sino que desde que se alcanza  $\theta_i$  hasta que se inflama transcurre un pequeño intervalo de tiempo -del orden de unos pocos milisegundos- denominado como tiempo de persistencia ( $t_p$ ).

Lógicamente, el tiempo que se tarda en alcanzar la temperatura de inflamación va a depender de la corriente que atraviesa el circuito, de la resistencia y de las pérdidas caloríficas pudiéndose expresar:

$$\int Ri^2 dt = C(\theta - \theta_{amb}) + \theta \lambda t$$

El modelo indica que parte de la energía calorífica se emplea en calentar el sistema puente-pasta y parte se pierde por conducción ( $C$  representa la capacidad calorífica media y  $\lambda$  la conductividad térmica, del sistema). Si la entrega de energía es rápida la  $\theta_i$  se alcanzará en un tiempo muy pequeño y las pérdidas, proporcionales a  $t$ , serán pequeñas. En caso contrario las pérdidas tendrán un peso importante y el tiempo de excitación, o tiempo en alcanzarse la  $\theta_i$ , será mayor o incluso puede no llegar a alcanzarse –; de hecho, se denomina corriente de seguridad como la intensidad máxima de corriente continua que circulando durante cinco minutos por el puente no provoca la inflamación de la píldora-.



**Influencia de la intensidad ( $I$ ) que circula por la resistencia en el tiempo que transcurre hasta que se alcanza la temperatura de inflamación de la cerilla**

## Parámetros que definen las características eléctricas de un detonador

Estos son:

- Resistencia del puente
- Resistencia total: la del puente más la de los hilos



- Corriente de seguridad: ya definida en el apartado anterior
- Corriente de encendido: corriente continua que pasando por cinco detonadores conectados en serie los inicia
- Impulso de encendido o sensibilidad eléctrica (J): energía por unidad de resistencia requerida para provocar la inflamación de la pildora en condiciones de mínima energía -máxima potencia
- Corriente recomendada de encendido en serie: es la intensidad mínima recomendada por el fabricante para el encendido en serie

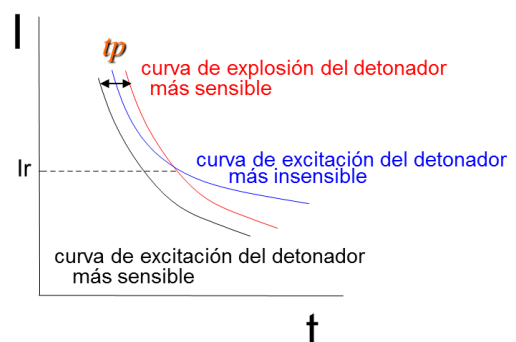
Los detonadores en función de sus características eléctricas se clasifican en sensibles, insensibles y altamente insensibles de acuerdo con la tabla siguiente.

Clasificación de los detonadores por sus características eléctricas	Sensibles (S)	Insensibles (I)	Altamente insensibles (AI)
Resistencia del puente ( $\Omega$ )	1.2-1.6	0.4-0.6	0.03-0.05
Impulso de encendido(mJ/ $\Omega$ )	0.8-3	8-16	1100-2500
Corriente de seguridad/encendido (A)	0.18/0.8	0.45/1.5	4/25
Corriente recomendada (A)	1.2	2.5	25

De la tabla se deduce que cuanto más insensible es el detonador más energía se requiere para su iniciación –o más seguro frente a la iniciación accidental por fuentes eléctricas extrañas-. Por otra parte, se observa que siempre va a existir -incluso entre detonadores del mismo tipo de sensibilidad eléctrica y alimentados con la misma fuente- una dispersión en sus tiempos de excitación -lo que puede ocasionar fallos en la iniciación de la pega si no se inician correctamente-.

Esto es debido a que, dentro de cada grupo de sensibilidad, los detonadores no tienen exactamente las mismas propiedades del puente –e incluso la propia pasta pirotécnica presentará dispersión en la temperatura de inflamación-. De esta circunstancia surge la corriente recomendada de encendido en serie como se ilustra a continuación.

En la figura se representa dos curvas hipotéticas que representan el tiempo de excitación de dos detonadores de la misma sensibilidad en función de la intensidad aplicada. También se representa el tiempo de explosión del detonador más sensible que, supuesto que sea instantáneo, será igual al tiempo de excitación más el de persistencia.



Si el circuito está conectado en serie, al explotar el detonador número 0, el circuito se abrirá y la corriente dejará de circular por él. Si la píldora de alguno del resto de detonadores no alcanzó la temperatura de inflamación entonces ocurrirá el fallo. De la figura se deduce que esto ocurrirá cuando la intensidad de encendido está por debajo de la  $I_r$  o intensidad recomendada de encendido en serie.

Sea  $t_{\text{exin}}$  el tiempo de excitación del detonador más sensible de la serie y  $J_{\text{min}}$  su impulso de encendido; y sean  $t_{\text{exin}}$  y  $J_{\text{max}}$  los valores respectivos para el más insensible. La condición enunciada sería:  $t_{\text{exin}} - t_{\text{exs}} < t_p$ .

Como  $J = I^2 t$ , para eliminar el riesgo se tiene que cumplir:  $(J_{\text{max}} - J_{\text{min}})/I^2 < t_p$

Por ejemplo, se tienen dos detonadores instantáneos S, y supongan que sus impulsos de encendido fuesen:  $J_1 = 1 \text{ mJ}/\Omega$  y  $J_2 = 3 \text{ mJ}/\Omega$ . Si se hace circular una corriente (constante para facilitar el cálculo) de 0.8 A, en vez de la recomendada (1.2 A) se tiene:

- Que el primero se excitará a los (despreciando las pérdidas):  $t_{\text{exs}} = 1/0.8^2 = 1.56 \text{ ms}$
- Y el segundo a los:  $t_{\text{exin}} = 3/0.8^2 = 4.69 \text{ ms}$

Si el tiempo de persistencia ( $t_p$ ) es inferior a, aproximadamente, 3 ms el circuito se abrirá sin que el segundo detonador alcance la temperatura de inflamación.

Una norma elemental del sistema eléctrico de iniciación es que: **nunca jamás se deben utilizar detonadores de diferente sensibilidad en la misma pega, ya que la diferencia entre sus impulsos eléctricos -o curvas de excitación- va a ser mucho más acentuada produciéndose con seguridad el fallo en la iniciación.**

## Presentación y fuente de encendido

Los detonadores se suministran cortocircuitados, en madejas codificadas con colores, de longitudes comprendidas entre los 2 m y



18 m, y con cápsulas bien de cobre –para atmosferas explosivas- bien de aluminio.

Los colores de las madejas indican la sensibilidad del detonador y la serie que puede ser: instantánea – sin retardo -, de micro-retardo y de retardo. La serie micro suele constar de 18 a 30 números con un

intervalo de salida entre dos números consecutivos constante, bien de 25 ms bien de 30 ms, de manera que el nº 1 tendrá un tiempo de

Características eléctricas del hilo (Valores nominales)	
Diámetro	Resistencia del hilo (ohmios/metro)
0,60 mm.	0,065

Tiempos de retardo (Valores nominales)			
Serie de microretardo		Serie de retardo	
Nº	Tiempo (ms)	Nº	Tiempo (s)
0	–	0	–
1	25	1	0,5
2	50	2	1
3	75	3	1,5
4	100	4	2
5	125	5	2,5
6	150	6	3
7	175	7	3,5
8	200	8	4
9	225	9	4,5
10	250	10	5
11	275	11	5,5
12	300	12	6
13	325		
14	350		
15	375		
16	400		
18	450		
20	500		
22	550		
24	600		
26	650		
28	700		
30	750		

salida nominal de - por ejemplo- 25 ms, el nº 2 de  $2 \times 25 = 50$  ms, el nº 3 de  $3 \times 25 = 75$  ms... La serie de retardo suele tener 12 números siendo el intervalo entre cada dos números de 500 ms.

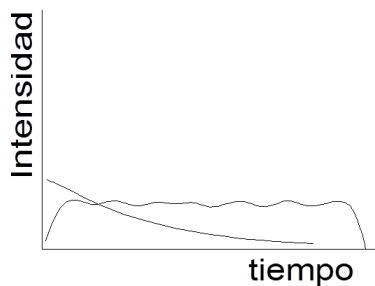
La serie micro se utiliza para iniciar todo tipo de voladuras mientras que la de retardo fundamentalmente para iniciar voladuras de avance en galerías o túneles -por ejemplo, en los barrenos de destroza y en las zapateras.

Un aspecto importante, frecuentemente olvidado, es la dispersión de los tiempos nominales de salida del detonador -por ejemplo, a la intensidad recomendada de disparo-. Una alta dispersión puede alterar la secuencia de la voladura. Este parámetro es un indicador de la calidad constructiva del detonador.

En cuanto a la fuente de energía para iniciar el sistema eléctrico, lo apropiado es utilizar explosores de condensador. El condensador se carga bien mediante manivela bien mediante batería siendo la entrega de la energía al circuito muy rápida. El explosor dispone de un circuito interno de descarga para el caso de que se interrumpa la carga o si se desistiera de realizar el disparo por algún motivo.

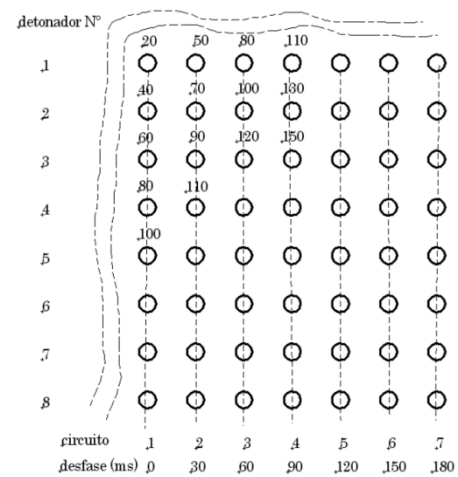
Estos equipos tienen una gran capacidad de disparo y una buena curva de entrega de energía dado que el suministro de la misma es máximo al principio de la descarga. Sistemas como el explosor de dinamo tienen poca capacidad de disparo y peor entrega de corriente.

No se debe iniciar con corriente alterna –ni se conoce la fase cuando se entrega la corriente a cada detonador y la corriente continúa circulando hasta que sale el primer detonador con el consiguiente exceso de entrega de energía y posible fallo de los detonadores. En países donde está permitido su uso se suele cebar al menos con un número cero para evitar dicho exceso de entrega de energía.



**Curvas de entrega de explosor de condensador y de dinamo; explosor de manivela y de batería**

Si el explosor dispone de varios condensadores que descargan sobre circuitos independientes a intervalos de tiempos regulares se denomina **explosor secuencial**. De este modo se dispone, además de los retardos propios de la serie, del retardo que añade el explosor a cada circuito de salida. Permite una gran flexibilidad a la hora de temporizar y secuenciar la voladura con un mayor control sobre la fragmentación y las vibraciones. Se emplea en grandes voladuras.



Un inconveniente del sistema eléctrico es el riesgo de iniciación accidental por corrientes eléctricas extrañas.

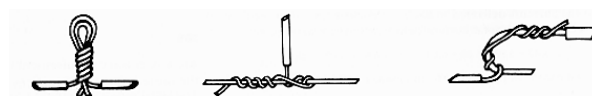
Aunque los detonadores eléctricos llevan algún sistema de protección frente a descargas electrostáticas – lo que no quita que el personal deba descargarse previamente a la manipulación de los mismos, además de llevar ropa y calzado adecuado- el riesgo por corrientes errantes, cercanías de líneas de alta tensión, tormenta eléctrica... existe.

También la falta de flexibilidad en la temporización -si no se dispone de un explosor secuencial- es otro aspecto a tener en cuenta a la hora de considerar su uso en grandes voladuras.

### Circuitos de voladura

Dentro del circuito de voladura cabe distinguir entre la línea de tiro, no afectada por la voladura, y la línea volante, afectada por la voladura.

No es recomendable utilizar cables bifilares en la línea de disparo ya que pueden existir fallos de aislamiento no detectables con el óhmetro. Los empalmes han de realizarse cuidadosamente, comprobando que no entren en contacto con el terreno (aislándolos si es necesario), para reducir el riesgo de derivaciones.



**Empalmes usuales:** de dcha. a izda.: detonador/detonador, detonador/L. volante y detonador /L. de tiro

En el cálculo de la resistencia del circuito habrá que tener en cuenta:

- La resistencia de cada detonador:

$$R_d = R_{\text{puente}} + 2 L R_{\text{hilo}}$$

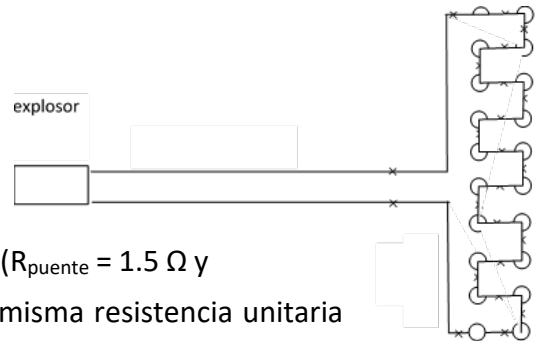
L es la longitud (m) de cada hilo del detonador y  $R_{\text{hilo}}$  es la resistencia por metro de los mismos.

- La resistencia por metro de la línea de tiro y la de la línea volante, y sus longitudes respectivas.

Los circuitos pueden conectarse en serie, paralelo o serie-paralelo aunque, en principio, el RGNBSM obliga a la conexión en serie. Otros tipos de conexiones requieren la autorización de la autoridad minera.

### Conexión en serie

La resistencia total del circuito es igual a la suma de las resistencias (vea el esquema de conexión en serie).



EJEMPLO: 20 detonadores S con madejas de 2 m ( $R_{\text{puente}} = 1.5 \Omega$  y  $R_{\text{hilo}} = 0.065 \Omega/\text{m}$ ) con línea de tiro de 100 m y misma resistencia unitaria que la de los hilos de los detonadores.

La resistencia de cada detonador es:  $R_d = 1.5 + 2 \times 2 \times 0.065 = 1.76 \Omega$

La resistencia de la línea es:  $R_l = 100 \times 0.065 = 6.5 \Omega$

La resistencia total será:  $R = 20 \times 1.76 + 6.5 = 41.7 \Omega$

Si se supone que se dispara con corriente constante – circunstancia que sabe que no es así, recuerde la curva de entrega de corriente del explosor de condensador- el potencial y la potencia que se requieren son:

$$U_r = I_{\text{recomendada}} \times R = 1.2 \times 41.7 = 50 \text{ V}$$

$$W_r = U \times I = 50 \times 1.2 = 60 \text{ W}$$

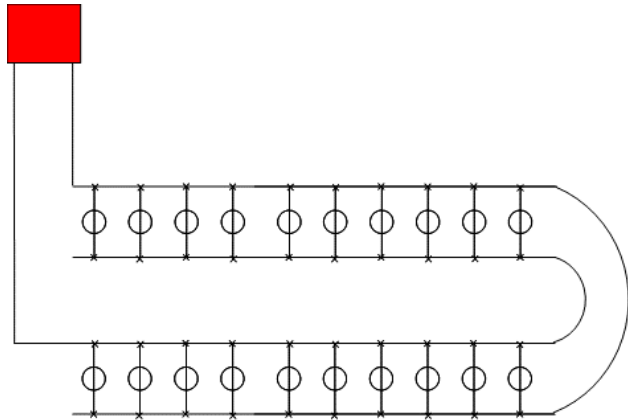
El circuito en serie es fácil de conectar y de comprobar, pero cuando existen peligros de derivaciones es más conveniente la conexión en paralelo o alguna otra variante. En efecto, la presencia de agua en los barrenos o en la superficie, la existencia de rocas conductoras o elementos metálicos pueden ocasionar, en el caso de un aislamiento defectuoso de las conexiones o cuando la línea de tiro está en malas condiciones, derivaciones con el consiguiente riesgo de fallo en la salida de la voladura.

Si se produce la derivación la corriente se bifurcará por la misma repartiéndose en el paralelo en razón inversa a las resistencias del mismo, pudiendo caer la intensidad que circula por los detonadores que quedaron en paralelo, por debajo de la recomendada.



### Conexión en paralelo

Ahora la resistencia total es igual a la resistencia de la línea más la resistencia de los detonadores conectados en paralelo. Al no haber problemas de interrupción de la línea la corriente de disparo será la de encendido.



Siguiendo con el ejemplo anterior, la resistencia total es:

$$R = 6.5 + 1.76/20 = 6.588 \, \Omega$$

La resistencia del paralelo queda enmascarada por la de la línea por lo que no se puede comprobar la resistencia total del circuito.

Se dispara ahora con la corriente necesaria de encendido para cada uno de los 20 detonadores S (0.8A) por lo que la intensidad requerida es:  $20 \times 0.8 = 16 \, \text{A}$ .

El potencial y la potencia mínima necesario son:

$$U_r = 16 \times 6.588 = 106 \, \text{V}$$

$$W_r = 106 \times 16 = 1696 \, \text{W}$$

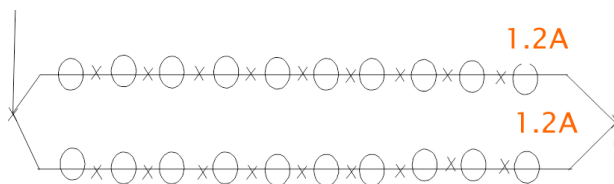
Observe que requiere un potencial y una potencia mucho mayor. Por el contrario, al ser la resistencia equivalente del paralelo muy pequeña la corriente tenderá a circular por él en el caso de riesgo de derivaciones –por ejemplo, en voladuras para la realización de pozos.

### Conexión mixta en serie-paralelo

En este caso el RGNBSM dicta que todas las series han de estar equilibradas y la comprobación de la resistencia ha de realizarse serie a serie.

Es en un caso intermedio de los anteriores, se evita las grandes resistencias de las conexiones en serie y las grandes intensidades de las conexiones en paralelo. Por ejemplo, con dos series de 10 detonadores S, la resistencia de cada serie será igual a:

$R_{\text{serie}} = 10 \times 1.76 = 17.6 \, \Omega$ , siendo la resistencia total:  $R = 6.5 + 2/17.6 = 15.3 \, \Omega$  y la intensidad requerida igual a  $I = 2 \times 1.2 = 2.4 \, \text{A}$ .



El potencial y potencia necesarios son:

$$U_r = 2.4 \times 15.3 = 36.7 \, \text{V}$$

$$W_r = 36.7 \times 2.4 = 88 \, \text{W}$$

La potencia requerida crece fuertemente con el número de series, por ejemplo, para cuatro series x 5 detonadores resulta ser  $W_r = 200 \text{ W}$ .

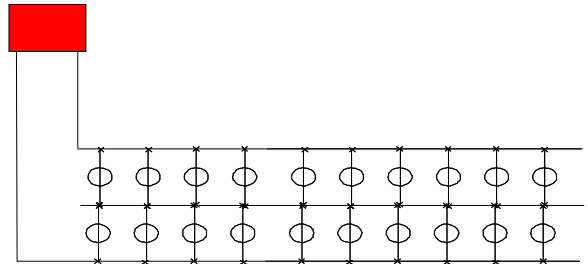
#### Conexiones serie-paralelo con alambre equipotencial

Es otra variante para reducir el riesgo de derivaciones con menores requerimientos que el circuito paralelo. En el ejemplo que se expone se tiene dos circuitos en paralelo de 10 detonadores cada uno por lo que la resistencia total será:

$$R = 6.5 + 1.76/10 + 1.76/10 = 6.852 \Omega.$$

De nuevo se puede disparar con la corriente de encendido de 0.8 A pues no existe riesgo de apertura del circuito, con lo que la intensidad requerida será:

$$I = 10 \times 0.8 = 8 \text{ A}.$$



El potencial y potencia necesarios son:

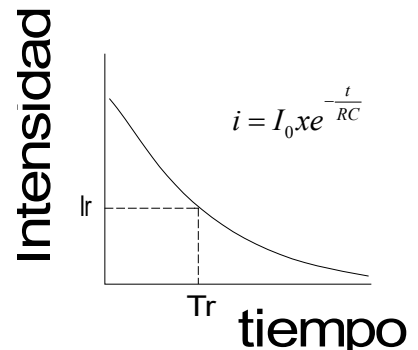
$$U_r = 8 \times 6.852 = 55 \text{ V} \quad W_r = 55 \times 8 = 440 \text{ W}$$

#### **Cálculo de la capacidad de disparo teórica del explosor de condensador**

En los ejemplos anteriores se supuso que la intensidad suministrada al circuito era constante, mas en realidad la corriente disminuye con el tiempo de acuerdo con la ley de descarga del condensador tal como se muestra en la figura.

Si C es la capacidad del condensador y  $V_0$  la tensión entre placas la energía almacenada por el condensador viene definida por:

$$E = \frac{C V_0^2}{2}$$



Exigiendo que el impulso eléctrico entregado, antes de que la intensidad caiga por debajo de la recomendada, sea mayor que la sensibilidad eléctrica del detonador (J):

$$\int_0^{T_r} i^2 dt = \int_0^{T_r} I_0^2 x e^{-\frac{2t}{RC}} dt \geq J, \text{ con } I_0 = \frac{V_0}{R} \text{ y } \frac{I_r}{I_0} = e^{-\frac{T_r}{RC}}$$

Siendo R la resistencia total del circuito en serie,  $I_r$  la resistencia recomendada de disparo y  $T_r$  el tiempo que tarda la intensidad en caer a la recomendada. Integrando y reordenando términos:

$$\left( \frac{V_0}{R} \right)^2 \times \left( \frac{CR}{2} \right) \times \left( 1 - e^{-\frac{2T_r}{RC}} \right) \geq J$$

$$CI_r^2 R^2 + 2JR - V_o^2 C \leq 0$$

Determinado R, y teniendo en cuenta la resistencia de la línea de tiro, se puede calcular el número máximo de detonadores ( $J$ ,  $I_r$ ) que se pueden conectar en serie dado un explosor de características ( $C$ ,  $V_o$ ).

También se llega a la ecuación anterior exigiendo que la energía entregada por el condensador, antes de que la intensidad caiga por debajo de la recomendada, sea mayor que la sensibilidad eléctrica del detonador por la resistencia total del circuito:

$$\frac{1}{2} C \times [V_o^2 - V_r^2] \geq J \times R$$

Para el caso de una conexión de  $p$  series, equilibradas, en paralelo, la intensidad que circulará por cada serie será:  $I / p$ , y el impulso entregado a cada detonador:  $(I^2 t) / p^2$ , por lo que habrá que sustituir en la ecuación anterior  $J$  por  $(p^2 \times J)$  e  $I_r$  por  $(p \times I_r)$ .

Los resultados obtenidos según los cálculos descritos corresponden a los máximos teóricos, debiendo siempre respetar los valores indicados por el fabricante. Estos deben tener en cuenta la energía que realmente es capaz de entregar el explosor, así como unos coeficientes de seguridad -por la posibilidad de incremento de la resistencia real del circuito debido a las conexiones de los hilos-. Asimismo, el fabricante puede ofrecer indicaciones sobre el número máximo de detonadores -o resistencia máxima- por serie.

En algunos países se utiliza como criterio para comprobar si el explosor es válido, que el impulso que entregue a los 5 ms  $[E_{0,005} / R]$  sea igual o mayor a la sensibilidad de los detonadores definida ésta como:  $0.005 (I_{Em})^2$ , en donde  $I_{Em}$  es la Intensidad mínima de disparo en continua dada por el fabricante. La energía entregada a los 5 ms se obtiene a partir de la curva de entrega de energía del condensador:  $E_{0,005} = E \times (1 - \exp(-0,01/(R \times C)))$ .

Calculado previamente R con los datos del circuito previsto, se comprueba si el explosor examinado cumple o no la condición enunciada.

### Comprobación de los circuitos de voladura

Antes de proceder al disparo de la voladura, y después de la inspección visual – conexiones y empalmes correctos y aislados de tierra –, se ha de proceder a la comprobación del circuito. Hasta ese momento la línea ha de estar cortocircuitada.

La comprobación se realiza siempre con óhmetro homologado por la Dirección General de Minas (corriente de medida inferior a 25 mA y corriente de cortocircuito inferior a 50 mA) y desde un lugar seguro, en general, desde donde se efectuará el disparo.



### Comprobación de la línea de tiro

- La resistencia de cortocircuito igual a la de la línea (continuidad)
- La resistencia de la línea abierta ha de ser infinito (aislamiento)
- La resistencia de cada conductor con tierra ha de ser infinito (aislamiento)

### Comprobación del circuito serie

- Aislamiento
- La resistencia total medida debe ser igual a la teórica
  - Si es mayor puede ser debido a empalmes defectuosos, a que el circuito se haya quedado abierto (R infinito) o algún detonador que esté deteriorado
  - Si es menor: problemas de derivaciones o detonadores sin conectar

### Comprobación del circuito paralelo

- Aislamiento
- Al ser la resistencia del paralelo muy pequeña sólo se puede comprobar la continuidad

### Comprobación del circuito serie-paralelo

- Aislamiento
- Resistencia de cada serie

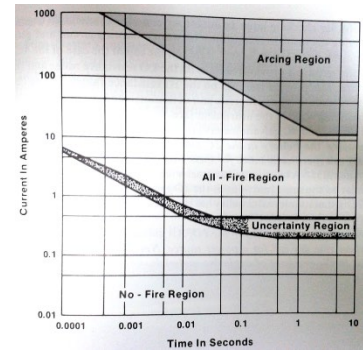
Si al comprobar el circuito hay alguna anomalía los pasos a seguir son los siguientes:

- Se cortocircuita la línea y se inspecciona visualmente
- Se vuelve a medir la resistencia, siempre desde lugar seguro
- Si persiste la anomalía se comprueba de nuevo la línea de tiro y, si está bien, se divide el circuito por la mitad determinando en que parte del circuito está el defecto
- Se prosigue subdividiendo el circuito hasta encontrar el origen de la anomalía

Las causas más frecuentes de los fallos en la salida son:

- Conexiones o empalmes defectuosos:
  - Detonadores mal conectados
  - Resistencias elevadas por empalmes defectuosos

- Derivaciones
- Utilización de explosores no adecuados:
  - Falta de capacidad de disparo
  - Un gran exceso de energía puede causar la explosión violenta de la cabeza de la cerilla dando funcionamiento defectuoso (arcing region)



En cuanto sobre los riesgos de ignición prematura las premisas básicas son que el artillero ha de tener siempre la manivela o llave del explosor y que las comprobaciones siempre se realizan desde lugar seguro. También hay que analizar la posibilidad de la existencia de fuentes de corrientes eléctricas extrañas que se detallan a continuación.

### Corrientes errantes

Consecuencia de falta de aislamiento de cualquier sistema eléctrico - líneas de transporte de energía eléctrica, de ferrocarril, motores...- originando un gradiente de potencial eléctrico en el terreno que puede ser capaz de iniciar al detonador si los extremos de los hilos tocan puntos de diferente potencial. El riesgo se incrementa con la presencia de materiales conductores: raíles, tuberías, mineralizaciones conductoras (pares galvánicos) ...

La mejor solución es utilizar sistema de iniciación no eléctrico. Si éste no es el caso:

- Desconectar los sistemas eléctricos antes de comenzar la carga
- Elegir detonadores de alta insensibilidad
- Mantener, hasta la conexión, cortocircuitados los detonadores y la línea de tiro, con las conexiones aisladas de tierra y de elementos metálicos
- Medición y estudio de corrientes errantes

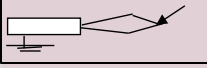
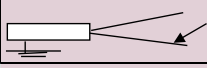
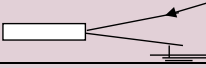
### Electricidad estática

Todos los detonadores disponen de algún sistema de derivación de la corriente – un camino semiconductor antes de la cerilla - para el caso de una descarga de alto potencial. Aun así, existe el riesgo de que la descarga de la energía eléctrica acumulada por un equipo o una persona sobre un detonador origine su iniciación. Por ello todos los elementos metálicos deben tener su puesta a tierra y los operarios deben descargarse de la electricidad además de utilizar calzado semiconductor y ropas adecuadas.

Los detonadores son sometidos a ensayos que simulan diferentes situaciones peligrosas:



- El operario tiene el detonador en la mano y uno o los dos hilos tocan tierra, o viceversa, el operario toca uno o los dos hilos y el casquillo toca tierra: puede ocurrir la aparición de un arco eléctrico entre la cabeza de la cerilla y el casquillo
- Uno de los cables toca tierra mientras que el operario toma el otro extremo desnudo: la descarga es por el puente de incandescencia

Ensayos de los detonadores frente descargas electrostáticas			
ensayos: capacidad (pF) / tensión (kV)			
			
S	300/17	300/15	300/15
I	2500/8	2500/7	2500/7
AI	2500/30	2500/30	2500/30

### Tormentas

La caída de un rayo puede provocar el inicio de los detonadores; incluso a distancias considerables y en obra subterránea. La regla general es interrumpir los trabajos de voladura y desalojar inmediatamente la zona en cuando comiencen a oírse los truenos

El R.G.N.B.S.M dicta que:

*“En las explotaciones a cielo abierto no se llevarán a cabo el cebado del explosivo ni la carga de barrenos, cuando haya tormenta en las proximidades”*

*“Si se detectan tormentas, acústica o visualmente, deben suspenderse los trabajos de voladura, siendo aconsejable, en aquellas épocas y zonas donde sea previsible dicho riesgo, el empleo de detonadores de alta insensibilidad que deben mantenerse cortocircuitados y aislados del terreno hasta el momento de la voladura”*

### Líneas de transporte de energía eléctrica

Además del riesgo de aparición de corrientes errantes, las líneas férreas electrificadas o las líneas de alta tensión, al generar un campo magnético alrededor del cable conductor, producen una fuerza electromotriz inducida en el circuito de voladura debido a la variación del flujo magnético que atraviesa la espira. La intensidad depende de la superficie de la voladura, la tensión, y la distancia (mayor peligro cuando es paralela a la línea).

También existe riesgo de proyección de la línea de tiro a la de alta tensión.

Si la proximidad es inferior a 200m se exige el uso de detonadores AI, los conductores anclados al suelo y conexiones con casquillos aislantes. Además, la reglamentación establece unas distancias mínimas de seguridad, o en su defecto, un estudio que justifique la no existencia de riesgos.

Tensión de línea (V)	Distancia (m)
Hasta 1.000	10
De 1.000 a 6.000	20
De 6.000 a 11.000	50
De 11.000 a 60.000	100
Más de 60.000	200
Líneas ferrocarril	300

#### Energía de radio frecuencia

En determinadas ocasiones un detonador puede comportarse como una antena captando la energía que radian las emisoras lo que puede derivar en su iniciación. Para ello la longitud de los cables debe ser múltiplo de la semilongitud de onda y estar orientados en direcciones opuestas, o estar en la misma orientación y ser su longitud igual a una cuarta parte de la longitud de onda o múltiplo impar.

Potencia emisora	Distancia (m)
Hasta 25 W	50
De 25 a 100 W	75
De 100 a 500 W	150
De 500 a 1 kW	300
De 1 a 5 kW	500
De 5 a 10 kW	750
De 10 a 25 kW	1.200
De 25 a 50 kW	1.700
De 50 a 100 kW	2.350
De 100 a 500 kW	5.000
De 500-1.000 kW	7.500

La reglamentación actúa como en el caso anterior fijando unas distancias mínimas en función de la potencia.

Potencia (W) Radio-telefonos	Distancia (m)
Hasta 10	2
De 10 a 30	3,5
De 30 a 60	5
De 60 a 250	10

## 6. Sistema no eléctrico (nonel)

### **Detonadores nonel**

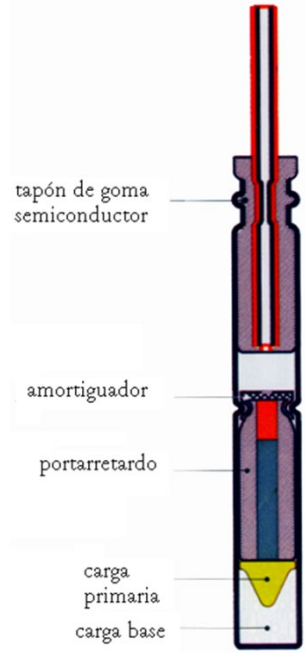
Desarrollado por el Dr. Persson en los 60 para superar los inconvenientes derivados de la utilización de los sistemas de iniciación anteriores - riesgos de iniciación prematura (detonadores eléctricos), y ruido e interferencia con el explosivo en el barreno y la posibilidad de cortes de la línea en el caso de cordón.

Conceptualmente es un detonador eléctrico al que se le ha sustituido los hilos y el inflamador eléctrico por un tubo plástico, de unos 3 mm de diámetro, en cuyas paredes interiores lleva un recubrimiento de alto explosivo - en torno a 20 mg/m de HMX más aluminio -.

Al iniciar el tubo de transmisión se produce una onda de choque que se propaga por el interior del mismo -aún con la existencia de nudos o dobleces - a una velocidad de unos 2000 m/s sin llegar a romperlo. La onda de choque llega a un dispositivo amortiguador cuya función es distribuir la energía en la superficie de una composición iniciadora que actuará sobre la pasta de retardo garantizando su combustión estable a volumen constante y, por tanto, su exactitud en el tiempo de salida.

Un tapón semiconductor proporciona estanqueidad al sistema y protección frente a descargas electrostáticas.

El extremo externo del tubo de transmisión se sella herméticamente por ultrasonidos para evitar la entrada de agua o humedad en el interior del mismo.



En dicho extremo lleva un conector J –ver figura debajo - para el caso de que vaya a ser iniciado con cordón detonante – 3g/m o 6g/m-, aunque también se puede anudar directamente el cordón a manojos de hasta 20 tubos conectores – para voladuras en túnel.



Al igual que  
detonadores  
eléctricos los  
detonadores

los

nonel pueden ser de retardo largo –por ejemplo desde el número 1 hasta el 10, con un retardo entre cada dos números consecutivos de 100 ms, luego los números saltan de dos en dos: 12, 14..., y los números superiores pueden saltar de cinco en cinco, o de diez en diez (25, 30...60, 70)-; y de retardo corto -suelen constar en torno a 20 períodos con un retardo entre cada dos números consecutivos de entre 25 ms ó 30 ms – saltándose algunos números al igual que los de retardo largo.

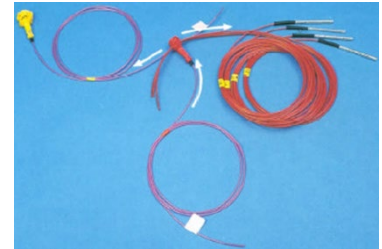
Los detonadores se suministran en madejas codificadas con colores, de longitudes comprendidas entre unos tres metros y medio hasta los treinta metros. Pueden ser iniciados con cordón detonante de bajo gramaje –a través del conector -, con otro detonador o con un conector de superficie nonel.

Tiempos de retardo (Valores nominales)	
Microrretardo	
Nº Período	Tiempo (m/s)
0	-
1	25
2	50
3	75
4	100
5	125
6	150
7	175
8	200
9	225
10	250
12	300
14	350
16	400
18	450
20	500
22	550
24	600
26	650
28	700
30	750

## Conectores de retardo de superficie



Consisten en un bloque de plástico en cuyo interior lleva alojado un detonador-cebador, de pequeña potencia, que se inicia con un tubo de choque. El detonador es temporizado –por ejemplo 9, 17, 25, 42... ms- y el bloque puede alojar e iniciar varios tubos de transmisión – en torno a 6 - de otros tantos detonadores o conectores. Este dispositivo permite la posibilidad de introducir en la secuencia de voladura un número ilimitado de retardos sin solapamientos. Se suministran con metrajes comprendidos entre tres metros y medio y los nueve metros.



También existen conectores para cordón detonante –en este caso el detonador es de mayor potencia –nº 8 - y es unidireccional debiendo apuntar su cabeza al sentido de propagación de la detonación-.

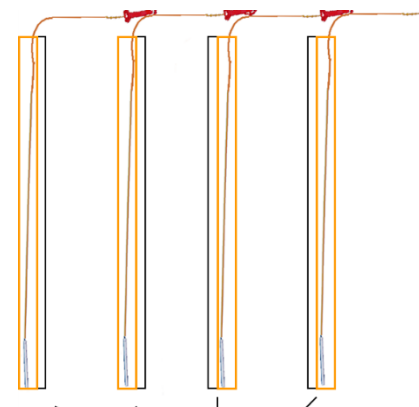


Una **norma elemental es no alojar jamás en el mismo conector cordón y tubos de choque**. Los conectores de cordón deben cubrirse y estar separados unos 50 cm de los tubos de choque para evitar la rotura de los mismos. El propio cordón no debe cruzarse con los tubos; solo debe haber contacto en el punto de unión con el conector J - en caso de que aquel deba iniciar al conector J lógicamente-.

## Dispositivo detonador + retardo

Un desarrollo posterior ha sido la introducción del detonador y del elemento de retardo de superficie en la misma madeja. El detonador que ceba al explosivo es de retardo largo -por ejemplo, de 300 ms, de 700 ms...- mientras que el elemento de superficie es de retardo corto –por ejemplo, de 25 ms, de 42 ms...-. De esta manera se simplifican las conexiones con la ventaja adicional de que un gran parte de la voladura estará ya cebada –le habrá llegado la señal del tubo de choque a los detonadores ubicados en los barrenos - antes de que explote el primer detonador, con lo que disminuye o elimina el riesgo de corte de la línea de fuego.

Esto mismo efecto también se puede conseguir con conectores de superficie y empleando un único nº alto en los detonadores nonel -por ejemplo, empleando un



Todos con el mismo retardo

nº 20 de la serie de 25 ms el primer barreno saldrá en un tiempo nominal de 500 ms, si los conectores de retardo en superficie son de 42 ms la señal se habrá propagado a unos 10 conectores estando ya alejada de la zona afectada por la explosión del primer barreno-. La presentación comercial de este dispositivo es igual a la de los detonadores nonel.

Las principales aportaciones del sistema nonel a la tecnología de la iniciación de voladuras son: conexiones fáciles de realizar, gran flexibilidad en la temporización y secuenciación de voladuras, bajo nivel de ruido además de no presentar los inconvenientes que tiene el sistema eléctrico respecto a la iniciación por corrientes extrañas. Quizás el punto débil – sin entrar en los aspectos económicos- es que la comprobación de las conexiones ha de realizarse de forma visual. En definitiva, este sistema presenta las siguientes ventajas frente al sistema eléctrico y al cordón detonante:

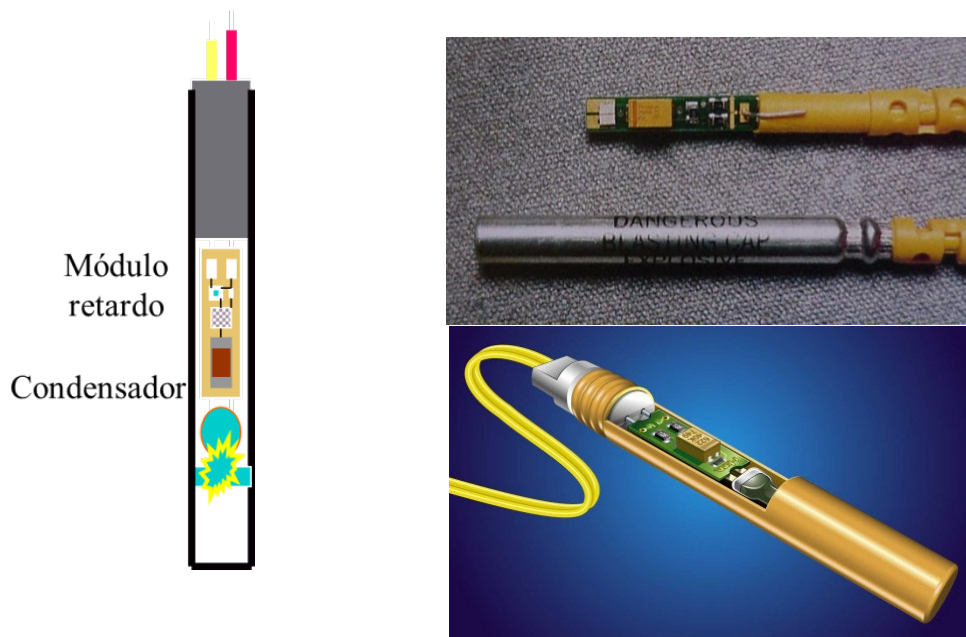
- Facilidad y rapidez de las conexiones
- Posibilidad de cebado en fondo
- No afección al retacado
- Bajo nivel de ruido producido
- Seguridad frente a corrientes extrañas
- Posibilidad de conectar un número ilimitado de barrenos sin repetición de tiempos (utilizando retardo de superficie o dispositivo detonador más conector de retardo)
- Posibilidad de cebar gran parte de la pega antes de que salga el primer barreno (utilizando un número largo en barreno) eliminando la posibilidad de corte de la línea de fuego en superficie.



## 7. Sistema electrónico

---

En este sistema se sustituye el elemento de retardo pirotécnico del detonador por un microchip y se introduce un condensador encargado de suministrar la energía necesaria para la iniciación de la cerilla que, a su vez, será la encargada de iniciar a la carga primaria.



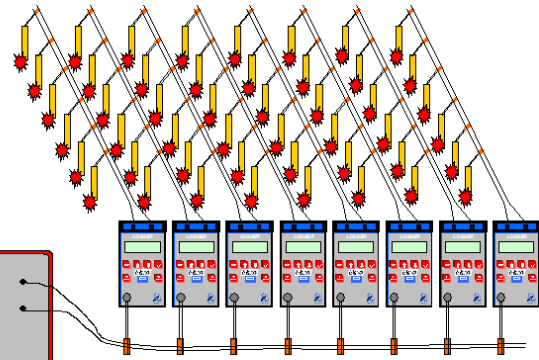
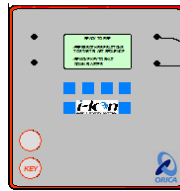
**Detonador electrónico**

Pueden ser programables *in situ* con intervalos de tiempo de hasta 1 ms. Cada detonador lleva un conector y un código, y mediante un registrador *–logger–* se le asigna el tiempo de salida. El *logger*, posteriormente, transmite la secuencia programada al *blaster* (explosor) y éste enviará la información y la energía a los detonadores.

Se describe, como ejemplo, el sistema i-kon de Orica: el *logger* lee el código del detonador y comprueba el correcto funcionamiento general (contacto detonador línea de tiro, electrónica del detonador y pérdidas de corriente o cortos), y sólo después de realizar este examen solicita al usuario el tiempo de retardo. Dicho tiempo puede introducirse de tres maneras: el tiempo real o absoluto; de registro automático – a través de unos intervalos de tiempos pre-asignados-; o mediante el clásico sistema de numeración –se establece un intervalo constante de manera que la salida será dicho intervalo por el número-.

Cada *logger* puede registrar hasta 200 detonadores, y el explosor – *blaster*- puede controlar hasta 12 registradores –depende del modelo del explosor -.

Una vez terminada la asignación de tiempos a los detonadores, se conectan los *loggers* al explosor transmitiéndole la información

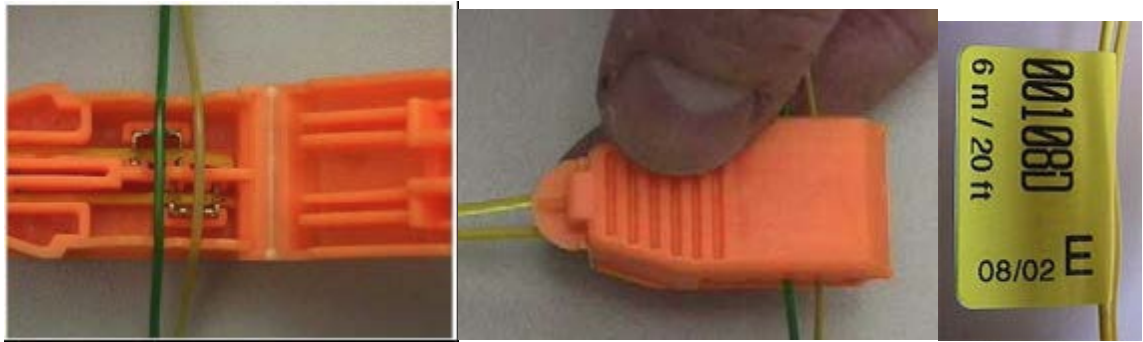


almacenada. El explosor, de bajo voltaje, comprueba tanto los *loggers* como los detonadores informando si hubiera algún error (falta de detonadores o de algún *logger*, o cortocircuitos). Finalmente, el *blaster* envía la información a cada detonador y, a continuación, entrega la energía a cada condensador con un código de activación específico –el detonador no acepta la energía sin dicho código-.

Los detonadores electrónicos disponen de protecciones que lo hacen muy seguros frente a corrientes eléctricas extrañas y descargas de alto voltaje. La precisión en el tiempo de salida es muy alta – en el i-kon es +/- 0.01% con un mínimo de +/- 0.13 ms- (en los últimos modelos la precisión es incluso mayor). Las conexiones son sencillas, algunos sistemas pueden admitir la conexión con ordenadores para el diseño de la secuencia con ayuda de programas, pueden disparar en remoto y, en definitiva, el sistema electrónico constituye la última generación en tecnología de iniciación de explosivos de uso civil.

Seguridad, flexibilidad y control son sus valores añadidos. Como inconveniente, la necesidad de formación y adaptación en el empleo de un sistema que no es tan estándar entre los fabricantes como los anteriormente expuestos: el sistema eléctrico o el nonel. Por otra parte, desde el punto de vista técnico, no se debe olvidar que los cables son conductores eléctricos y, por tanto, hay que mantener las precauciones al respecto: posibilidad de proyección de los cables sobre líneas de alta, derivación de conexiones...

De momento, el mayor control en vibraciones y fragmentación o la mayor flexibilidad en la temporización y secuencia de la voladura que permite este sistema no parecen suficientes para compensar su alto precio –coste para el minero- en voladuras habituales de banqueo, aunque sí pueda serlo en aplicaciones específicas (control de vibraciones y grandes voladuras).



**Detalle de la conexión de los cables del detonador electrónico a la línea de tiro**