

DETONADORES ELECTRICOS

M. **TEC** R.



TEC HARSEIM S.A.I.C.

UNA INDUSTRIA CHILENA
AL SERVICIO DEL PAIS DESDE 1935

TEC HARSEIM S.A.I.C.

UNA INDUSTRIA CHILENA

AL SERVICIO DEL PAIS DESDE 1935

DETONADORES
ELECTRICOS
TEC

I N D I C E

Introducción	5
Característica del detonador eléctrico instantáneo	6
Elementos accesorios de los detonadores eléctricos “TEC”	8
Funcionamiento normal del detonador eléctrico	8
Resistencia de los conductores de los detonadores eléctricos de acuerdo con su largo	9
Funcionamiento accidental del detonador eléctrico	12
Datos para los cálculos	13
Ejemplos de cálculos	15
Conexiones en serie	15
Conexiones en paralelo	16
Conexiones en serie-paralelo	16
Nota importante	17
Recomendaciones para el caso de conexiones en “serie-paralelo”	19
Recomendaciones generales en el uso de detonadores eléctricos	24

INTRODUCCION

Nos permitimos dar, en forma resumida, algunas recomendaciones que deben ser conocidas por todos los que emplean detonadores eléctricos.

Adoptamos el nombre de "detonador", entre los variados nombres que se le dan a este artículo, pues representa exactamente la función que desempeña, y que es dar el impulso necesario para hacer "detonar" un explosivo. Otros nombres que corrientemente se dan a los detonadores y que a menudo producen confusión son: fulminantes, fuses, estopines, etc.

No pretendemos abarcar el tema en forma completa, ya que nuestro objetivo es sólo hacer resaltar los puntos que creemos son de mayor importancia como lo son el funcionamiento normal y el accidental de un detonador eléctrico.

Hemos incluido también algunos datos para cálculos, cuadro de resistencia de alambres de cobre y fierro de diferentes calibres y algunos ejemplos de cálculo de voltaje y energía teórica necesaria.

Finalmente, deseamos recordarle que:

EN LA CONFIANZA ESTA EL PELIGRO,
SEA PRECAVIDO:
RESPETE A LOS EXPLOSIVOS
Y ELLOS LO RESPETARAN A UD.

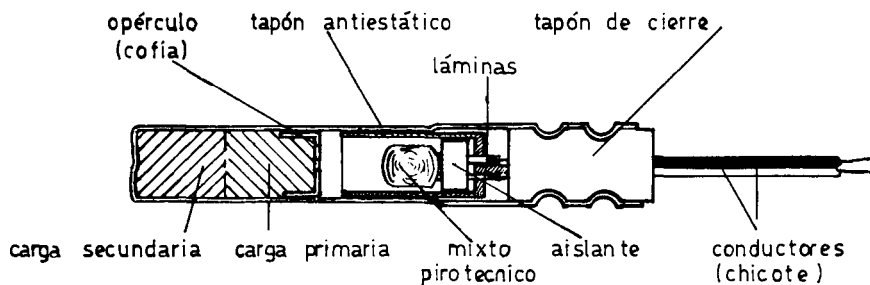
CARACTERISTICAS DEL DETONADOR ELECTRICO INSTANTANEO

El detonador eléctrico es aquel en que un detonador es encendido mediante un golpe de corriente eléctrica a través de un alambre de alta resistencia.

El detonador eléctrico instantáneo TEC, consiste en un casquillo de cobre (o aluminio) en cuyo fondo se han agregado dos tipos de explosivos en capas sucesivas:

- 1ª capa: Es la capa puesta al fondo del casquillo, y es la que corresponde al llamado explosivo secundario. Este explosivo secundario es el tetranitrato de pentaeritrita (PETN);
- 2º capa: Explosivo llamado primario. Se emplea el diazodinitrofenol.

Sobre estos dos explosivos va colocado un opérculo (o cofia) de cobre, de aluminio u otro material, con un orificio central, el cual impide que el explosivo se disperse. A continuación viene el inflamador eléctrico, el cual va unido al casquillo ya cargado por medio de un tapón termoplástico, hermético. Este tapón se coloca con el inflamador en el casquillo de manera tal que encaje perfectamente bien y quede fijo mediante varios estrangulamientos o cierres.



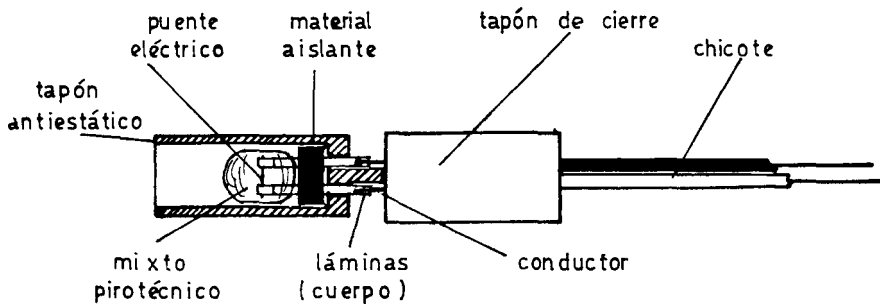
ESQUEMA DE UN DETONADOR ELÉCTRICO
INSTANTÁNEO

El inflamador eléctrico (dispositivo eléctrico) es una de las principales partes del detonador eléctrico. Este dispositivo consiste en dos láminas metálicas separadas por un material termoplástico aislante, que le da una gran solidez al conjunto. Estas láminas están unidas en uno de sus extremos por un puente eléctrico de alambre especial, el cual se encuentra cubierto de una sustancia inflamable (mixto pirotécnico) formado por varias capas de diversa composición química. La capa interna es iniciada instantánea-

mente por el calor producido al circular una corriente eléctrica adecuada a través de la resistencia del puente eléctrico.

En el otro extremo de cada una de las láminas va soldado el alambre conductor de cobre o hierro, que sirve para hacer la conexión con la fuente de energía eléctrica.

Al calentarse el alambre del puente por el paso de la corriente eléctrica, se pone incandescente e inicia el mixto pirotécnico que está colocado en forma de gota a su alrededor. La chispa originada, sirve directa o indirectamente para hacer estallar la carga del detonador. El detonador eléctrico instantáneo se inicia directamente por la acción de la chispa, lo que permite hacer estallar al mismo tiempo todos los barrenos de una serie. En el detonador de retardo se retarda la explosión del detonador intercalando un elemento de retardo entre el inflamador y el óperculo.



ESQUEMA DEL ELEMENTO PIROTÉCNICO

En cada parte del proceso de fabricación del inflamador eléctrico (elemento electropirotécnico o elemento pirotécnico) se efectúan controles minuciosos. Cada inflamador es controlado automáticamente y separado según rangos de resistencia, eliminando así las variaciones mayores. Todo inflamador que presente alguna irregularidad es eliminado.

En los inflamadores eléctricos de los detonadores TEC tanto el puente de incandescencia como los alambres de conducción son adheridos al cuerpo del inflamador (láminas) mediante un sistema de soldadura especial que le da una gran solidez y resistencia a la tracción. Con este sistema de soldado se evitan además todos los peligros que puedan resultar al soldar los inflamadores usando el cloruro de zinc.

Los alambres conductores de cobre utilizados en los detonadores eléctricos TEC, tienen un diámetro de 0,51 mm. y los de hierro un diámetro de 0,61 mm. Ambos tipos de alambre están cubiertos uniformemente de un material termoplástico. Esta cubierta es de una alta resistencia a esfuerzos mecánicos y a la humedad.

El tapón termoplástico utilizado en el detonador eléctrico TEC, va fijado sobre los alambres conductores mediante un procedimiento especial, con lo que resulta una unión muy estrecha con el aislamiento de estos alambres.

Este tipo de tapón y cierre aísla los detonadores eléctricos TEC de una manera hermética e impermeable.

ELEMENTOS ACCESORIOS DE LOS DETONADORES ELECTRICOS "TEC"

1. Todo detonador eléctrico TEC va provisto de un tapón antiestático de material aislante, el que va ubicado sobre el elemento electropirotécnico en el interior del detonador. Esto hace que estos detonadores eléctricos sean muy seguros, eliminando al máximo los peligros de la corriente producida por la electricidad estática.
2. Además del tapón antiestático, los terminales de los detonadores eléctricos TEC van provistos de un tubito (spaguetti), el cual se utiliza para aislar los terminales de los alambres conductores y, además, sirve, posteriormente, para aislar las conexiones entre detonadores y evitar pérdidas de corriente.

FUNCIONAMIENTO NORMAL DEL DETONADOR ELECTRICO

Un detonador eléctrico se hace funcionar en forma normal y controlada, por la aplicación de un voltaje suficientemente alto en sus terminales, para que circule por él una corriente de 0,5 amperes cuando el detonador se dispara aisladamente o de 0,8 amperes por cada detonador cuando se conecta en paralelo.

Si los detonadores están conectados en serie, de modo que la corriente pase del uno al otro, se debe calcular con una corriente de 1,6 amperes para el caso de 25 detonadores en serie (Norma INDITECNOR 24-15, artículo 10).

Por lo tanto el voltaje necesario varía de acuerdo con la forma en que se conecten los detonadores y además con el detonador empleado, debido a la resistencia de este último, es decir, a la resistencia del elemento inflamador, más la resistencia de los alambres (chicote).

La resistencia eléctrica del elemento inflamador deberá estar comprendida entre 1,0 y 3,5 ohms (Norma INDITECNOR 24-14, artículo 5º). La resistencia eléctrica del elemento inflamador de los detonadores eléctricos TEC se tomará para los cálculos en su valor máximo de 2,2 ohms.

Los detonadores eléctricos TEC se fabrican con alambre de cobre de 0,51 mm. de diámetro, Nº 24 AWG, o con alambre de fierro galvanizado de 0,61 mm. de diámetro, y por lo tanto, la resistencia eléctrica de un deto-

nador con alambres de 1 metro (chicote de 1 metro) será la resistencia del elemento inflamador (2,2 ohms), más 2 veces la resistencia de 1 metro de alambre.

A continuación se da una tabla que indica la resistencia de los conductores eléctricos de acuerdo con su tipo (cobre o fierro) y con su largo.

RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES DE LOS DETONADORES ELECTRICOS DE ACUERDO CON SU LARGO

ALAMBRE DE COBRE (0,51 mm. de diámetro)

<i>Largo del alambre</i>	<i>Resistencia del alambre</i>	<i>Resistencia total: 2 veces el largo del alambre (chicote)</i>
METROS	OHM	OHM
0,61	0,055	0,110
1,00	0,090	0,180
1,30	0,127	0,254
1,50	0,135	0,270
1,80	0,162	0,324
2,00	0,180	0,360

ALAMBRE DE FIERRO (0,61 mm. de diámetro)

<i>Largo del alambre</i>	<i>Resistencia del alambre</i>	<i>Resistencia total: 2 veces el largo del alambre (chicote)</i>
METROS	OHM	OHM
0,61	0,225	0,450
1,00	0,375	0,750
1,30	0,488	0,976
1,50	0,563	1,125
1,80	0,675	1,350
2,00	0,750	1,500

La resistencia de un detonador eléctrico con alambre de cobre de 1 metro será la resistencia del elemento inflamador (2,2 ohms) más 2 veces la resistencia de 1 metro de alambre (2 metros de alambre de cobre Nº 24 AWG por 0,090 ohms), o sea 0,18 ohms por cada metro de alambre doble o, como se le llama también, chicote de 1 metro.

En resumen:

Resistencia del inflamador	2,20 ohms
Resistencia de los 2 alambres de 1 metro c/u	0,18 ohms
Resistencia total del detonador con chicote de cobre de 1 metro	2,38 ohms

Voltaje por detonador necesario para disparar detonadores con chicote de cobre de 1 metro:

Disparados aisladamente 0,5 amps. \times 2,38 ohms	= 1,19 volts.
Disparados en paralelo 0,8 amps. \times 2,38 ohms	= 1,90 volts.
Disparados en serie de 25 1,6 amps. \times 2,38 ohms	= 3,80 volts.

En los disparos de detonadores conectados en serie, si el chicote es de cobre y si no se desea hacer un cálculo del circuito, se puede calcular con 5 volts. por cada detonador que compone la serie, para tomar en cuenta las pérdidas en las líneas de disparo. En caso contrario, se medirá la resistencia del circuito y se empleará un valor de voltaje que resulta de multiplicar el amperaje (1,6 amperes) por el valor de la resistencia medida en ohms, siendo conveniente como factor de seguridad, aumentar en 50% el valor obtenido, si es posible hacerlo.

Según las normas INDITECNOR un detonador eléctrico debe resistir el paso de una corriente de 0,10 amperes durante 5 minutos, sin detonar.

Considerando que un detonador ya puede funcionar, si es atravesado por una corriente superior a 0,10 amperes, se ve la necesidad de proceder a la medición de la resistencia del circuito solamente con aparatos especiales que limiten el paso de la corriente por el detonador a un valor inferior a 0,01 amperes.

Es necesario asegurarse que la fuente que suministra la energía sea adecuada para la potencia que se necesita entregar porque puede suceder, por ejemplo, que una pila (que a veces se emplea) tenga el voltaje necesario al ser medido éste con un voltímetro y, sin embargo, en el momento de serle conectada la carga baje el voltaje y no sea capaz de suministrar la corriente necesaria para un funcionamiento sin falla de todos los detonadores.

Los detonadores eléctricos pueden ser conectados en tres formas:

SERIE

PARALELO

SERIE-PARALELO

El cálculo de estos circuitos se reduce a la aplicación de la Ley de Ohm: $E = IR$ en que E es el voltaje en VOLTS., I el amperaje en AMPERES y R la resistencia en OHMS. Ver más adelante ejemplos de cálculos.

Deberán ser tomadas en cuenta, desde luego, no sólo las resistencias de los detonadores sino también las de las líneas que unen los detonadores a la fuente de electricidad y resistencias por malos contactos en las uniones.

Las uniones eléctricas deberán separarse de las paredes u objetos que puedan producir una pérdida de corriente y si esto no es posible, deberán ser aisladas en buena forma. (Para ello se puede utilizar el spaguetti que lleva cada detonador eléctrico TEC). Las uniones deberán hacerse en forma que ofrezcan la menor resistencia posible al paso de la corriente, ya que el aumento de la resistencia debido a uniones defectuosas o la pérdida de corriente hacia tierra pueden ser causa de fallas.

Se recomienda el empleo de máquinas para voladuras llamadas "Explosores" para el suministro de la corriente necesaria para los disparos. Los más aconsejables son los explosores de cuerda, por cuanto el buen resultado no depende del operador. No teniendo éstas se debe preferir siempre la corriente continua a la alterna y, en caso de emplearse corriente alterna, ésta no deberá ser de una frecuencia inferior a 50 periodos por segundo. Según la literatura alemana no debería emplearse corriente alterna para hacer disparos por ser fuente de posibles fallas. Sin embargo, según textos norteamericanos, se habrían obtenido resultados satisfactorios con el empleo de este tipo de corriente. Con el empleo de corriente alterna puede suceder que en los disparos en serie estos se realicen sin dificultades en numerosas ocasiones y que sin embargo, ocasionalmente, queden varios detonadores de la serie sin detonar, lo que dependerá en qué punto de su variación de voltaje se encuentre el voltaje alterno en el momento preciso en que se conecta a los detonadores.

Se recomienda no usar detonadores de diferentes fabricantes para hacer disparos de detonadores conectados en serie.

En todo disparo de varios detonadores al mismo tiempo es conveniente revisar el circuito midiendo la resistencia con un instrumento especial. Esta medida de la resistencia deberá ser comparada con la resistencia teórica, calculada con las resistencias parciales de los elementos y cualquiera diferencia entre estos dos valores deberá ser investigada, porque puede ser la causa de tiros quedados.

Cuando se disparan detonadores conectados en serie puede suceder que algunos no funcionen a pesar de que el resto detona normalmente. Si esto sucediera es generalmente una indicación de que no se está trabajando con suficiente voltaje o que la fuente de energía no es capaz de entregar el amperaje necesario y por lo tanto deberá corregirse, aumentando el voltaje o disminuyendo el número de detonadores que componen la serie para que circule por ellos una corriente de mayor amperaje.

Un exceso exagerado de voltaje también puede producir fallas.

FUNCIONAMIENTO ACCIDENTAL DEL DETONADOR ELECTRICO

Un detonador eléctrico puede detonar accidentalmente por las siguientes razones:

a) *Aplicación casual de electricidad*

Esta se puede producir por las razones más variadas, entre ellas: contacto de los terminales del detonador con alambres, rieles u otros elementos que generalmente tienen electricidad o no la tienen, pero que casualmente pueden tenerla; electricidad estática acumulada producida por el roce de diferentes elementos como: correas transportadoras, descarga de material, ropa nylon, etc.; descargas atmosféricas en la superficie que pueden actuar a varios kilómetros de distancia, aun bajo tierra; campos electromagnéticos producidos por imanes o por circulación de corriente en conductores que inducen corrientes dentro del detonador que actúa como el secundario de un transformador en cortocircuito (en el segundo caso); transmisiones de radio (como dato ilustrativo de esto último, en ciertos manuales se considera poco probable una explosión prematura en las circunstancias más desfavorables, si el detonador se encuentra a una distancia mayor de 30 metros de una transmisora de 5 a 25 watts de potencia y mayor de 2.200 metros de una transmisora de 50 a 100 kW.).

Si se considera que un detonador eléctrico puede funcionar con una corriente superior a 0,10 amperes y que de acuerdo con las normas INDI-TECNOR la resistencia mínima de su elemento inflamador puede ser de 1 ohms, sin considerar la resistencia del chicote (alambre) un voltaje superior a 0,10 volts. aplicado al alambre del detonador puede ser peligroso.

En las minas con locomotoras eléctricas es fácil medir voltajes superiores a 0,10 volts. entre rieles y cañerías, entre cañerías y rocas, entre fierros y rocas y aun entre rocas. Estos voltajes, en muchas ocasiones, dependen de la posición de la locomotora y varían según donde ésta se encuentre.

También son productores de voltajes peligrosos las fugas de corrientes desde alambres de trolley, soquetes de ampolletas, interruptores, etc.

Para disminuir este último peligro, en construcción de túneles se emplean transformadores especiales en que el neutro no va conectado a tierra en ninguna parte del sistema eléctrico, evitándose con ello que existan voltajes entre líneas y tierra. También existen avisadores especiales que indican cuándo las fugas a tierra sobrepasan una cierta fracción de amperes y, en ciertos casos, desconectan el sistema eléctrico.

b) *Aplicación de calor*

Llama directa de lámpara o fuego; rayos concentrados del sol a través de vidrios; resistencias eléctricas descubiertas; líquidos, metales u otros elementos calientes, etc.

c) *Maltrato*

Golpe: por golpear el detonador contra algún objeto o algún objeto contra el detonador; aplastamiento por pisoteo o por caer entre piezas en movimiento, etc.

Tironeo de alambres: para sacar los alambres del detonador en buen estado o del detonador que puede haber fallado por suponerse en este último caso de que no hay peligro; para desenredarlos entre ellos o de algún otro objeto; para descargar detonadores en tiros fallados.

Para evitar dentro de lo posible estos riesgos se han establecido normas relacionadas con las exigencias mínimas que deben cumplir los detonadores eléctricos, normas que cumplen rigurosamente los detonadores eléctricos TEC.

RECUERDE: EN LA CONFIANZA ESTA EL PELIGRO.

“SEA PRECAVIDO”

DATOS PARA LOS CALCULOS

Al referirnos al largo de los alambres de un detonador como de 1 metro debemos aclarar que para los efectos de calcular la resistencia en ohms/metro es necesario multiplicar por 2, ya que, cada detonador tiene 2 alambres de 1 metro cada uno. Los dos alambres reciben también el nombre de chicote.

Resistencia de las líneas de unión del explosor a los detonadores (línea de disparo):

Debe calcularse tomando en cuenta su largo total, de ida y vuelta, multiplicando por el valor de resistencia por metro tomado de la tabla de resistencias, correspondientes al diámetro del alambre empleado.

Resistencia de 1 detonador TEC con 2 alambres de cobre de 1 metro de largo	2,38 ohms
Aumento de resistencia por cada metro doble extra de alambre	0,18 ohms
Amperaje necesario para disparar 1 detonador solo	0,50 amperes

Amperaje necesario para disparar varios detonadores conectados en paralelo. Por detonador: 0,80 ampéres

Amperaje necesario para disparar varios detonadores conectados en serie:

- Serie de 5 detonadores 0,80 amperes
- Serie de 10 detonadores 1,30 amperes
- Serie de 25 detonadores 1,60 amperes

(el amperaje circulará por toda la serie) .

Voltajes necesarios: Deberán ser calculados en la forma indicada por los ejemplos siguientes.

RESISTENCIA DE ALAMBRE DE COBRE DE DIFERENTES CALIBRES

<i>Calibre en AWG</i>	<i>Diámetro en milímetros</i>	<i>Resistencia en ohms/metro</i>
0	8,26	0,000328
2	6,53	0,000522
4	5,19	0,000826
6	4,12	0,001320
8	3,26	0,002100
10	2,59	0,003340
12	2,05	0,005310
14	1,63	0,008460
16	1,29	0,013500
18	1,05	0,021400
20	0,81	0,034200
22	0,64	0,054900
23	0,58	0,069300
24	0,51	0,087800
25	0,46	0,111000

RESISTENCIA MEDIA DE DETONADORES "TEC" CON ALAMBRES DE COBRE
(24 AWG de 0,51 mm. de diámetro)
DE DIFERENTE LARGO

<i>Largo del chicote (dos alambres)</i> CENTIMETROS	<i>Resistencia del detonador</i> OHMS
61	2,310
100	2,380
120	2,416
150	2,470
180	2,524
200	2,560
250	2,650
300	2,740
400	2,920
500	3,100
600	3,280

RESISTENCIA MEDIA DE DETONADORES "TEC" CON ALAMBRE DE FIERRO
GALVANIZADO (de 0,61 mm. de diámetro),
DE DIFERENTE LARGO

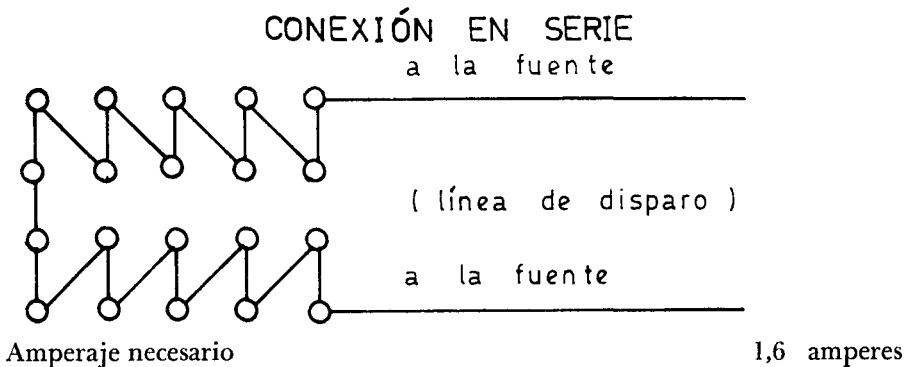
<i>Largo del chicote (dos alambres)</i> CENTIMETROS	<i>Resistencia del detonador</i> OHMS
61	2,650
100	2,950
130	3,176
150	3,325
180	3,550
200	3,700
250	4,075
300	4,450
400	5,200
500	5,950
600	6,700

EJEMPLOS DE CALCULO

En los ejemplos que se dan a continuación se ha supuesto que los detonadores eléctricos se unen al explosor por medio de una línea doble de alambre de cobre Nº 18 AWG (ϕ 1,05 mm).

CONEXIONES EN SERIE

20 detonadores (cada uno con 2 alambres de cobre de 1 metro (chicote de 1 m)) conectados en serie y unidos a la fuente de energía por 50 metros (dobles) de alambre de cobre Nº 18 AWG.



Resistencia del circuito:

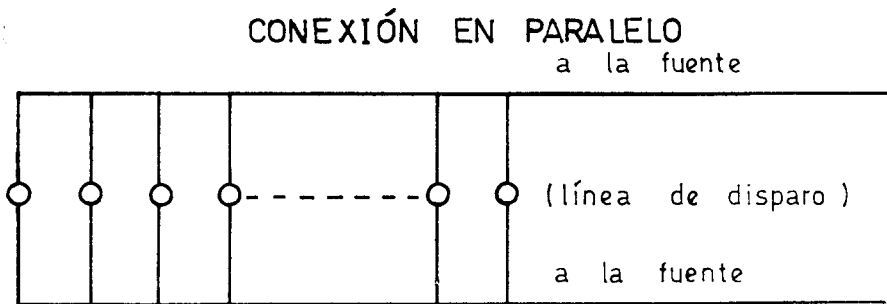
- a) Resistencia de 1 detonador 2,38 ohms
- b) Resistencia de los 20 detonadores: $(20 \times 2,38)$ 47,60 ohms

- c) Resistencia de los alambres de conexión:
 (100 metros \times 0,0214) 2,14 ohms
 d) Resistencia total del circuito: (47,60 + 2,14) 49,74 ohms

Voltaje necesario: (49,74 ohms \times 1,6 amperes) 79,58 volts
 Energía teórica necesaria: 279,58 volt \times 1,6 amperes) 127,92 watts

CONEXIONES EN PARALELO

20 detonadores (cada uno con 2 alambres de cobre de 1 metro) conectados en paralelo y unidos a la fuente de energía por 50 metros (dobles) de alambre de cobre N° 18 AWG.



Amperaje necesario: (20 \times 0,8) 16 amperes
 Resistencia del circuito:

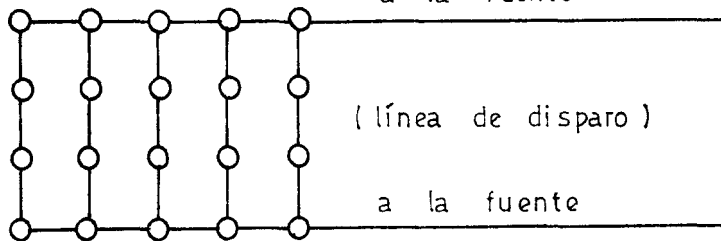
- a) Resistencia de 1 detonador 2,38 ohms
 b) Resistencia de los 20 detonadores: (2,38 : 20) 0,12 ohms
 c) Resistencia de los alambres de conexión:
 (100 metros \times 0,0214) 2,14 ohms
 d) Resistencia total del circuito: (0,12 + 2,14) 2,26 ohms

Voltaje necesario: (2,26 ohms \times 16 amperes) 36,16 volts
 Energía teórica necesaria: (36,16 volts \times 16 amperes) = 578,56 watts

CONEXIONES EN SERIE-PARALELO

5 detonadores (cada uno con 2 alambres de cobre de 1 metro) conectados en serie. Se conectan en paralelo 4 series dando un total de 20 detonadores que se unen a una fuente de energía por 50 metros (dobles) de alambre de cobre N° 18 AWG.

CONEXIÓN EN SERIE - PARALELO a la fuente



Amperaje necesario para 1 serie de 4 detonadores:	0,8 amperes
Amperaje total: (4 series \times 0,8 amperes)	3,2 amperes

Resistencia del circuito:

- | | |
|---|------------|
| a) Resistencia de 1 serie: (5 detonadores \times 2,38 ohms) | 11,90 ohms |
| b) Resistencia de 4 series en paralelo: (11,90 : 4) | 2,98 ohms |
| c) Resistencia de los alambres de conexión: | |
| 100 metros \times 0,0214 | 2,14 ohms |
| d) Resistencia total del circuito: | |
| (2,98 ohms + 2,14 ohms) | 5,12 ohms |

Voltaje necesario: (5,12 ohms \times 3,2 amperes)	16,38 volts
Energía teórica necesaria: (16,38 volts \times 3,2 amperes)	52,41 watts

NOTA IMPORTANTE

El cálculo de la energía teórica requerida es conveniente para asegurar que la fuente de energía esté de acuerdo con las necesidades reales, ya que, como se ve en los ejemplos, no sólo es indispensable que la fuente de energía dé el voltaje necesario, sino también es importante que dé el amperaje correspondiente.

Para el caso de los detonadores eléctricos con chicotes de fierro los cálculos se hacen en la misma forma pero tomando la resistencia equivalente del alambre de fierro.

Resalta de los ejemplos, la importancia que tiene la resistencia de los conductores que unen los detonadores a la fuente de energía.

En el caso de los detonadores en paralelo, si no se hubiera tomado en cuenta la resistencia de los conductores de unión (línea de disparo), se habrían necesitado solo 1,92 volts para hacer la tronadura, pero tomándola en cuenta, sube el valor del voltaje necesario a 36,16 volts.

Calculemos ahora, el mismo ejemplo pero usando alambre N° 8 AWG. de cobre.

20 detonadores (cada uno con 2 alambres de cobre de 1 metro) conectados en paralelo y unidos a la fuente de energía por 50 metros (dobles) de alambre de cobre N° 8 AWG.

Amperaje necesario (calculado en un ejemplo anterior) 16 amperes

Resistencia del circuito:

- a) Resistencia de 1 detonador 2,38 ohms
- b) Resistencia de los 20 detonadores: $2,38 : 20$ 0,12 ohms
- c) Resistencia de los alambres de conexión:
(2 veces 50 metros = 100 metros a 0,0021 ohms/metro) 0,21 ohms
- d) Resistencia total del circuito: $(0,21 + 0,12)$ 0,33 ohms

Voltaje necesario: $(0,33 \text{ ohms} \times 16 \text{ amperes})$ 5,28 volts

Energía teórica necesaria: $(5,28 \text{ volts} \times 16 \text{ amperes})$ 84,48 watts

Se desprende de este ejemplo que el cambio del alambre de cobre de unión (línea de disparo) de los detonadores a la fuente de energía, del N° 18 AWG (ϕ 1,05 mm) . al N° 8 AWG (ϕ 3,26 mm.) disminuyó el voltaje necesario de 36,16 volts a 5,28 volts y la energía teórica necesaria de 578,56 watts a 84,48 watts.

En el ejemplo de la conexión en serie, por trabajarse con menor amperaje y ser la resistencia de la línea pequeña comparada con la resistencia de los detonadores conectados en serie tiene menos influencia el cambio del diámetro del alambre, como se desprende del ejemplo que damos a continuación:

20 detonadores (cada uno con 2 alambres de cobre de 1 metro) conectados en serie y unidos a la fuente de energía por 50 metros (dobles) de alambre de cobre N° 8 AWG:

Amperaje necesario: 1,60 amperes

Resistencia del circuito:

- a) Resistencia de 1 detonador 2,38 ohms
- b) Resistencia de 20 detonadores: $(20 \times 2,38)$ 47,60 ohms
- c) Resistencia de los alambres de conexión:
(2 veces 50 metros = 100 metros a 0,0021 ohms/metro) 0,21 ohms
- d) Resistencia total del circuito: $(47,60 + 0,21)$ 47,81 ohms

Voltaje necesario: $(47,81 \text{ ohms} \times 1,60 \text{ amperes})$ 76,49 volts
 Energía teórica necesaria: $(76,49 \text{ volts} \times 1,60 \text{ amperes}) =$ 122,38 watts

En este caso el cambio del diámetro del alambre significó solamente una disminución del voltaje necesario de 79,58 volts a 76,49 volts y de la energía teórica necesaria de 127,32 watts a 122,38 watts.

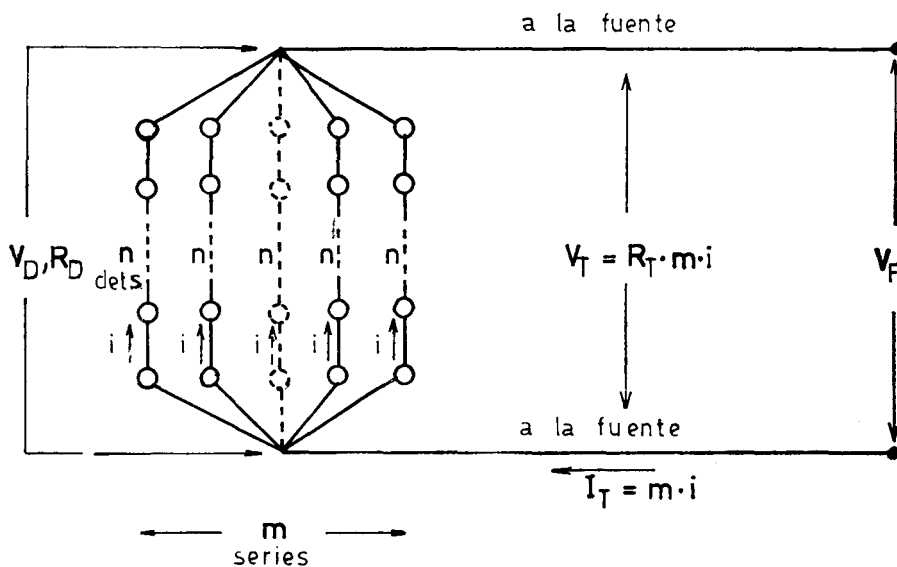
Hacemos presente que todos los cálculos corresponden a datos teóricos y como factor mínimo de seguridad recomendamos que al calcular un circuito aumenten el voltaje resultante del cálculo en 50% si es posible.

RECOMENDACIONES PARA EL CASO DE CONECCIONES EN "SERIE-PARALELO"

Cuando se hacen combinaciones SERIE-PARALELO, como ocurre en las Oficinas Salitreras, interesa conocer cuál es la combinación más favorable que hace que circule el amperaje máximo por los detonadores, asegurándose un mejor funcionamiento.

Se conoce el número total de detonadores, la resistencia de cada detonador, la resistencia del alambre tronador que une la fuente de energía (transformador) con el circuito de detonadores y el voltaje que se aplicará.

CONEXIÓN EN SERIE - PARALELO



Sean:	N	número total de detonadores
	n	número de detonadores en una serie
	m	número de series
	VF	voltaje de la fuente
	VD	voltaje en los extremos de cada serie
	VT	caída de voltaje en el alambre tronador, considerando su largo total
	r	resistencia de un detonador
	$n \times r$	resistencia de una serie de detonadores
	RT	resistencia total del alambre tronador
	RD	resistencia total del circuito de detonadores
	$N = m \times n$	es en la práctica un número entero, pero no siempre lo es el resultado del cálculo de m y n
	i	amperaje que circula por cada serie
	I	amperaje que pasa por el alambre tronador

Para simplificar el cálculo se considera la pérdida de voltaje que se produce en el alambre tronador; despreciándose la pérdida de voltaje entre los alambres que unen las series. Se supone también que todas las series se unen en el mismo punto del alambre tronador y que todas las series tienen el mismo número de detonadores.

CALCULOS:

Se tiene:

$$1) VD = VF - VT = VF - m \times i \times RT$$

$$2) VD = i \times n \times r$$

reemplazando:

$$i \times n \times r = VF - m \times i \times RT$$

$$VF = i \times n \times r + i \times m \times RT$$

de donde

$$i = \frac{VF}{\frac{N}{m} \times r + m \times RT}$$

para que "i" sea máximo, que es lo que interesa, la función del denominador "y" debe ser mínima, para lo cual su primera derivada debe igualarse a "0".

$$y = \frac{N}{m} \times r + m \times RT$$

$$y' = \frac{-N xr}{m^2} + RT = 0$$

De aquí se tiene para "i máximo":

$$(1) \quad RT = \frac{N xr}{m^2}$$

$$(2) \quad m = \sqrt{\frac{N xr}{RT}}$$

además (3) $n = \frac{N}{m}$

Como por otra parte $RD = \frac{nxr}{m}$

introduciendo (3) $RD = \frac{\frac{N xr}{m}}{m} = \frac{N xr}{m^2}$

y por lo tanto (4) $RD = RT$ para "i máximo".

El resultado indica que deben combinarse los detonadores de modo que la resistencia total combinada de todas las series-paralelas sean igual a la resistencia del alambre tronador, consiguiéndose con esto que por los detonadores pase el máximo de corriente, asegurando su mejor funcionamiento.

Este valor máximo de la corriente se puede calcular reemplazando en la fórmula general;

$$i = \frac{VF}{\frac{N xr + mxRT}{m}}$$

el valor de $m = \sqrt{\frac{N xr}{RT}}$

obteniéndose (5) i máximo = $\frac{VF \times \sqrt{\frac{Nxr}{RT}}}{2 N xr}$

EJEMPLOS

Supongamos una fuente "VF" de 200 volts. Cada detonador eléctrico con una resistencia "r" de 2 ohm; el alambre tronador con una resistencia total "RT" de 4 ohm y hagamos variar el número de series "m" de manera tal que siempre se utilice una cantidad total fija "N" de 600 detonadores.

Efectuando los cálculos con los datos anotados;

VF 200 volts
 N 600 detonadores eléctricos
 RT 4 ohm
 r 2 Ohm

y variando "m" de 1 a 600 series en paralelo (variando a su vez los detonadores por serie, de modo tal que el total se mantenga en 600 detonadores), se obtienen los siguientes valores para la intensidad de la corriente que circularía por cada una de las series, siendo en ese caso;

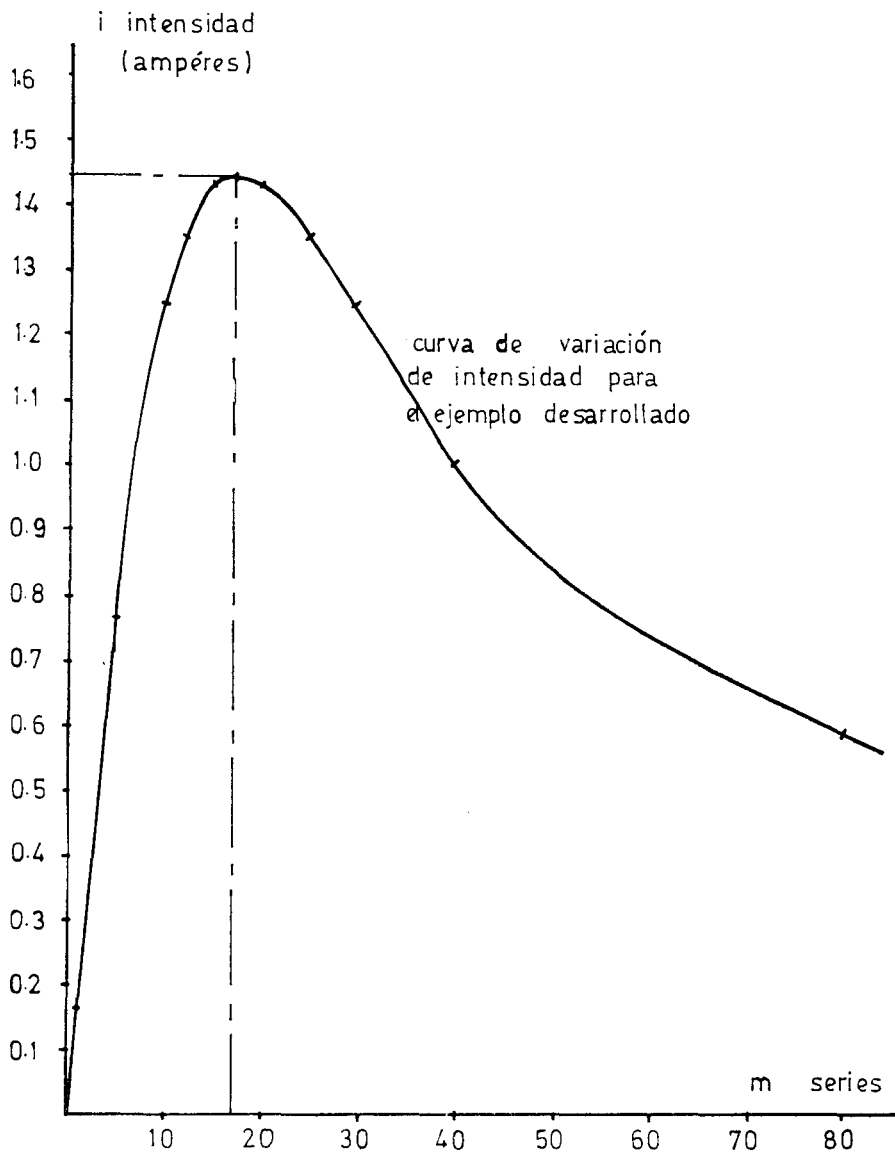
$$i = \frac{VF}{\frac{N \times r + m \times RT}{m}}$$

$$i = \frac{200}{\frac{600 \times 2 + m \times 4}{m}}$$

de donde
$$i = \frac{200 m}{1.200 + 4 x m^2}$$

Para "m" de 1 a 600 se tiene:

m	4 m ²	1.200 + 4 m ²	200 m	i	
1	4	1.204	200	0,1661	
5	100	1.300	1.000	0,7692	
10	400	1.600	2.000	1,2500	
12	576	1.776	2.400	1,3514	
15	900	2.100	3.000	1,4286	
17,3	1.197,16	2.397,16	3.460	1,4433	i máximo
20	1.600	2.800	4.000	1,4286	
25	2.500	3.700	5.000	1,3514	
30	3.600	4.800	6.000	1,2500	
40	6.400	7.600	8.000	1,0526	
80	25.600	26.800	16.000	0,5970	
160	102.400	103.600	32.000	0,3089	
320	409.600	410.800	64.000	0,1558	
600	1.440.000	1.441.200	120.000	0,0833	



Se ve en la tabla y en el gráfico que la intensidad máxima por serie es aquella en que se tienen 17,3 series con 34,68 detonadores cada una.

$$n = \frac{N}{m} = \frac{600}{17,3} = 34,68 \text{ detonadores c/u.}$$

Como no es posible hacer 17,3 series ni colocar 34,68 detonadores por

serie, se deben hacer aproximaciones de manera que se acerque lo más posible al valor, obtenido por los cálculos.

$$m = 17 \text{ series}$$

$$n = \frac{N}{m} = \frac{600}{17} = 35,29 \text{ detonadores por serie}$$

Se aproxima entonces "m" a 17 series, cada una de las cuales tiene 35 detonadores eléctricos, lo que da un total de $N = 595$ detonadores.

$$\text{para } i = \frac{VF}{\frac{N}{m} xr + mx RT} = \frac{200}{\frac{595 \times 2}{17} + 17 \times 4}$$

$i = 1,44$ amperes que circulan por cada una de las 17 series de 35 detonadores c/u.

Para llegar a los mismos valores a que se llega en el ejemplo anterior, en que se determina el número de series "m" que dan la intensidad máxima que circula por cada una de ellas, se pueden utilizar las fórmulas (2), (3) y (5) que nos dan para "i" máximo:

$$m = \sqrt{\frac{Nxr}{RT}} = \sqrt{\frac{600 \times 2}{4}} = 17,3 \text{ series}$$

$$n = \frac{N}{m} = \frac{600}{17,3} = 34,68 \text{ det./serie}$$

$$e \text{ i máximo} = \frac{VF \times \sqrt{\frac{Nxr}{RT}}}{2 N xr} = \frac{200 \times \sqrt{\frac{2 \times 600}{4}}}{2 \times 600 \times 2} = 1,4433 \text{ amperes}$$

Con estos últimos cálculos se llega a la conclusión de que se utilizarán 17 series de 35 detonadores c/u, con una fuente de 200 volts, una resistencia de alambre tronador de 4 ohm y que circulará una vez conectada la fuente una corriente de 1,44 amperes por serie.

RECOMENDACIONES GENERALES EN EL USO DE DETONADORES ELECTRICOS

1. Al desenrollar los alambres (chicotes) hágalo suavemente.
2. No tire los alambres mientras sujeta el detonador con una mano.
3. Desenrolle el alambre sujetándolo de la parte más próxima al detonador, tirándolo suavemente desde su otro extremo.

4. Prueba la continuidad de cada detonador con un ohmetro adecuado antes de cargar el tiro.

5. Mantenga los alambres con una tensión suave mientras carga y taco-nea el tiro. Con esto evitará la posibilidad de que el alambre se corte o que su aislación se rompa.

6. Use el tubito plástico que cortacircuita los alambres como un aislador al efectuar conexiones, tanto al formar series como al conectar a la línea de disparo.

7. Use una línea de disparo adecuada con alambre de cobre forrado, de no menos de 1,63 mm. de diámetro (AWG N° 14). Cuando sea necesario alargar la línea de disparo la unión debe hacerse con los extremos de los alambres completamente limpios y la junta aislada con huincha u otro material adecuado.

8. Mida la resistencia del circuito de los detonadores conectados en serie que debe ser aproximadamente igual a 2,5 multiplicado por el número de detonadores que forman la serie.

9. Antes de conectar la línea de disparo efectúe los siguientes controles en el frente de disparo:

- a) De aislación: en que se mide la resistencia entre cada uno de los alambres de la línea de disparo y tierra (que puede ser una cañería, un riel o un fierro enterrado o haciendo buen contacto con el piso, en una poza de agua etc.). Los dos alambres de la línea de disparo deben estar separados en el extremo correspondiente al lado del explosor. Con esta medida debe comprobarse la total aislación, ya que en caso contrario significa que hay pérdida a tierra por malas aislaciones, lo que debe corregirse repitiendo a continuación la medida. Si hay falla de aislación a tierra pueden producirse fallas de detonadores por no llegar toda la corriente a ellos pero, peor aún, explosiones prematuras y accidentes, por la entrada de corriente de fuga al circuito conteniendo los detonadores;
- b) De continuidad: en que se mide la resistencia entre los dos alambres de la línea de disparo, habiendo unido antes los dos extremos correspondientes al lado del explosor. El valor medido debe ser igual a la resistencia calculada para dicha línea. En caso de ser superior se debería haber empleado un alambre de un diámetro inferior al recomendado, una línea más larga que lo calculado, o lo más probable, a una línea compuesta de muchos trozos con uniones defectuosas. Se debe corregir el defecto y repetir las medidas a) y b).

10. Conectar la línea de disparo a los detonadores juntando previa y brevemente los extremos de ambos alambres para descargarlos. Los extremos correspondientes al lado del explosor se han mantenido unidos desde el momento de la medida (b) de continuidad.

11. Medir la resistencia total del circuito a los extremos de la línea de

disparo que posteriormente se conectarán a la fuente de energía (pila, batería, explosor o corriente de línea) la que deberá ser igual a la suma de la resistencia de la línea de disparo y la del circuito de los detonadores, ya medidos con anterioridad.

12. Conectar el explosor y disparar respetando todas las medidas de seguridad que correspondan.

13. Periódicamente (por lo menos una vez al mes) deben probarse los explosores ya sean estos magnéticos o de condensador, con un comprobador adecuado. En el caso de usar pilas o baterías, medir el voltaje, bajo una carga equivalente a la de trabajo.

14. Usar explosores de amperaje adecuado al número de detonadores cuya intensidad debe ser:

de 0,8 A cuando se usan 5 detonadores en serie

de 1,3 A cuando se usan 10 detonadores en serie

de 1,6 A cuando se usan 25 detonadores en serie

Según se indica en normas chilenas (INDITECNOR) N° 24-15 pág. 4

15. Las causas más comunes de falla de disparo son las siguientes:

- a) Conexiones mal hechas;
- b) Conexiones no aisladas que hacen tierra;
- c) Rotura de alambres (chicotes) al taconear;
- d) Rotura del circuito eléctrico dentro del detonador por maltrato;
- e) Línea de disparo cortada;
- f) Línea de disparo haciendo tierra;
- g) Explosor en mal estado electromecánico entregando insuficiente energía;
- h) Empleo de un explosor inadecuado;
- i) Circuito mal calculado;
- j) No circuló el amperaje adecuado por la serie de detonadores. Esto puede causar la falla de uno o varios detonadores de la serie. Se corrige la falla en los próximos disparos empleando un explosor de mayor voltaje, para que circule por los detonadores el amperaje necesario.
- k) Mal manejo del explosor:

- 1) Magnético: No usar suficiente fuerza al girar o bajar la manilla (mientras más fuerte más corriente). Se evita esto empleando explosores de cuerda.
- 2) De Condensador: No cargar el condensador adecuadamente, o demorar mucho el disparo después de la carga con lo que puede descargarse parcialmente.