



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE INICIACIÓN DE VOLADURAS PARA EL MOVIMIENTO DE TIERRAS

INFORME ESCRITO

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

PRESENTA:

NAHUN ISAAC CAMACHO GAZCA



AVAL DEL INFORME ESCRITO:

ING. MAURICIO MAZARI HIRIART

MÉXICO, D.F., 2013

DEDICATORIA

Agradezco profundamente a Dios nuestro creador por todas las bendiciones hacia mi persona.

A mi padre Cresenciano Camacho P. por todo su apoyo y amor incondicional y por enseñarme el camino hacia la rectitud.

A mi madre María Jovita Gazca R. por todos sus cuidados y por darme el amor que solo una madre puede dar.

A mi hermano Misael Joaquín Camacho G. que siempre me ha apoyado y que ha estado conmigo en los peores y en los mejores momentos.

A Martha Saddai Fuentes B. por todo su amor y por motivarme a seguir adelante y sobre todo por enseñarme a no bajar las manos.

A mi familia paterna y materna por todo su cariño y por siempre estar a mi lado.

A mis amigos -Olaf O, Jonathan C, Israel G, Iván T, Eduardo J, Andrés N, Gerardo T, Horacio L- por siempre estar presentes y por darme su valiosa amistad.

A todos ellos, muchas gracias por acompañarme de principio a fin en esta difícil pero muy reconfortante travesía por la Facultad de Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Mauricio Mazari por apoyarme en este último proceso dirigiendo mi trabajo.

Al M.I. José Santos, M.A. Gabriel Ramírez, Ing. Carl Servin y al Ing. Manuel Landa por sus aportaciones y comentarios al presente trabajo.

Al grupo de docentes que me formaron como Ingeniero.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por darme el privilegio de estudiar en sus aulas.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	5
II.	OBJETIVO.....	6
III.	CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES.....	7
IV.	DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE INICIACIÓN.....	11
	IV.1. SISTEMA DE INICIACIÓN NO ELÉCTRICA O PIROTÉCNICA.....	15
	IV.1.1. SISTEMA DE INICIACIÓN DE RETARDO SENCILLO.....	17
	IV.1.2. SISTEMA DE INICIACIÓN DE DOBLE RETARDO.....	24
V.	ANÁLISIS DE COSTO ENTRE EL SISTEMA DE INICIACIÓN DE RETARDO SENCILLO Y DE DOBLE RETARDO.....	34
VI.	CONCLUSIONES.....	43
	BIBLIOGRAFÍA.....	44

I. INTRODUCCIÓN

La presa de almacenamiento de agua es un proyecto hidroagrícola que pretende aprovechar los excedentes de agua provenientes del drenaje de la ciudad de México con la finalidad de abastecer las zonas de riego de los distritos 03 y 100 de Tula y Alfajayucan, respectivamente. Para la realización del proyecto se tiene que considerar el uso de explosivos para el movimiento de tierra. El manejo de explosivos conlleva una serie de parámetros que hay que considerar: vibración, ruido y roca en vuelo. Generalmente, la sociedad tiene un concepto de peligro cuando escucha la palabra “explosivos” y muchas veces culpan a estos por los daños que se presentan en sus inmuebles, por lo tanto, se deben de realizar voladuras que sean discretas y que las personas no puedan percibir los efectos negativos de las mismas como por ejemplo el ruido y la vibración. En el proyecto hidroagrícola la gente percibe el ruido y la vibración de las voladuras, estos parámetros se pueden atenuar con la selección de un sistema de iniciación adecuado. En el presente informe se realizará un análisis de costo-beneficio entre el sistema de iniciación de retardo sencillo utilizado en las voladuras que se hacen en la presa con los diferentes sistemas de iniciación que ofrecen los fabricantes de explosivos, con la finalidad de encontrar una solución ante la problemática citada anteriormente. Este análisis también va a ofrecer las bases para poder seleccionar un sistema de iniciación adecuado a las diferentes variables que se puedan presentar en algún otro proyecto en el que se vea involucrado el uso de explosivos para el movimiento de tierras.

II. OBJETIVO

Presentar un sistema de iniciación redituable para el movimiento de tierras en minería y construcción, mediante la comparación entre el sistema de iniciación de retardo sencillo y el sistema de iniciación de doble retardo con el fin de obtener una relación favorable entre costo-beneficio en el proceso de una voladura, en la que se puede considerar los siguientes aspectos: ciclo de cargado, mantener o perfeccionar el producto final de la voladura (rezaga) y facilitar los inventarios para poder llevar a cabo un mejor control del producto.

III. CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES

En la actualidad para poder mover mineral o roca en grandes volúmenes se utiliza explosivo alojado dentro de un conjunto de barrenos, los cuales se van a repartir dentro de una cuadrícula llamada plantilla de barrenación. Al conjunto de barrenos cargados con explosivos que integran una plantilla de barrenación se le conoce como “**voladura**”.

A continuación se describirán los parámetros que conforman una plantilla de barrenación:

Bordo: Se define como la distancia más corta al punto de alivio al momento que un barreno detona. El punto de alivio se considera cómo la cara original del banco o bien como una cara interna creada por una línea de barrenos que han sido disparados previamente con un retardo anterior. En otras palabras, el bordo es la distancia entre líneas.

Espaciamiento: El espaciamiento es la distancia que hay entre barrenos de una misma línea, esta distancia es paralela a la cara libre y perpendicular al bordo.

Altura de banco: Es la distancia vertical desde la parte más alta del banco al piso, o a la parte más alta del siguiente banco en un nivel inferior.

Sub-barrenación: Este término se utiliza para definir la profundidad a la cual se perforará el barreno por debajo del nivel de piso propuesto, con el fin de asegurar que el rompimiento ocurrirá a nivel propuesto.

Taco: Es la porción superior del barreno, la cual se rellena con material inerte con el fin de que la carga explosiva quede confinada para que trabaje adecuadamente y se aproveche al máximo la energía liberada, además el taco es necesario para controlar la sobrepresión y la roca en vuelo.

Existen diversas fórmulas que permiten realizar el cálculo de estos parámetros, éstas proporcionan valores razonables para condiciones de trabajo generales y por lo tanto, serán nuestra guía o nuestro primer paso para un diseño óptimo, el cual deberá ser modificado dependiendo de las necesidades del proyecto o por estructuras geológicas complejas.

La siguiente figura ilustra los conceptos descritos anteriormente.

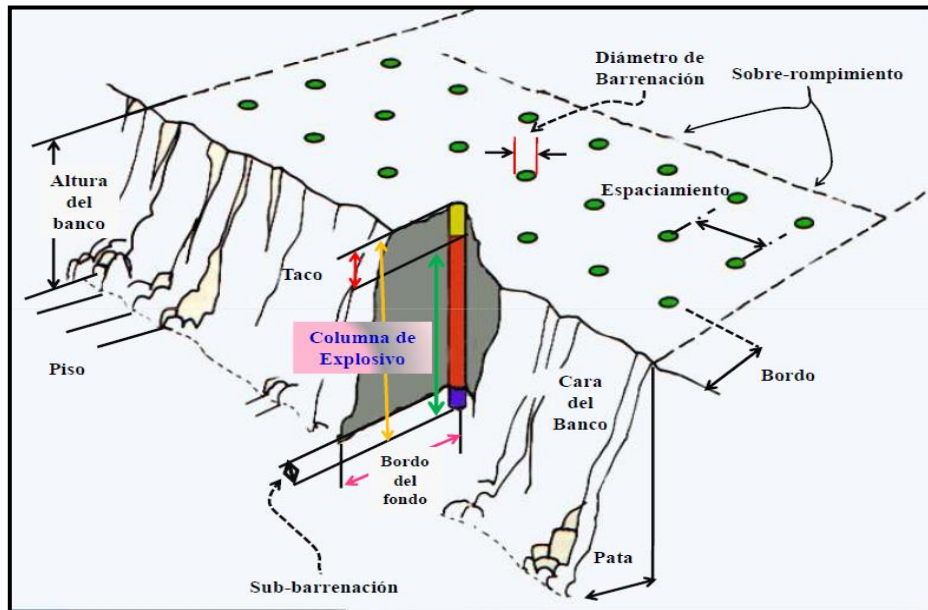


Figura 1. Parámetros de una plantilla de barrenación.

Los conceptos de carga que están ligados a una voladura son los siguientes:

Carga de Fondo: Está conformada por alto explosivo, generalmente va al fondo del barreno y cumple básicamente con dos funciones:

1. Iniciar la columna de Agente explosivo (ANFO).
2. Crear micro fracturas dentro del barreno para permitir la expansión de la energía de gas liberada en la detonación del ANFO.

Carga de columna: Corresponde a la columna formada por el Agente explosivo (ANFO) y se aloja entre la Carga de Fondo y el Taco. La energía de gas que libera el agente explosivo cuando detona es la causante del desplazamiento y fragmentación de la roca y/o mineral.

Columna explosiva: Es la cantidad de material explosivo utilizado en un barreno, en otras palabras es la suma de la carga de fondo con la carga de columna.

La siguiente figura ilustra los conceptos de carga de un barreno.

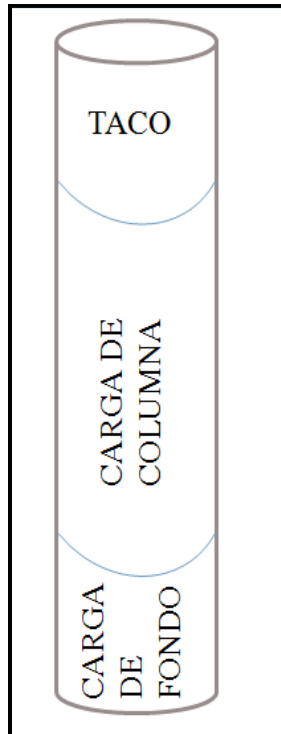


Figura 2. Esquema de la carga de un barreno.

Para cerrar este capítulo solo queda definir el concepto de iniciador y el de un sistema de iniciación. Los iniciadores juegan un papel muy importante dentro de una voladura, un **iniciador** es un dispositivo formado por un tubo de choque y un fulminante (detonador en forma de cápsula), este dispositivo cumple con los siguientes objetivos:

1. Iniciar la carga de fondo mediante el acoplamiento de un iniciador con un alto explosivo. A este dispositivo se le conoce como “cebo”.
2. Darle una secuencia de salida a la voladura con el fin de aprovechar la cara libre.
3. Atenuar los niveles de vibración que genera una voladura.
4. Mejorar la fragmentación del mineral y/o roca.
5. Disminuir notablemente la emisión de proyectiles rocosos conocidos como “roca en vuelo”.

Los iniciadores se van a clasificar dependiendo de su artificio de iniciación, es decir, dependiendo de la fuente de iniciación, quedando de la siguiente manera:

1. Iniciadores electrónicos.
2. Iniciadores eléctricos.
3. Iniciadores no eléctricos o pirotécnicos.
 - a) De retardo sencillo.
 - b) De doble retardo.

A la selección de un tipo de iniciador para la iniciación y cadenamiento de una voladura se le conoce como un **sistema de iniciación**. Como el sistema de iniciación depende del tipo de iniciador, entonces se tendrá la siguiente clasificación:

1. Sistema de iniciación electrónica.
2. Sistema de iniciación eléctrica.
3. Sistema de iniciación no eléctrica o pirotécnica.
 - a) Sistema de iniciación de retardo sencillo.
 - b) Sistema de iniciación de doble retardo.

IV. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE INICIACIÓN

Como parte de las innovaciones en materia de explosivos, se tiene la invención de los sistemas de iniciación cuyo principal objetivo es la transmisión de energía de barreno a barreno para dar inicio a la carga explosiva.

La selección de un sistema de iniciación es de vital importancia, ya que al darle un uso adecuado puede favorecer notablemente la fragmentación de la roca y a la vez controla efectos no deseados tales como vibración, rompimiento trasero y roca en vuelo.

De acuerdo a lo que se comentó en el capítulo anterior, los sistemas de iniciación se clasifican dependiendo del tipo de iniciador que se pretenda utilizar. Actualmente existen los siguientes:

1. **Sistema de iniciación electrónica.**
2. **Sistema de iniciación eléctrica.**
3. **Sistema de iniciación no eléctrica o pirotécnica:**
 - a) Sistema de iniciación de retardo sencillo.
 - b) Sistema de iniciación de doble retardo.

1. Sistema de iniciación electrónica.

Es el sistema de iniciación más novedoso que existe hoy en día, estos iniciadores incorporan un circuito que contiene un chip y capacitores (ver figura No. 3). A diferencia de los sistemas convencionales (sistemas pirotécnicos), su iniciación ya no se da con la mecha convencional, ésta es sustituida por un detonador que comúnmente se le conoce como “Blaster”, que además de detonar la voladura, se encarga de la verificación final antes de que la voladura sea iniciada, con el fin de dar la certeza de que todos los iniciadores están conectados y que tengan el tiempo asignado previamente. El proceso de programación y asignación de los tiempos de retardo se hace con un escáner diseñado únicamente para esta labor, el chip del iniciador es programable y permite proveer tiempos específicos, permitiendo el control preciso de la iniciación de una voladura junto con las siguientes ventajas:

- Incrementar niveles de seguridad y control.
- Realizar pruebas y diagnósticos antes de la detonación.
- Mejorar la fragmentación, gracias a que se puede seleccionar el tiempo entre barrenos y líneas.
- Facilitar los inventarios y control del producto.
- Proporcionar versatilidad en el manejo de tiempos, ya que cada chip contenido en el iniciador tiene un rango desde 1 hasta 10,000 [ms].

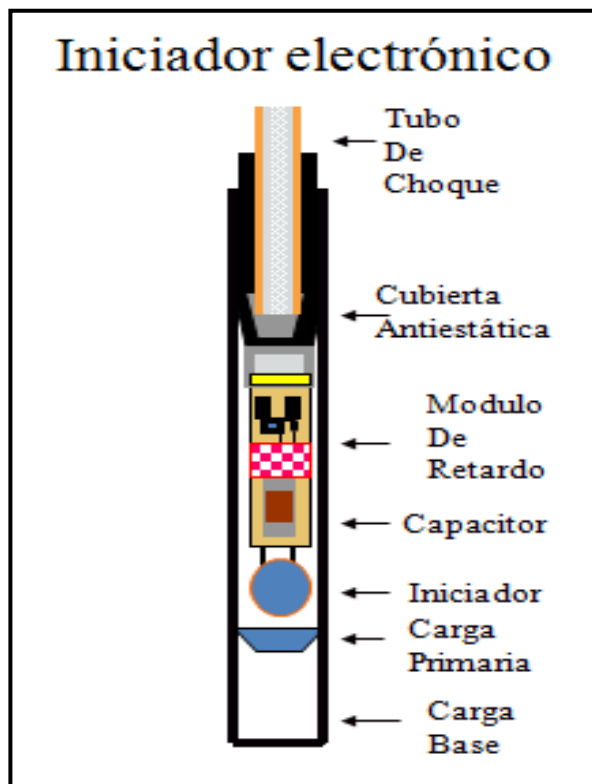


Figura 3. Esquema de un iniciador electrónico.

Para la programación de tiempos entre barrenos, se debe considerar la **velocidad de detonación y longitud de la columna explosiva**. Por ejemplo, si se tiene una mezcla explosiva con una velocidad de detonación de 5,100 [m/s] y una longitud de 7 [m], el tiempo en el que se consume la columna explosiva es de 1.37 [ms] ($7 / 5,100 = 0.00137 * 1,000 = 1.37$), este valor indica que no se puede escoger 1 [ms] entre barrenos porque antes de que se consuma la columna del primer barreno, ya estará iniciando la columna del segundo barreno y como consecuencia se tendrá una voladura violenta y con vibración. El cálculo del tiempo entre barrenos y líneas se abordará más adelante.

2. Sistema de iniciación eléctrica.

Los fulminantes eléctricos (estopines) están formados de un casquillo cilíndrico de aluminio o cobre que contiene una serie de cargas explosivas (la figura No. 4 ilustra el esquema de un iniciador eléctrico). La corriente eléctrica se suministra al iniciador por medio de dos alambres de conexión

que están conectados internamente a un alambre más pequeño de alta resistencia conocido como puente.

Es un sistema laborioso y de mucho cuidado, ya que se debe de realizar el cálculo de la resistencia de todos los circuitos y además se debe de emplear o bien el multímetro o el ohmímetro para verificar que los cálculos y las lecturas de prueba sean iguales.

También se deben de eliminar todos los peligros de naturaleza eléctrica tales como:

- Descargas de rayos a la tierra provenientes de tormentas eléctricas.
- Corrientes extrañas de tierra provenientes de equipos eléctricos mal aislados o con una conductividad a tierra deficiente.
- Energía de frecuencia de radio proveniente de radio-transmisores.
- Corrientes inducidas, presentes en campos electromagnéticos alternos, tales como aquellas que se encuentran comúnmente cerca de líneas de transmisión de alto voltaje.
- Electricidad estática generada por el polvo que traen el viento y las tormentas de nieve, por el movimiento de fajas transportadoras y por el transporte neumático de ANFO.
- Corrientes galvánicas generadas por metales que se tocan entre sí o que están separados por un material conductivo.

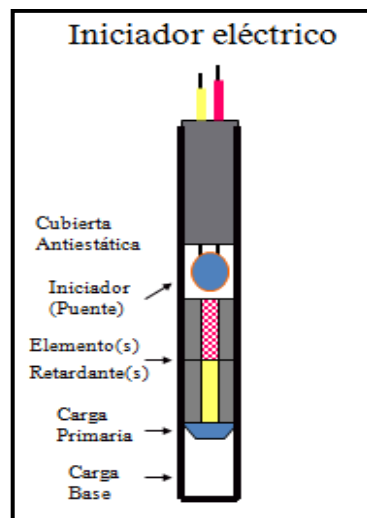


Figura 4. Esquema de un iniciador eléctrico.

En contraparte a lo que ofrece un sistema de iniciación electrónico en la versatilidad de poder escoger el tiempo de retardo, los tiempos que se manejan en el sistema eléctrico son en series nominales, es decir, sólo se podrá utilizar la serie que ofrece el fabricante, quitando la opción de poder manejar otro tiempo diferente.

El sistema de iniciación utilizado en las voladuras del proyecto hidroagrícola es el de iniciación no eléctrica o pirotécnica, particularmente el sistema de iniciación de retardo sencillo. La selección de este sistema se hizo con base en las siguientes premisas:

- El **costo** de los iniciadores electrónicos están por encima de todos los demás sistemas debido a sus características, pero su costo es mucho más elevado que el de los demás, éste oscila alrededor de los 20 dólares por iniciador, el costo por iniciador en los otros sistemas oscila entre los 3 y 6 dólares.
- Dado que en este proyecto sólo se necesita que la roca sea desplazada, no hay necesidad de cumplir con una **granulometría** tan fina como en otras operaciones, por lo tanto se puede ocupar un sistema de iniciación convencional, ya sea eléctrico o pirotécnico.
- Debido a la presencia de zonas urbanas cercanas a las zonas de voladuras, el control de la **vibración** se convierte en un factor a considerar, como ventaja se tiene que las voladuras no son de gran dimensión, es decir, el diámetro de barrenación es chico (3 in) y la longitud de barrenación es de 12 metros aproximadamente. Con estos parámetros se tiene la certeza de que los niveles de vibración podrán ser atenuados con las debidas consideraciones, éstas serán abordadas en los siguientes capítulos.

Tomando en cuenta estas premisas, se descarta el uso de los iniciadores electrónicos principalmente por su costo, y se descarta el uso de iniciadores eléctricos porque ya no se fabrican. Por lo tanto se enfocará en los iniciadores de doble retardo ya que se puede hacer una comparación más objetiva con los iniciadores de retardo sencillo.

De aquí en adelante se abordará solo de los sistemas de iniciación de doble retardo y de retardo sencillo, detallando cada sistema de iniciación para posteriormente realizar una comparación entre ambos sistemas.

IV.1. SISTEMA DE INICIACIÓN NO ELÉCTRICA O PIROTÉCNICA

Debido a los riesgos y dificultades que presentaba el manejo de iniciadores eléctricos, se tuvo que idear la forma de sustituir los alambres de cobre, resistencias y capacitores que en conjunto formaban lo que es un iniciador eléctrico.

Después de realizar varios intentos surgió el tubo de choque (ver figura No. 5), este sistema utiliza un fenómeno de explosión de polvo en un tubo de plástico prácticamente vacío, con el fin de transmitir una señal de iniciación.

El tubo de choque se compone de una o más capas de plástico, las cuales se diseñan para mejorar las propiedades físicas (resistencia a la tensión, flexibilidad y resistencia a la abrasión). En su interior, las paredes del tubo de choque contienen un compuesto llamado Surlyn que sirve para unir el revestimiento interior con otro compuesto formado por HMX y Aluminio, este último, es el explosivo que después de recibir energía en forma de impulso va a recorrer el tubo de choque para iniciar al fulminante.

El tubo de choque es poco sensible a la iniciación por el calor o impacto común, y requiere de un choque de gran intensidad para iniciarse. Las fuentes de iniciación más frecuentes se dan por medio de conexiones estrechas de cordón detonante o iniciadores con la potencia adecuada. El tubo de choque transmite la señal a una velocidad cercana a los 2,000 [m/s].

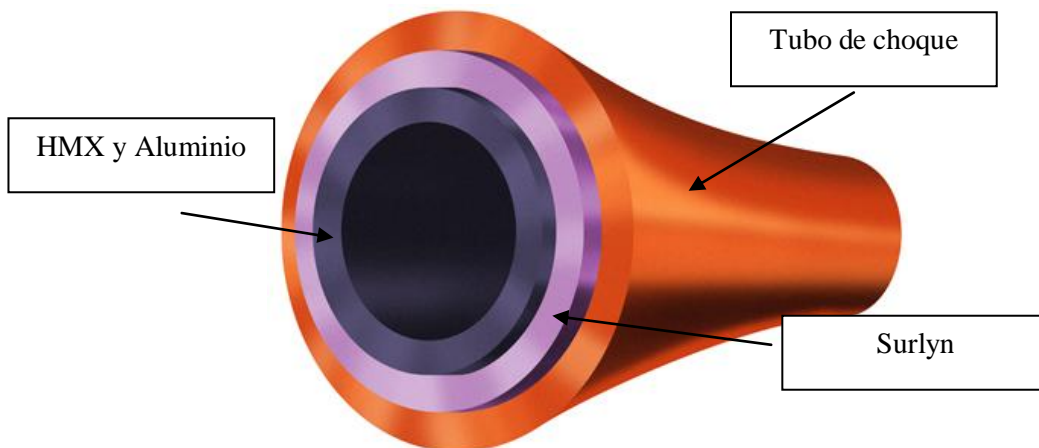


Figura 5. Esquema del tubo de choque.

Una vez transmitida la señal, el tubo de choque conduce el impulso hacia el fondo del barreno con el fin de activar el fulminante acoplado para que éste dé inicio en un determinado tiempo a la columna explosiva (conformada por la carga de fondo o cebo y la carga de columna).

El fulminante (ver figura No. 6), que es el que contiene el elemento retardante, está formado por una cápsula de aluminio y en su interior contiene pólvora que actúa como el elemento de retardo y que a su vez activa a la carga principal de PETN ubicada al fondo del iniciador.

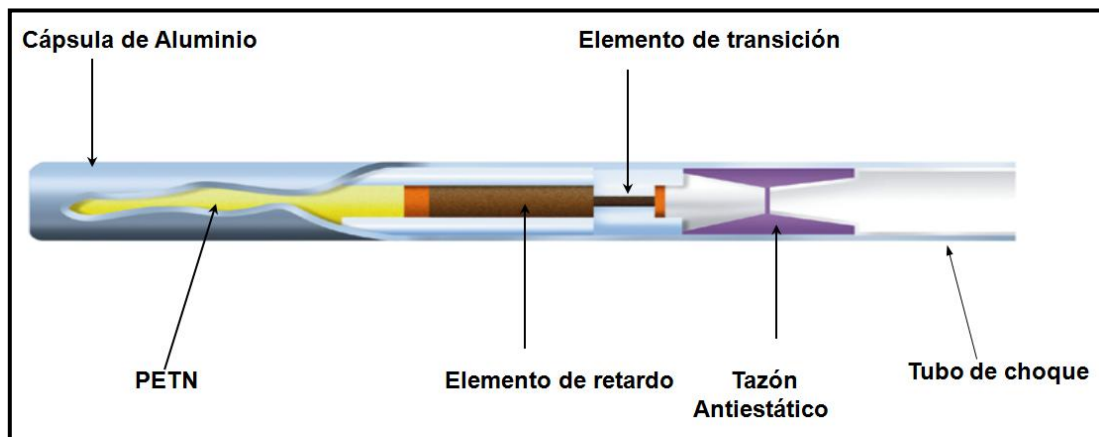


Figura 6. Fulminante ordinario.

El empleo de retardos en las voladuras ha probado desde hace mucho tiempo el mejoramiento en la fragmentación y desplazamiento de la roca además de brindar un mejor control de las vibraciones generadas por la voladura.

Hoy en día los proveedores de explosivos cuentan con una serie universal de iniciadores de retardo sencillo (comúnmente llamado **nonel**) y de iniciadores de doble retardo.

IV.1.1. SISTEMA DE INICIACIÓN DE RETARDO SENCILLO

Este sistema de iniciación pirotécnica es el más común, se aplica a voladuras subterráneas (voladuras de producción, contrapozos, túneles y/o galerías), voladuras a cielo abierto, canteras y en obras de ingeniería civil (carreteras, presas de almacenamiento, acueductos, etc.).

Para realizar un diseño con este sistema de iniciación se debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

- **Realizar el diseño previo al cargado.** Realizar el diseño antes del cargado permite ver cuántos iniciadores de cada número se va a ocupar, con el fin de llevar un buen control en el polvorín y de llevar un orden que permita eliminar errores en el diseño de la plantilla ya en el campo.
- **Supervisión en campo.** Es importante que el supervisor esté atento en la colocación del cebo antes del cargado, con el propósito de evitar algún error en el sembrado (colocación del cebo en los barrenos).
- **Cadenamiento o amarre.** Una vez terminado el proceso de cargado, se procederá al acoplamiento del cordón detonante (explosivo en forma de cordón flexible que contiene un núcleo central de PETN) con cada iniciador sembrado, con la finalidad de eliminar la presencia de barrenos quedados post-voladura.

Para realizar el diseño de una plantilla se debe considerar las series que ofrecen los fabricantes de explosivos. Estas series constan de 15 tiempos de retardo y cabe mencionar que todos los distribuidores de explosivos manejan la misma serie, solo cambia la presentación y el nombre comercial. Las tablas 1 y 2 muestran la distribución de la serie de retardos y sus conectores:

Tabla 1. Serie de iniciadores.

Serie de iniciadores de retardo sencillo	
Número	Tiempo [ms]
1	25
2	50
3	75
4	100
5	125
6	150
7	175
8	200
9	250
10	300
11	350
12	400
13	450
14	500
15	600

Tabla 2. Serie de conectores.

Serie de conectores de superficie	
Número	Tiempo [ms]
1	17
2	25
3	35
4	42
5	65

Ejemplo para el diseño de tiempos de una plantilla:

Nota: Debido al contenido del presente documento sólo se enfocará el diseño de tiempos de la plantilla y no se abordarán cálculos de parámetros geométricos de una plantilla (bordo, espaciamiento, longitud de barrenación y de banco) y de carga (carga de columna, carga de fondo y factor de carga).

No obstante, la conjunción de dichos parámetros (geométricos, de carga y diseño de tiempos) conllevará al éxito de una voladura, sin embargo, existirán factores geológicos y estructurales que obligarán a realizar ajustes a los diseños.

Para ilustrar el uso del sistema de iniciación de retardo sencillo se tomará como ejemplo una voladura con una plantilla de 2.5 x 2.7 [m], que corresponde al bordo por el espaciamiento, respectivamente, con una longitud de barrenación de 12 [m] y un diámetro de 3 [in].

Se considerará la cantidad de 30 barrenos distribuidos en 4 líneas, el acomodo geométrico de los barrenos sería a tresbolillo (plantilla salteada) y la roca correspondería a una caliza (ver figura No. 7).

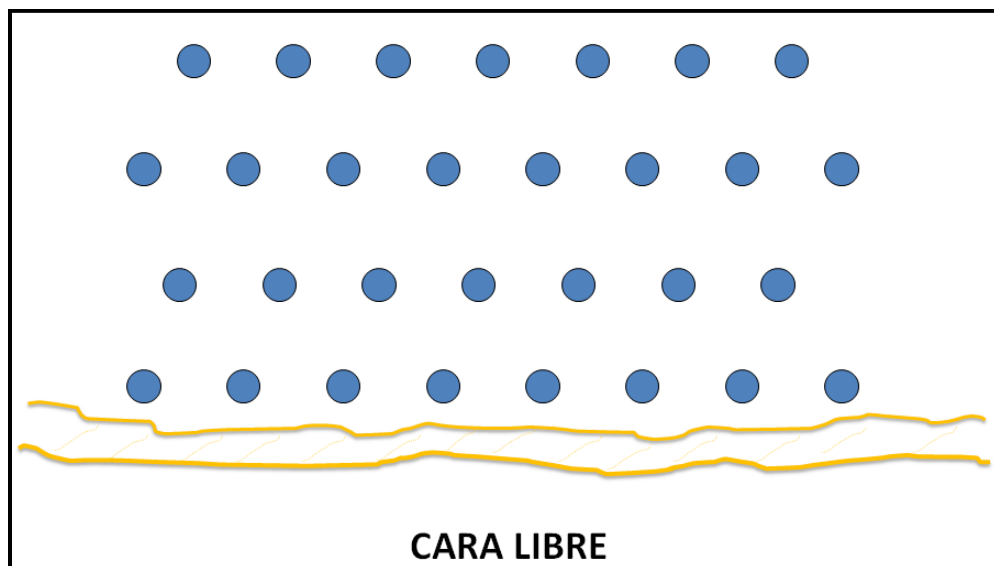


Figura 7. Plantilla de 2.5 x 2.7 [m]. Sin escala.

Para realizar el cálculo del tiempo entre barrenos y entre líneas se consideraran las fórmulas descritas en el libro de “Diseño de voladuras” (Konya, 1998: 95-96).

El Dr. Calvin formuló los siguientes algoritmos:

➤ **Retardos de barreno a barreno**

$$t_H = T_H \times S \dots \dots \dots (1)$$

donde:

t_H = Retardo barreno a barreno, [ms].

T_H = Constante de retardo barreno a barreno, [ms/m].

S = Espaciamiento, [m].

➤ **Retardos entre líneas**

$$t_R = T_R \times B \dots \dots \dots (2)$$

donde:

t_R = Retardo entre líneas, [ms].

T_R = Factor de tiempo entre líneas, [ms/m].

B = Bordo, [m].

Tabla 3. Valores para la constante T_H

Constante T_H	
Tipo de roca	T_H [ms/m]
Arenas, margas y carbón	6.5
Algunas calizas y esquistos	5.5
Calizas compactas, basaltos y gneiss	4.5
Feldespatos porfíricos y micas	3.5

Tabla 4. Valores para la constante T_R

Constante T_R	
Resultado	T_R [ms/m]
Violencia, sobrepresión y fracturamiento excesivos	6.5
Pila de material alta y cercana a la cara	8.0
Altura de pila, sobrepresión y fracturamiento promedio	11.5
Pila de material dispersa con rompimiento trasero mínimo	16.5

Aplicando en nuestro ejemplo las ecuaciones (1) y (2) y teniendo en consideración una T_H de 5.5 y una T_R de 16.5, se llega a los siguientes resultados:

- Retardo entre barrenos (t_H) = 14.85 [ms]
- Retardo entre líneas (t_R) = 41.25 [ms]

Los resultados muestran valores imposibles de implementar en el campo debido a las limitaciones de las series de tiempos de los iniciadores de retardo sencillo que ofrecen los fabricantes. Estos resultados se ajustan perfectamente cuando se usan iniciadores electrónicos, ya que este tipo de iniciador se le puede programar cualquier tiempo dentro del rango de 1 [ms] a 10,000 [ms].

La tabla 1 describe la **única** serie de tiempos que ofrece el sistema de iniciación de retardo sencillo y por lo tanto, en el diseño se considerarán tiempos entre barrenos de 25, 50 y 100 [ms], que son los tiempos nominales y descritos en la tabla 1. En el caso del tiempo entre líneas el resultado teórico fue de 41.25 [ms], se observa que en la figura 2 el conector número 4 tiene 42 [ms], este valor nominal se acerca al valor teórico y por lo tanto podrá ser usado como retardo entre líneas.

Tomando estas consideraciones, el diseño quedará de la siguiente manera:

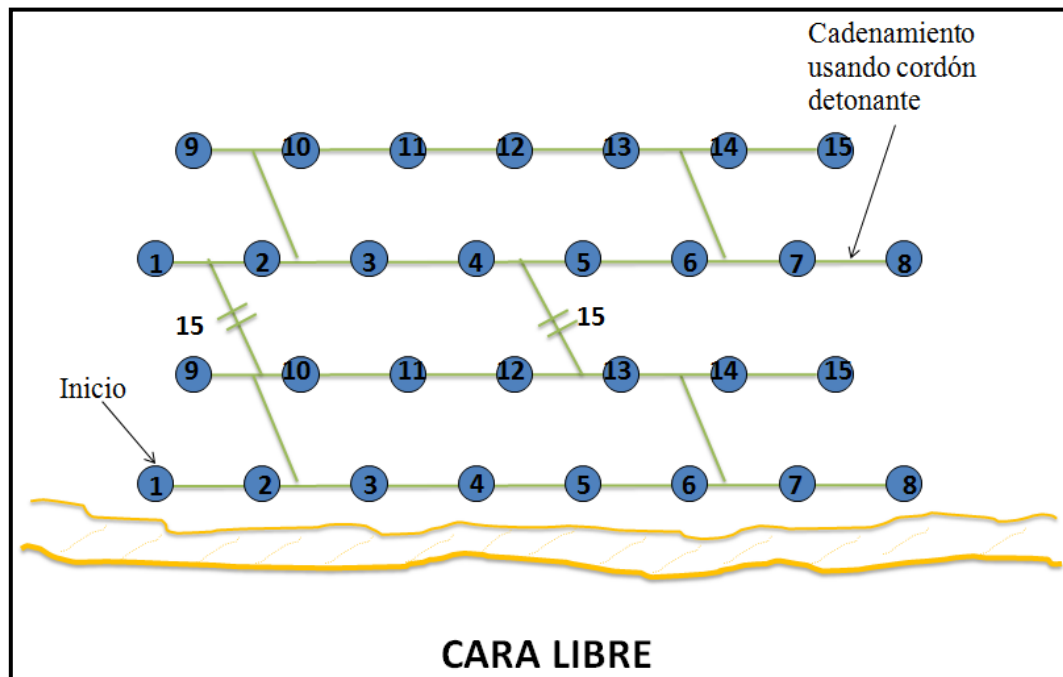


Figura 8. Diseño de plantilla con salida por líneas.

La figura 8 muestra la posición de cada iniciador en su respectivo barreno, se puede observar que por dos líneas se ocupó una serie completa (15 barrenos por cada dos líneas, la serie consta de 15 tiempos). En el caso de los retardos por línea, para transmitir la energía de la primera línea a la segunda línea solo es necesario amarrar cordón detonante entre ambas líneas con el fin de que haya continuidad de la energía de la primera línea hacia la segunda, y dado que la serie es continua (es decir, va del 1 al 8 y del 9 al 15, sin traslaparse), no hay necesidad de colocar un conector u otro iniciador. En el caso de la segunda línea hacia la tercera, se observa en la figura 8 que la serie finaliza en la segunda línea y como consecuencia, en la tercera se tendrá que volver a empezar con el tiempo número 1, si se aplica el mismo procedimiento utilizado en las primeras dos líneas, se tendrá que en la línea 1 y la línea 3 saldrían prácticamente al mismo tiempo, ya que al no haber un retardo que las separe, el cordón detonante activaría ambas líneas (la velocidad de detonación del cordón detonante es de 7,000 [m/s]), en las líneas 3 y 4 aplica lo mismo que en la 1 y 2. El esquema de tiempos en milisegundos quedaría de la siguiente manera:

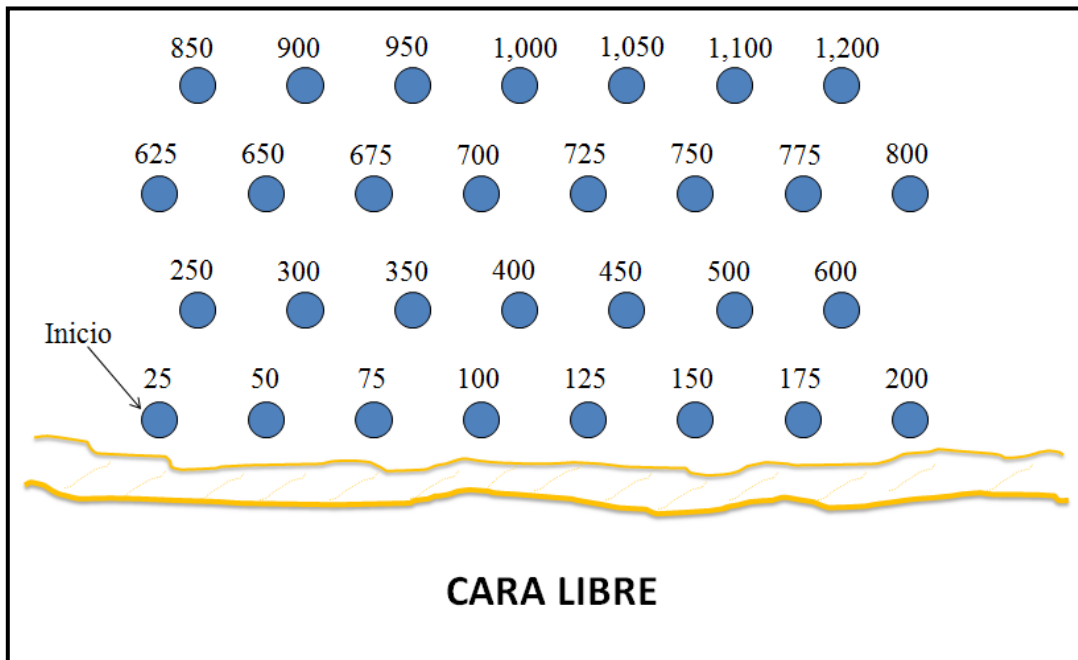


Figura 9. Esquema de tiempos en milisegundos.

El esquema de tiempos de la figura No.9 muestra el tiempo en el que detona cada barreno, en la primera y segunda línea el tiempo es el mismo que en el de la serie (serie del 1 al 15, esta se describe en la tabla 1), en la tercera y cuarta línea el tiempo cambia debido al retardo que se pone (el retardo en este caso es el número 15), en este caso el último barreno de la segunda línea (barreno con el iniciador número 15 y con un tiempo de 600 [ms]) va a detonar junto con el retardo debido a que tienen el mismo tiempo, entonces, el primer barreno de la tercer línea detonará 25 [ms] después de que detone el retardo, y por esta razón detona a los 625 [ms], los barrenos que le siguen detonan con la misma secuencia de la serie, finalizando, se observa que en la primera y tercera línea el tiempo entre barrenos es de 25 [ms], en la segunda y cuarta línea el tiempo entre barrenos es de 50 [ms] y en los últimos dos barrenos de la segunda y cuarta línea el tiempo es de 100 [ms].

El uso de iniciadores de retardo sencillo trae consigo una dispersión de tiempo entre barrenos, pudiendo dar como resultado una diferencia en la granulometría por líneas. En el ejemplo, hay mayor interacción entre barrenos de la primera y tercera línea debido al tiempo utilizado, es decir, en la primera y segunda línea el tiempo entre barrenos es de 25 [ms], mientras que en la tercera y cuarta es del doble.

IV.1.2. SISTEMA DE INICIACIÓN DE DOBLE RETARDO.

La iniciación de doble retardo es el sistema de iniciación no eléctrica más novedoso en el mercado actual.

Este sistema combina la iniciación no eléctrica tanto al interior del barreno como a la superficie, eliminando el uso del cordón detonante como línea troncal.

Los iniciadores de doble retardo tienen un iniciador estándar que se utiliza como cebo al fondo del barreno y otro iniciador de baja potencia que se encuentra en el otro extremo (en la superficie). Este iniciador de baja potencia se aloja en un bloque de plástico que tiene como finalidad el acoplamiento del iniciador con el tubo de choque del siguiente barreno, dicho iniciador de baja potencia va a substituir la función del cordón detonante, que es la transmisión de energía para iniciar los barrenos de la plantilla (ver figura No. 10 y 11).

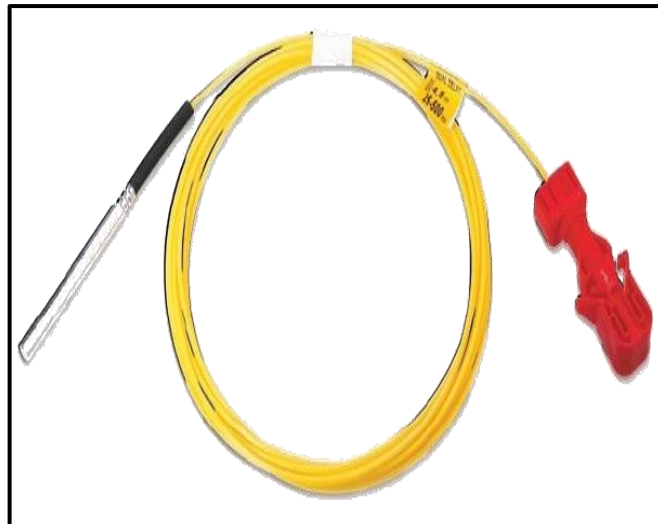


Figura 10. Iniciador de doble retardo.

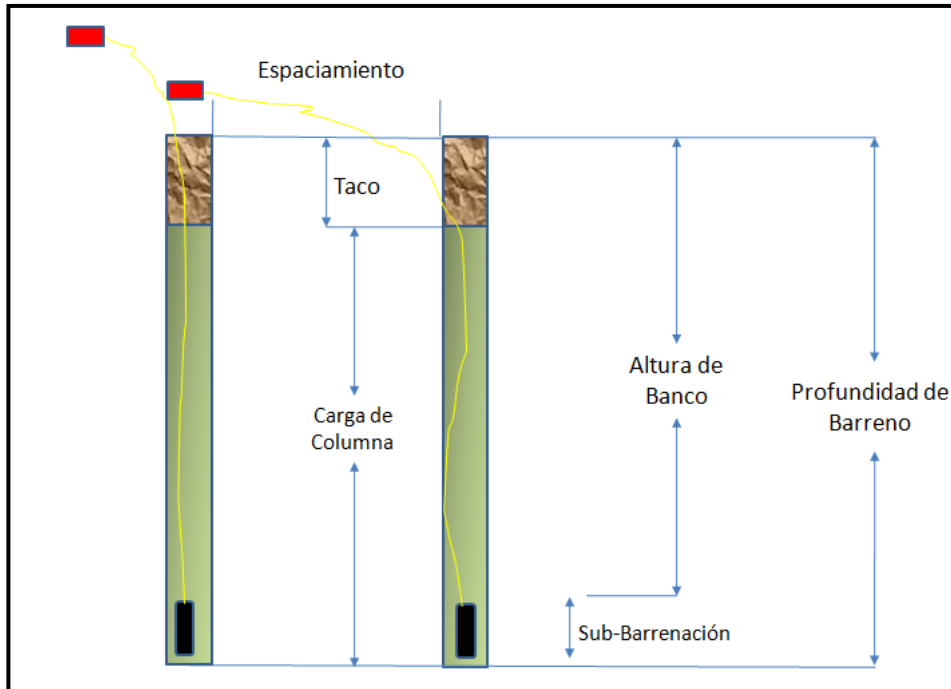


Figura 11. Esquema de la conexión de un barreno a otro.

Para realizar un diseño con este sistema se debe considerar lo siguiente:

- **Diseño previo al cargado:** De igual manera que en el sistema de retardo sencillo, realizar el diseño precedente al cargado va a permitir llevar un control del material que se va a ocupar, solo que en este caso se contará con una sola unidad, y no con la serie de 15 tiempos como en el otro sistema.
- **Supervisión en campo:** Dado que sólo se maneja una unidad, el problema de equivocarse al poner un cebo en donde no corresponde se anula, únicamente hay que poner atención en el acoplamiento de los iniciadores de superficie por dos razones: la primera se debe a que la iniciación se va a dar en la dirección de la articulación entre barrenos.

La segunda y principal razón por la cual se debe poner énfasis al acoplamiento, es por la interrupción de la transmisión de energía entre barrenos al no acoplar algún iniciador de superficie con el barreno subsecuente, lo que trae consigo “barrenos quedados” en la voladura.

Las siguientes tablas proporcionan los tiempos de retardo que manejan los fabricantes de explosivos:

Tabla 5. Iniciadores de doble retardo.

retardo de superficie/retardo de fondo
Tiempo [ms]
17/350
17/375
17/700
25/350
25/375
25/700
42/350

Tabla 6. Conectores para iniciadores de doble retardo.

Conectores
Tiempo [ms]
17
25
35
42
100

Ejemplo para el diseño de tiempos utilizando el sistema de iniciación de doble retardo:

Se utilizarán los parámetros del ejemplo anterior:

- Bordo: 2.5 [m].
- Espaciamiento: 2.7 [m].
- Longitud de barrenación: 12 [m].
- Diámetro de barrenación: 3 [in].
- No. Barrenos: 30.
- No. Líneas: 4, a tresbolillo.
- Tipo de roca: Caliza.

Debido a que se utilizan los mismos parámetros del ejemplo anterior, el cálculo para el tiempo entre retardos y líneas también será el mismo. Entonces se tiene lo siguiente:

- Retardo entre barrenos (t_H) = 14.85 [ms]
- Retardo entre líneas (t_R) = 41.25 [ms]

Para la selección del iniciador, este sistema ofrece dos opciones más que el otro sistema ya que cuenta con tiempos de 17, 25 y 42 [ms] entre barrenos (ver tabla No. 5), se selecciona el iniciador de 17/350 [ms] debido a que este se acerca al valor teórico, el conector será de 42 [ms] basándose en el valor teórico de 41.25 [ms]. El diseño quedará de la siguiente manera:

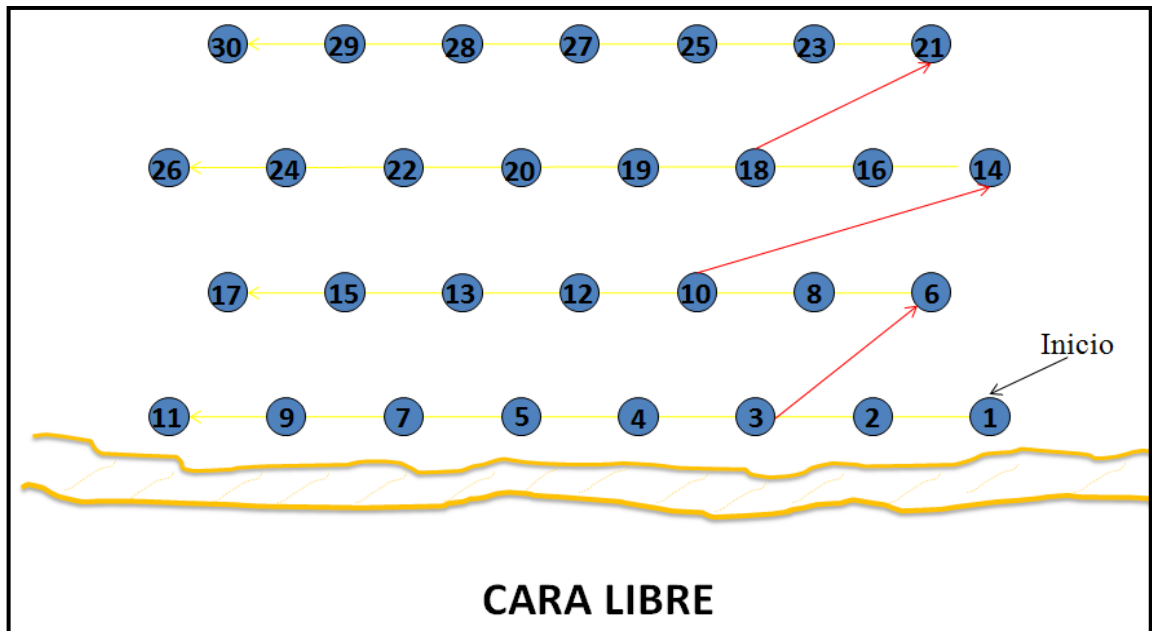


Figura 12. Diseño de plantilla con salida en diagonales.
(Las flechas rojas representan los conectores de 42 [ms])

La figura No. 12 muestra un diseño típico con una salida en diagonal, nótese que se elimina por completo el uso del cordón detonante y en vez de este, se utilizan los conectores para transmitir la energía de una línea a otra. El número que tiene cada barreno indica el orden en el que van a detonar.

El esquema de tiempos en milisegundos de la Figura No. 13 mostrará el orden en el que va a detonar cada barreno pero ahora en milisegundos, la detonación inicia a los 350 [ms] debido al retardo de fondo:

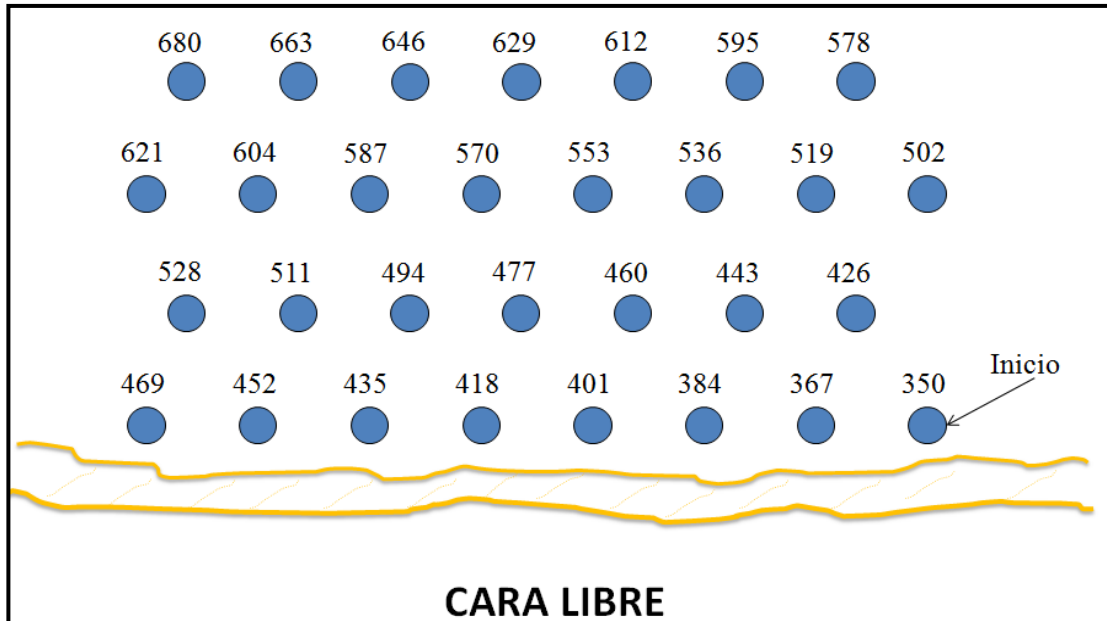


Figura 13. Esquema de tiempos en milisegundos.

Se observa en el esquema de la figura 13 que en todas las líneas se maneja un tiempo entre barrenos de 17 [ms], lo que indica que hay una distribución de energía homogénea en todas las líneas, eliminando la dispersión de tiempos que se tenía en la serie de iniciadores de retardo sencillo. Los 17 [ms] se acercan más al valor teórico (14.85 [ms]) que 25 [ms] (tiempo nominal de la serie de retardo sencillo) lo que indica una mejor interacción entre barrenos, convirtiéndose en un factor importante para mejorar el proceso de fragmentación de la roca (por la disminución del tiempo entre barrenos).

Para la selección del iniciador, se puede tomar en cuenta lo siguiente:

1. El tiempo entre barrenos lo va a dar el iniciador de superficie, en la tabla número 5 se tienen tiempos de retardo de superficie de 17, 25 y 42 [ms] con sus respectivos tiempos de retardo de fondo. Estos iniciadores ofrecen dos opciones más de tiempo entre barrenos que el sistema convencional (sistema de retardo sencillo). En este caso, se eligió el iniciador de 17/350 debido a que el retardo de 17 [ms] se acercaba más al valor teórico $t_H = 14.85$ [ms]. Es recomendable realizar el cálculo de estos parámetros (retardo entre barrenos y líneas) para poder seleccionar el iniciador adecuado y así poder llegar a un resultado más favorable.
2. Con respecto a la selección del retardo de fondo, se cuenta con tiempos de 350, 375 y 700 [ms] y solo quedaría aplicar el siguiente criterio: si se cuenta con voladuras de barrenos cortos (menores a 3 metros) es muy probable que sean violentas (con roca en vuelo), ya que estos bancos se vuelven más rígidos. Al tener latente el factor de roca en vuelo hay posibilidad de que se pueda cortar la voladura por una roca, entonces aquí es donde entra el criterio para seleccionar el retardo de fondo, se puede seleccionar relacionando el retardo de fondo entre el retardo de superficie:

$$\begin{aligned}350/17 &= 20.5 \\375/17 &= 22.05 \\700/17 &= 41.17\end{aligned}$$

Aplicando esto a nuestro ejemplo se puede ver que después de que detonen 20 retardos de superficie empezará a detonar el primer barreno, reduciendo la posibilidad de que alguna roca procedente de la primera línea pueda cortar un iniciador de las líneas subsecuentes.

Con respecto a la atenuación de los niveles de vibración se tiene lo siguiente:

La vibración que genera una voladura se cuantifica por medio de la velocidad de partícula, esta se puede estimar con la siguiente expresión (Konya, 1998: 215):

$$V = 160\left(\frac{R}{\sqrt{W}}\right)^{-1.6}$$

Donde:

V: Velocidad de partícula, [in/s]

R: Distancia de la voladura al punto de interés, [ft]

W: Peso de la carga explosiva detonada por tiempo, [lb]

Se observa que la atenuación de los niveles de vibración entra en función directa con la distancia y el peso de la carga explosiva detonada por tiempo.

La siguiente figura muestra criterios de daño en función de la velocidad de partícula (Konya, 1998: 224-227):

CRITERIO SEGUN EL BUREAU OF MINES DE ESTADOS UNIDOS:	
VELOCIDAD DE PARTICULA [in/s]	NATURALEZA DEL DAÑO
12	SE CAE ROCA EN TUNELES SIN REVESTIMIENTO.
7.6	50% PROBABILIDAD DE DAÑO MAYOR EN EL ENYESADO.
5.4	50% PROBABILIDAD DE DAÑO MENOR EN EL ENYESADO.
2.8 - 3.3	UMBRAL DE DAÑO POR VOLADURAS CERCANAS.
2.0	CRITERIO DE SEGURIDAD DE VOLADURAS PARA ESTRUCTURAS RESIDENCIALES . RECOMENDADO POR EL BUREAU OF MINES DE ESTADOS UNIDOS.

Figura 14. Criterios de daño según el Bureau of mines de Estados Unidos.

En muchas ocasiones la distancia la dicta el cuerpo mineral o la obra que se pretenda realizar, es difícil poder alterar esta variable,

en contraparte, la carga detonada se puede controlar y se puede proceder de la siguiente manera:

- **Reducir el número de barrenos detonados por tiempo**, por ejemplo, adelantándose al ejemplo de la plantilla del día 15 de Diciembre (figura No. 16) se tiene que detonan hasta 4 barrenos en un mismo tiempo (168.8 [kg]), aplicando la ecuación de predicción de la velocidad de partícula y tomando en cuenta la tabla de la figura 14 se tiene que con 168.8 [kg] a una distancia de 90 metros se tiene una velocidad de partícula de 2.03 [in/s], lo que indica que dentro de un radio de 90 [m] se corre el riesgo de generar algún tipo de daño por la voladura. Si se detonará un solo barreno por tiempo, detonarían 42.15 [kg], y aplicando nuevamente la ecuación de predicción se tendría que en un radio de 45.4 [m] se tendría una velocidad de partícula de 2 [in/s], teniendo un radio de afectación mucho más reducido (cerca del doble).
- Si a pesar de reducir la cantidad de explosivo detonando un solo barreno por tiempo no se tienen los resultados deseados, se optará por utilizar una técnica llamada **doble carga**, que consiste en dividir la carga de un barreno en dos, colocando un taco intermedio.

El procedimiento para separar la carga de un barreno consiste en utilizar un cebo al fondo del barreno con un tiempo 1 (por ejemplo), verter ANFO hasta llegar prácticamente a la mitad del barreno para después colocar un taco intermedio y sobre este, poner otro cebo con un tiempo 2 para posteriormente verter ANFO y finalmente tapar el barreno con el taco final (ver figura No. 15).

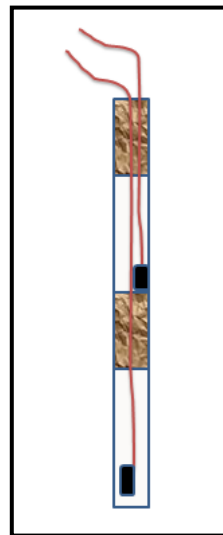


Figura 15. Esquema de un barreno de doble carga.

Estas dos técnicas son una buena opción para atenuar los niveles de vibración y son las más factibles de realizar para no sacrificar la longitud de barrenación y el diámetro de barrenación.

Análisis comparativo:

El diseño de tiempos y la salida que se le vaya a dar a la plantilla (por líneas, en diagonal, en “V”, etc.), va a depender de las condiciones en las que se presente cada voladura, por ejemplo: zonas habitacionales, construcciones civiles, aperturas de banco, presencia de barrenos cortos, etc. Además de estas condiciones se debe tomar en cuenta los parámetros geológicos y estructurales que presenta la roca.

En este capítulo se mostró las características de los sistemas de iniciación de retardo sencillo y de doble retardo, en donde claramente se puede ver que el sistema de iniciación de doble retardo ofrece más ventajas debido a que:

- Cuenta con dos opciones más de tiempo que los iniciadores de retardo sencillo, lo que permite acercarse más a los valores teóricos recomendados.
- Se elimina la posibilidad de tener errores en la colocación de los iniciadores en cada barreno, ya que se distribuyen por pieza y no por serie.
- Si se llegara a presentar un imprevisto y se tuviera que cambiar el sentido de salida de la voladura, con este sistema solo es cuestión de desacoplar cada barreno para volverlos a ensamblar en la dirección correcta.
- Al no utilizar cordón detonante para encadenar la plantilla, se reducen los niveles de ruido haciendo una voladura más discreta ante el oído humano.
- Se obtiene una distribución homogénea de energía en toda la plantilla debido a que no existe dispersión de tiempo entre barrenos.
- Se tiene un mejor control del producto en los polvorines debido a que se manejan por piezas de un determinado tiempo.
- Se reducen los tiempos de cargado ya se elimina la necesidad de poner cada tiempo en un determinado barreno.

En el próximo capítulo se desarrollará un análisis de costo entre ambos sistemas y éste complementará la parte técnica con el fin de determinar si el sistema de iniciación de doble retardo es un sistema redituable.

V. ANÁLISIS DE COSTO ENTRE EL SISTEMA DE INICIACIÓN DE RETARDO SENCILLO Y DE DOBLE RETARDO.

El análisis que a continuación se presenta es un ejemplo aplicado al movimiento de tierras. La información que se generó en dicho proyecto se utilizó con la finalidad de realizar una comparación entre ambos sistemas y así determinar en qué casos es factible o no el cambio del sistema de iniciación. Para poder comparar el costo entre ambos sistemas se tuvo que realizar una simulación en donde se substituyó el sistema de iniciación utilizado (sistema de iniciación de retardo sencillo) por el sistema de iniciación de doble retardo.

El análisis comienza tomando en cuenta el consumo promedio de los balances mensuales correspondientes al mes de Diciembre de 2010, Enero y Febrero de 2011. La siguiente tabla muestra los precios utilizados en el presente análisis.

PRODUCTO	PRECIO (SIN IVA)	UNIDAD
	PRECIO EN DOLARES	
FULMINANTE NO. 6	\$ 0.23	PIEZA
MECHA	\$ 12.772	CARRETE DE 50 M
CORDON DET. 5PE	\$ 206.65	ROLLO CON 700 M
CONECTORES MS	\$ 4.24	PIEZA
INICIADORES MS 30'	\$ 3.50	PIEZA
INICIADORES MS 40'	\$ 3.92	PIEZA
INICIADORES MS 50'	\$ 4.69	PIEZA
INI. DOBLE RET. 60'	\$ 6.58	PIEZA
CONECTOR Q. R. 50'	\$ 4.76	PIEZA
ANFO	\$ 26.54	SACO DE 25 KG
HIDROGEL	\$ 51.19	CAJA DE 25 KG

Tabla 7. Lista de precios.

Nota: la vigencia de la lista de precios utilizada en este documento, fue autorizada a partir del 8 de Noviembre de 2010.

➤ DICIEMBRE DE 2010:

Sistema de Iniciación de retardo sencillo		
Producto	Consumo	Precio
Alto explosivo	440.00 kg	921.42 USD
Agente explosivo	3,471.43 kg	3,689.06 USD
Conductor (mecha)	2.00 m	0.51 USD
Cordón detonante	736.00 m	217.28 USD
Fulminantes	1 pieza	0.23 USD
Conector ms	29 piezas	122.96 USD
Iniciador ms 50'	2 piezas	9.38 USD
Iniciador ms 40'	56 piezas	219.52 USD
Iniciador ms 30'	31 piezas	108.50 USD
	Costo total:	5,288.86 USD

Tabla 8. Costo del consumo promedio del mes de Diciembre de 2010 utilizando iniciadores de retardo sencillo.

Sistema de iniciación de doble retardo		
Producto	Consumo	Precio
Alto explosivo	440.00 kg	921.42 USD
Agente explosivo	3,471.43 kg	3,689.06 USD
Conductor (mecha)	2.00 m	0.51 USD
Cordón detonante	5.00 m	1.47 USD
Fulminantes	1 pieza	0.23 USD
Conector 50'	3 piezas	14.28 USD
Iniciador de doble retardo 60'	89 piezas	585.62 USD
	Costo total:	5,212.59 USD

Tabla 9. Simulación del costo del consumo promedio del mes de Diciembre de 2010 utilizando iniciadores de doble retardo.

➤ ENERO DE 2011:

Sistema de Iniciación de retardo sencillo		
Producto	Consumo	Precio
Alto explosivo	500.00 kg	1,023.80 USD
Agente explosivo	3, 645.00 kg	3,874.84 USD
Conductor (mecha)	2.00 m	0.51 USD
Cordón detonante	540.00 m	159.42 USD
Fulminantes	1 pieza	0.23 USD
Conector ms	31 piezas	131.44 USD
Iniciador ms 50'	7 piezas	32.83 USD
Iniciador ms 40'	82 piezas	321.44 USD
Iniciador ms 30'	15 piezas	52.50 USD
	Costo total:	5,597.01 USD

Tabla 10. Costo del consumo promedio del mes de Enero de 2011 utilizando iniciadores de retardo sencillo.

Sistema de iniciación de doble retardo		
Producto	Consumo	Precio
Alto explosivo	500.00 kg	1,023.80 USD
Agente explosivo	3, 645.00 kg	3,874.84 USD
Conductor (mecha)	2.00 m	0.51 USD
Cordón detonante	5.00 m	1.47 USD
Fulminantes	1 pieza	0.23 USD
Conector 50'	3 piezas	14.28 USD
Iniciador de doble retardo 60'	104 piezas	684.32 USD
	Costo total:	5,599.45 USD

Tabla 11. Simulación del costo del consumo promedio del mes de Enero de 2011 utilizando iniciadores de doble retardo.

➤ FEBRERO DE 2011:

Sistema de Iniciación de retardo sencillo		
Producto	Consumo	Precio
Alto explosivo	425.00 kg	870.23 USD
Agente explosivo	3,412.50 kg	3,635.98 USD
Conductor (mecha)	2.00 m	0.51 USD
Cordón detonante	442.00 m	130.48 USD
Fulminantes	1 pieza	0.23 USD
Conector ms	31 piezas	131.44 USD
Iniciador ms 50'	8 piezas	37.52 USD
Iniciador ms 40'	82 piezas	321.44 USD
	Costo total:	5,127.83 USD

Tabla 12. Costo del consumo promedio del mes de Febrero de 2011 utilizando iniciadores de retardo sencillo.

Sistema de iniciación de doble retardo		
Producto	Consumo	Precio
Alto explosivo	425.00 kg	870.23 USD
Agente explosivo	3,412.50 kg	3,635.98 USD
Conductor (mecha)	2.00 m	0.51 USD
Cordón detonante	5.00 m	1.47 USD
Fulminantes	1 pieza	0.23 USD
Conector 50'	3 piezas	14.28 USD
Iniciador de doble retardo 60'	90	592. 20 USD
	Costo total:	5,114.90 USD

Tabla 13. Simulación del costo del consumo promedio del mes de Febrero de 2011 utilizando iniciadores de doble retardo.

Nota: Las diferencias con respecto al costo de los sistemas de iniciación se anexan en las conclusiones.

Como ejercicio adicional, se analizó la plantilla del día 15 de Diciembre de 2010 comparándola con el sistema de iniciadores de doble retardo.

COSTO DE UNA VOLADURA UTILIZANDO INICIADORES DE RETARDO SENCILLO

➤ Miércoles 15 de Diciembre de 2010.

Bordo (m): 2.5

Espaciamiento (m): 2.7

Longitud (m): 12.6 (promedio)

Taco (m): 2

Carga de fondo (kg): 4.41

Carga de columna (kg): 37.74

Carga máxima por retardo (kg): 168.6

F.C. (Kg/m³): 0.495

Número de barrenos: 102

Plantilla: Tresbolillo.

COSTO:

- 18 cajas de hidrogel: 921.42 USD.
- 154 sacos de ANFO: 4,087.16 USD.
- 2 m de mecha: 0.51 USD.
- 1 fulminante: 0.23 USD.
- 31 conectores ms: 131.44 USD.
- 6 iniciadores de 50 Ft: 28.14 USD.
- 43 iniciadores ms de 40 Ft: 168.56 USD.
- 55 iniciadores ms de 30 Ft: 192.5 USD.
- 750 m de cordón detonante 5 PE: 221.41 USD.

Total: 5,751.37 USD.

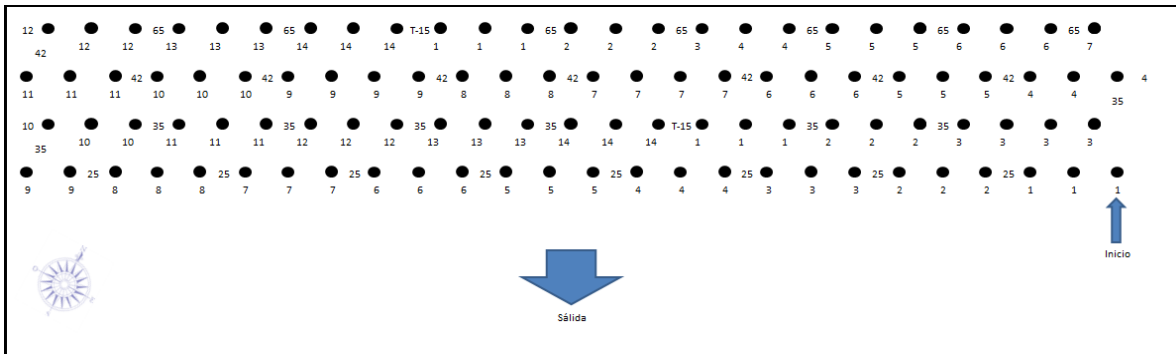


Figura 16. Plantilla del día 15 de Diciembre de 2010.

COSTO DE UNA VOLADURA UTILIZANDO INICIADORES DE DOBLE RETARDO

Se utilizará la misma plantilla:

➤ Miércoles 15 de Diciembre de 2010.

Bordo (m): 2.5

Espaciamiento (m): 2.7

Longitud (m): 12.6 (promedio)

Taco (m): 2

Carga de fondo (kg): 4.41

Carga de columna (kg): 37.74

Carga máxima por retardo (kg): 42.15

F.C. (Kg/m³): 0.495

Número de barrenos: 102

Plantilla: Tresbolillo.

COSTO:

- 18 cajas de hidrogel: 921.42 USD.
- 154 sacos de ANFO: 4,087.16 USD.
- 2 m de mecha: 0.51 USD.
- 1 fulminante: 0.23 USD.
- 102 piezas de Iniciadores de doble retardo (25/350) de 60 Ft: 671.16 USD.
- 3 conectores rápidos de superficie de 50 Ft (17 y 42 ms): 14.28 USD.
- 5 m de cordón detonante 5 PE: 1.47 USD.

Total: 5,696.23 USD.

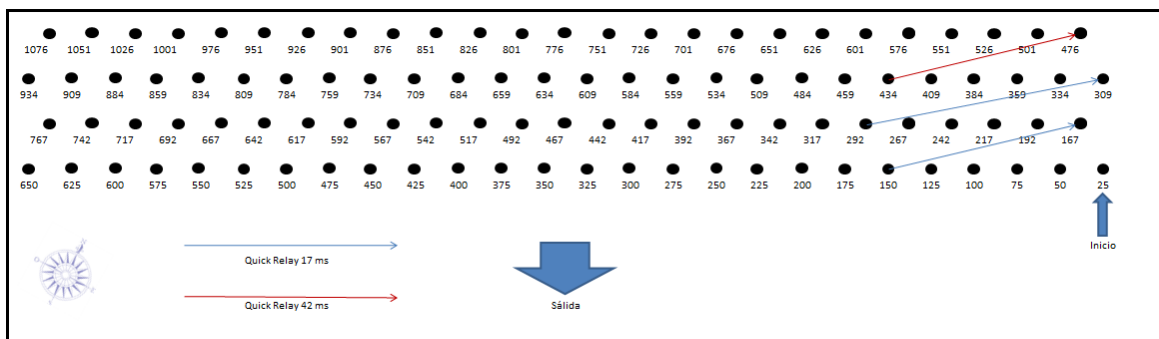


Figura 17. Simulación de la plantilla del día 15 de Diciembre de 2010.

Resumiendo el costo de los consumos promedio por mes se tiene lo siguiente:

- Diciembre 2010:
 - Sistema de iniciación de retardo sencillo: 5,288.86 USD.
 - Sistema de iniciación de doble retardo: 5,212.59 USD.
 - Diferencia: (+) **76.27 USD**
- Enero 2011:
 - Sistema de iniciación de retardo sencillo: 5,597.01 USD.
 - Sistema de iniciación de doble retardo: 5,599.45 USD.
 - Diferencia: (-) **2.44 USD**
- Febrero 2011:
 - Sistema de iniciación de retardo sencillo: 5,127.83 USD.
 - Sistema de iniciación de doble retardo: 5,114.90 USD.
 - Diferencia: (+) **12.93 USD**

El costo de la voladura del día 15 de Diciembre de 2010 utilizando los dos sistemas de iniciación es el siguiente:

- Sistema de iniciación de retardo sencillo: 5,751.37 USD.
- Sistema de iniciación de doble retardo: 5,696.23 USD.
- Diferencia: (+) **55.14 USD**

VI. CONCLUSIONES

Se puede observar que la variación del costo entre ambos sistemas de iniciación es mínima, y puede cambiar dependiendo del tipo de diseño que se haya considerado previamente. Se puede concluir que el análisis de costo entre ambos sistemas no es un factor contundente para determinar el cambio de un sistema a otro.

El análisis comparativo indica que el uso del sistema de iniciación de doble retardo es viable desde el punto de vista económico y técnico ya que ofrece las siguientes ventajas técnicas:

- Se obtiene una mejor distribución de la energía liberada en toda la plantilla debido a que el tiempo entre barrenos es homogéneo en todas las líneas.
- Ofrece una amplia gama de tiempos entre barrenos, permitiendo una mayor aproximación al valor teórico establecido.
- Se tiene un mejor control del producto, ya que se manejan por piezas de un determinado tiempo y no por series como el sistema de iniciación de retardo sencillo, facilitando los inventarios.
- Gracias a su versatilidad, se cuenta con la opción de cambiar el sentido de la salida si se llegase a presentar algún imprevisto.
- Se reducen los niveles de ruido ya que no utiliza cordón detonante, haciendo más discretas las voladuras.
- Se reducen los tiempos de cargado debido a que no es necesario estar acomodando series al pie del barreno, ya que tiene un sencillo sistema de conexión.
- Se elimina la posibilidad de tener errores en la colocación de los iniciadores en cada barreno, ya que se distribuyen por pieza y no por serie.

Para finalizar este informe, se considera que el sistema de iniciación de doble retardo puede substituir al sistema de iniciación de retardo sencillo ya que cuenta con más ventajas técnicas y su costo no representa un impacto negativo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Briones, A. (2007). Electro-Star (E*Star) Iniciadores Electrónicos, [Presentación en Power Point]. Magdalena de Kino. Recuperado en Julio de 2012.
2. EXSA. (sin año). Manual práctico de voladura. 4ª edición.
3. International Society of Explosives Engineers. (2008). Manual del especialista en voladura. Estados Unidos de Norteamérica. 7ª edición.
4. Konya, C. (1998). Diseño de voladuras. México. Ediciones Cuicatl.
5. López Jimeno, E., López Jimeno, C., García Bermúdez, P. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas. España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.