

DetECCIÓN DE LA SECUENCIA DE INICIACIÓN MEDIANTE EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN MINA YANACOCCHA PERÚ

“XIV Jornadas de Voladura ASIEX 2023”

Romel B. Villanueva
Cosmos Blasting

RESUMEN

En la mina de oro Yanacocha, en los andes del norte del Perú, en octubre del 2019, se realizaron las primeras pruebas de instrumentos para detectar la secuencia de iniciación de una voladura. A través de la medición de la radiación electromagnética producida por la detonación de cada taladro en secuencia. Se llevaron a cabo varias pruebas experimentales para elegir la antena correcta y dar con la configuración ideal del equipo de grabación de señal, para detectar estas ondas electromagnéticas.

Finalmente el 11 de octubre del 2019 se obtuvo la primera medición de este tipo en Perú. Con el instrumento grabando a una velocidad de 1 millón de muestras por segundo, se detectó con una precisión del 99.5%, la secuencia de la voladura. Se comprobó que correspondía, sin duda, con el esquema diseñado.

El principal resultado es que estas pruebas nos proporcionan un método e instrumentación para verificar si la secuencia de voladura planificada se cumplen correctamente en campo. De esta manera podemos encontrar desviaciones operativas y la detección de posibles tiros quedados (TQs).

Este método ha demostrado ser preciso, rápido y de fácil implementación, requiriendo principalmente un equipo de captura de señal que pueda grabar a muy alta velocidad, algo que cada vez es más fácil de satisfacer con el desarrollo de los micro controladores. Por otro lado, el tipo antenas empleadas en este método son de bajo costo y muy comerciales.

Estas pruebas han mejorado nuestra comprensión de la naturaleza de la detonación y se ha marcado un nuevo hito en el desarrollo de la instrumentación para voladura en Perú.

Palabras clave: *Secuencia de iniciación, campo electromagnético, detonación.*

INTRODUCCIÓN

La detonación de una carga explosiva produce un campo electromagnético. Esto es debido a que tras el paso de la onda de choque, las moléculas del aire se ionizan y cambian su polaridad muchas veces por unidad de tiempo, dando lugar a una radiación electromagnética, cuya señal viaja independiente del medio, ya sea este aire o roca.

Esta radiación puede ser medida por detectores convenientemente diseñados y ubicados. Como antenas en torno al área de voladura.

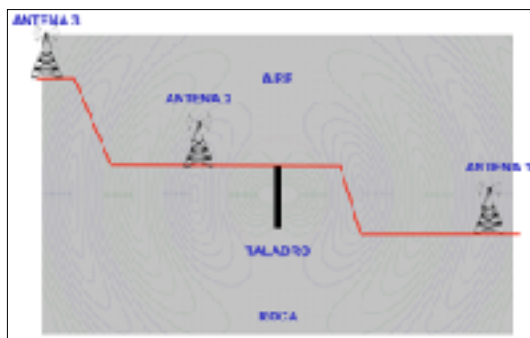


Figura 1: Radiación electromagnética producida por la detonación de un taladro de voladura.

Chen Hong (2021) considera que en el proceso de detonación de explosivos condensados, la onda de detonación, los productos de detonación y la onda de choque del aire forman un campo aerodinámico e irradian energía al espacio aéreo circundante.

METODOLOGÍA

ANTECEDENTES:

Gary Cavanaugh en Australia y UK realiza investigaciones mediante un sensor dentro de un taladro de voladura, el mismo que fue activado por una fuerza, a la cual Cavanaugh interpreta como de naturaleza electromagnética.

En 1999 los investigadores rusos, Gorshunov, Kononenko y Sirotinin, realizaron la "caracterización de los explosivos" según su campo electromagnético.

En 2005 S. P. Soloviev y J. J. Sweeney, desarrollan el modelo matemático que explica las curvas de señal del campo electromagnético de una

detonación. Realiza mediciones con taladros de hasta 300 kg.

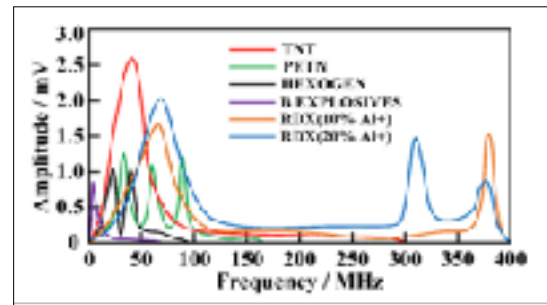


Figura 2: Radiación electromagnética de diferentes explosivos, (Hui, Y. & Kong, D. & Jiang, J.)

CAPTACIÓN Y MUESTREO DE LA SEÑAL:

Según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo f_s de una medición debe ser mayor que el doble de la frecuencia de interés en la señal que se quiere medir.

Pero aun no conocemos bien el rango de frecuencias de las ondas electromagnéticas producidas por la detonación de varias cargas secuenciadas en una voladura a gran escala, con explosivos basados en nitrato de amonio, como las que tienen lugar en una mina a cielo abierto.

Pero podemos tomar como referencia los experimentos de Cui y Kong. Ellos hicieron detonar cargas individuales de TNT aluminizado, en un medio controlado. Se logró detectar la señal con una antena de banda ultra ancha de 30 Mz a 1 GHz.

Para nuestro experimento emplearemos una antena multidireccional de 2.4 a 2.5 GHz.

SENSOR:

El sensor es la antena. Esta es capaz de detectar la radiación electromagnética EMF (Electro Magnetic Field), producida por la detonación de cada carga explosiva en la voladura secuenciada. Mas precisamente, detecta la variación de la fuerza electromagnética o FE, que es la aptitud de la señal en un instante.

La antena se instala convenientemente, en la misma superficie de terreno, al mismo nivel del proyecto de voladura y a pocos metros del mismo.

Se pueden colocar varias antenas. En este caso se colocó solo una antena. La antena empleada en esta prueba es similar a las antenas de los routers de wifi.

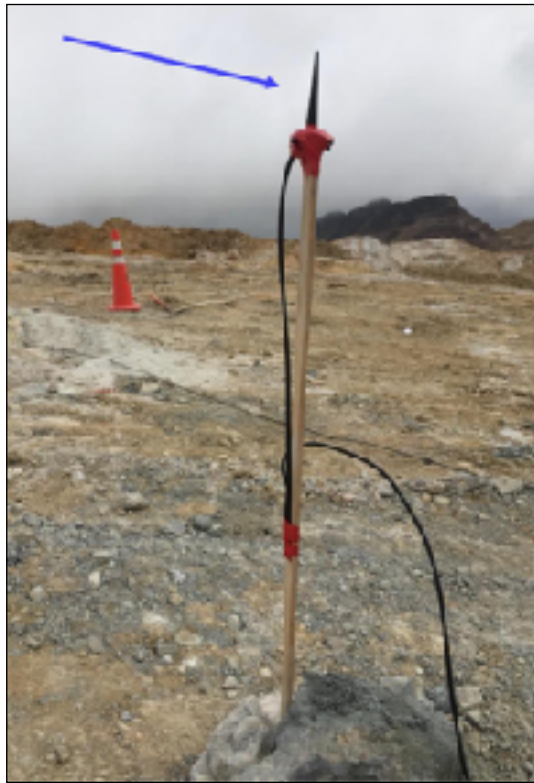


Figura 3: Antena de 2.4 Hz ubicada a 4.5 m del taladro de inicio de la voladura.

En la tabla a continuación se detallan las características de la antena empleada:

Rango de Frecuencia	2.4 - 2.5 GHz
Ganancia	3 dBi
Conector:	SMA plug
Aplicaciones:	Wi-Fi - IEEE 802.11bg
Dimensiones	Ø 30 x 110 mm
Peso	0.048 kg

Tabla 1: Secuencia detectada en la voladura del 11/10/2019 en mina Yanacocha

INSTALACION DEL EQUIPO:

Para esta prueba la antena estuvo ubicada a 4.5 m. del taladro de inicio. La antena se debe

conectar con un instrumento de captura de datos a alta velocidad (DAS-HS) para grabar la señal capturada por la misma. Esta conexión se hace mediante un cable coaxial RG56.

La línea de cable se extiende por 200 m, hasta la ubicación del instrumento DAS en una zona segura, donde se protege de los fragmentos de roca que proyecta la voladura.

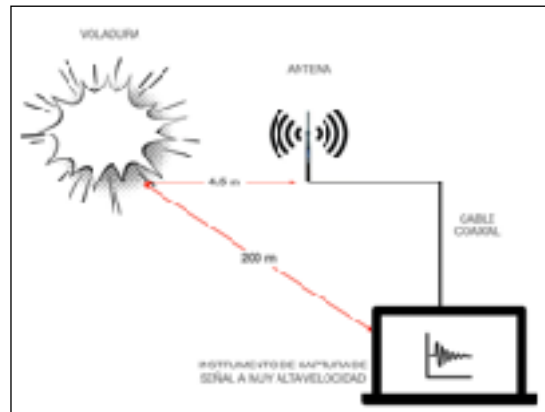


Figura 4: Disposición de la antena e instrumento para detectar la radiación electromagnética.

INSTUMENTO DE CAPTURA DE LA SEÑAL:

La señal que llega por el cable, primero es amplificada, se le suma un voltaje offset. La señal ya amplificada ingresa a uno de los canales del equipo de captura DAS. La configuración de los parámetros de captura del equipo se hace mediante una laptop conectada al mismo, con su propia aplicación.

El equipo se deja configurado para grabar a 2 millones de muestras por segundo. Los datos se graban en la memoria del equipo y luego son analizados en una laptop. El tiempo de grabación máximo es de 20 minutos.



Figura 5: Instrumento de captura de datos a muy alta velocidad.

SECUENCIA DE INICIACIÓN:

En la oficina de diseño de voladura de la mina Yanacocha, se decide la secuencia de iniciación. Para el caso de la voladura del 11 de octubre del 2019, en el tajío Quecher Main, fue el que se muestra a continuación.

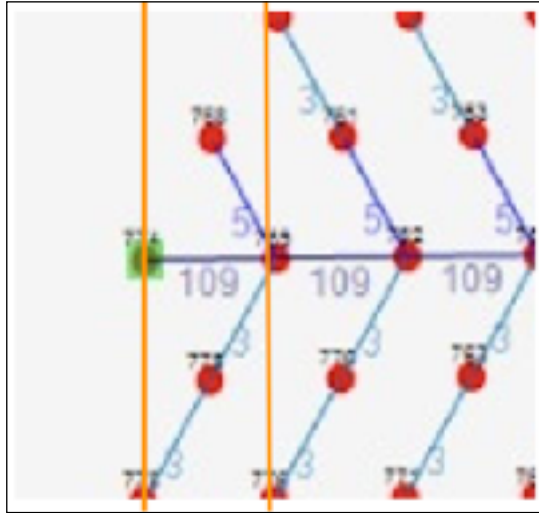


Figura 6: Parte del plano de secuencia con los tiempos entre filas y entre taladros.

Tiempo entre taladros	3.0 ms
Tiempo entre filas	109 ms

Tabla 1: Secuencia detectada en la voladura del 11/10/2019 en mina Yanacocha

El taladro de inicio se detona separado de la primera fila. La secuencia configura una salida en "V".

SEÑAL ELECTROMAGNETICA DE LA ANTENA:

La señal es analizada mediante la herramienta software del instrumento. La gráfica a continuación muestra la variación de la fuerza electromagnética a lo largo de la voladura secuenciada.

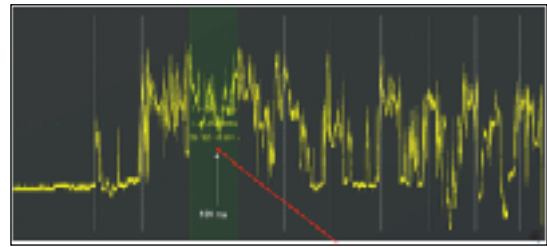


Figura 7: Señal detectada que muestra paquetes y rizado producto de la voladura.

Paquetes y rizado:

De inmediato salta a la vista que la señal tiene un patrón. La señal viene en "paquetes" de la misma duración. Por otro lado, si hacemos "zoom" podemos ver también un rizado en toda la señal.

ANÁLISIS DE LA SEÑAL:

Taladro de Inicio y primera fila:

Véase en la señal, el pulso generado por el taladro de inicio. Luego, después de 109 ms, llega el pulso del segundo taladro y seguidamente el tren de pulsos de los taladros de la primera fila.

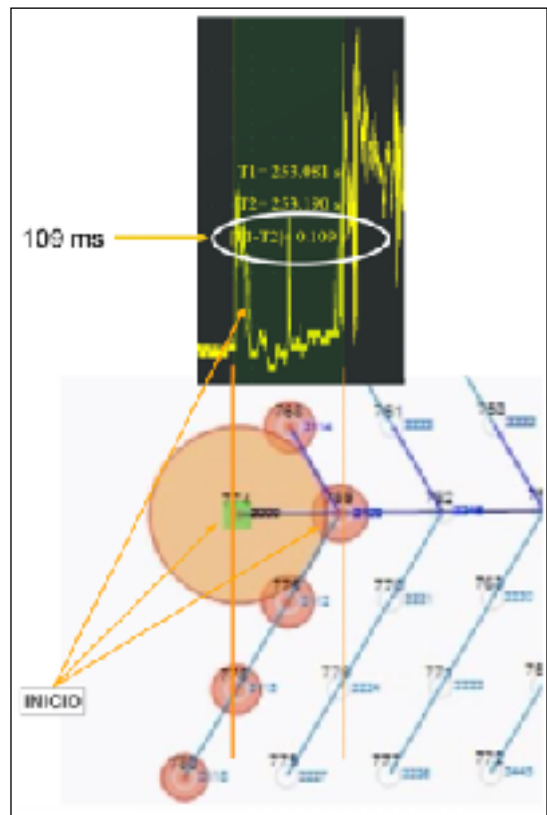


Figura 8: Señal detectada que muestra paquetes y rizado producto de la voladura.

El primer taladro no pertenece a una fila y su pulso se ve como un pico aislado, el segundo taladro parece a una fila, por lo tanto su pulso es el inicio de un “paquete”.

Tiempo entre filas:

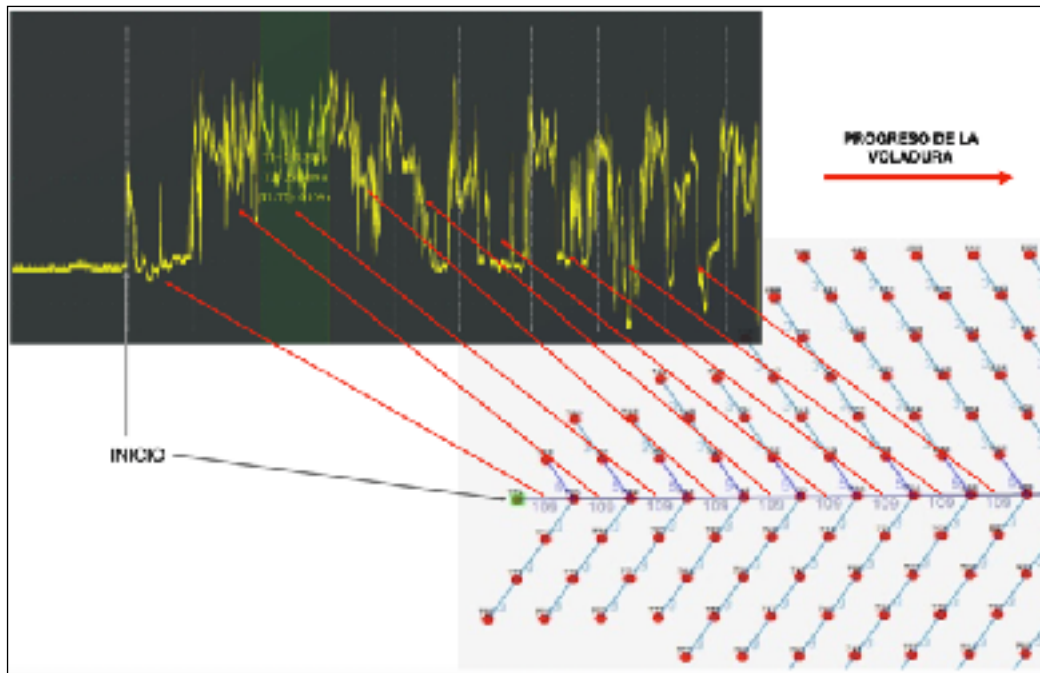


Figura 9: Correspondencia entre la señal electromagnética y la secuencia entre filas de diseño.

Se comprueba que el primer paquete tiene una duración de 109 ms, igual al tiempo de retardo de diseño.

A continuación se muestran otras regiones de la señal, donde se mantienen el tiempo entre filas.

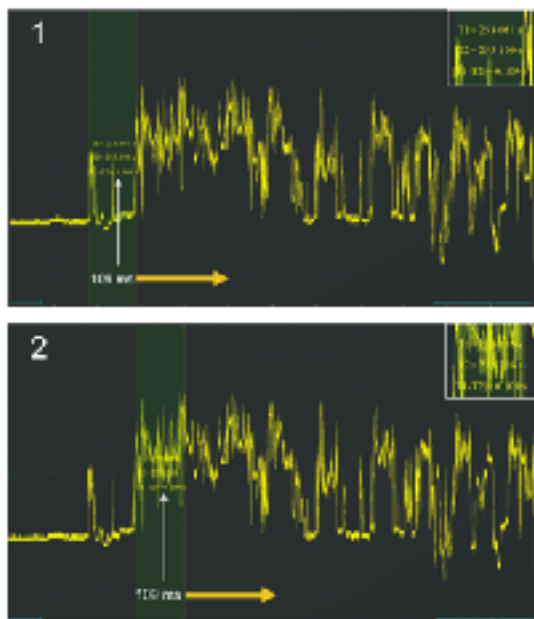


Figura 10: 1) Tiempo entre el primer taladro y el inicio de la primera fila. 2) Tiempo de detonación de la primera fila.

Todos los paquetes subsiguientes hacia la dirección de avance de la voladura tienen una duración de 109 ms.

Por lo tanto existe una correspondencia entre la secuencia de diseño y la secuencia detectada por el equipo.

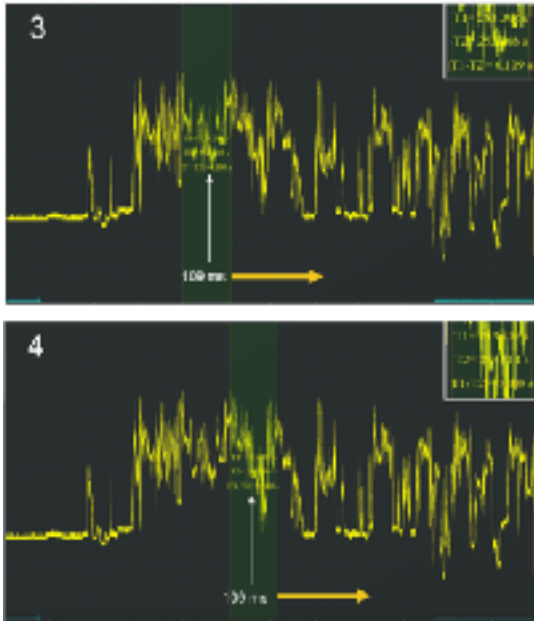


Figura 11: 3) Tiempo de detonación de la segunda fila.
4) Tiempo de detonación de la tercera fila.

Tiempo entre taladros:

Ahora debemos analizar el rizado de la Señal. Se observa un patrón de picos, el tiempo entre picos (periodo) es de 2.968 ms, muy aproximado a 3.0 ms, que es tiempo entre taladros.

Por lo tanto existe una correspondencia entre el tiempo detectado y el de diseño.

La pequeña diferencia, de solo 0.032 o 1%, puede deberse a la capacidad electronica del sistema de adquisición y captura de la señal.

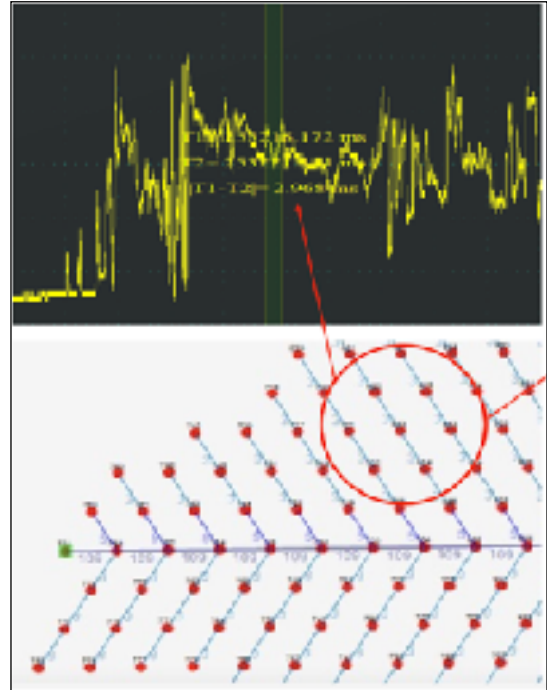


Figura 12: Correspondencia entre la señal electromagnética y el diseño, tiempo entre taladros.

Véase en las gráficas a continuación, que el patrón de tiempo entre taladros de 2.968 ms, se mantiene en toda la duración de la voladura.

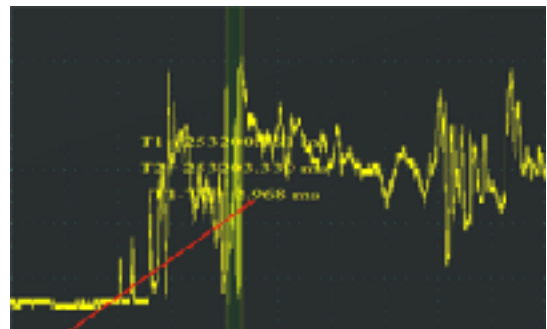


Figura 12: Rizado del tiempo entre taladros 2.969

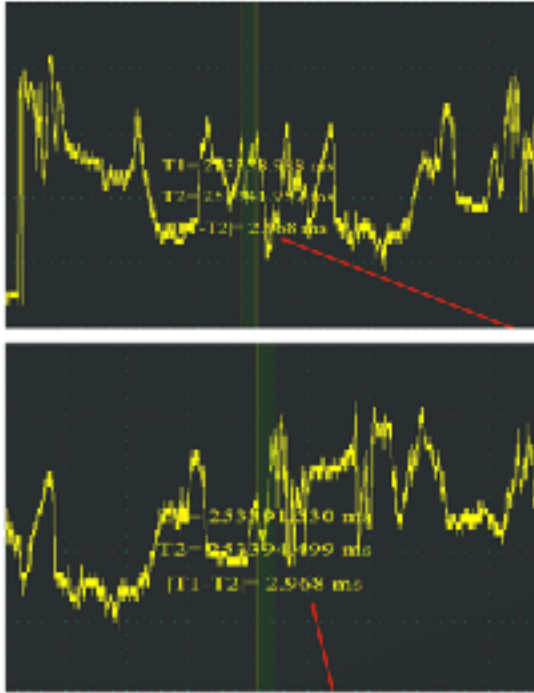


Figura 13: Rizado del tiempo entre taladros 2.968 en varias regiones de las señal.

El rizado puede experimentar una aparente superposición y verse “contaminado” por la señal de otros talaros. Pero estos es debido a las limitaciones del equipo detector. Porque a diferencia de las ondas sísmicas, las ondas electromagnéticas no se confunden en una superposición y pueden ser detectadas, o mejor dicho resultados, por un detector con mayor sensibilidad o poder de resolución.

No obstante, siempre es posible encontrar en toda la señal, el tiempo entre taladros.

RESULTADOS

Se ha podido detectar la secuencia de iniciación de una voladura en la mina Yanacocha, mediante la medición del campo electromagnético, el mismo que varía según el progreso de la secuencia de voladura.

Para los tiempos entre taladros se tiene una precisión del 99 %.

Paro los tiempos entre filas, se tiene una precisión del 100%.

En conjunto, este método de detección tiene una precisión de 99.5%.

La tabla siguiente muestra los resultados de la prueba, el 11 de octubre del 2019, en el tajo Quecher Main, en la mina Yanacocha.

Tiempos detectados junto a tiempos del diseño.

	Diseñado	Detectado	Precision
Tiempo entre taladros	3	2.968	99 %
Tiempo entre filas	109	109	100 %
Precision del metodo			99.5 %

Tabla 2: Tiempos de diseño frente a tiempos detectados en la voladura de prueba.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Se ha demostrado que un instrumento de detección convenientemente diseñado puede detectar las ondas electromagnéticas de una voladura.
- Analizando la señal se ha comprobado, con mucha facilidad, su correspondencia con la secuencia de iniciación.
- Esta técnica e instrumentación se puede aplicar para la identificación de desviaciones entre la secuencia de diseño y la aplicada en campo.
- Se puede aplicar para garantizar la seguridad en casos de posibles tiros quedados (TQs).
- Es un método muy preciso, con solo el 0.5% de error en sus mediciones. Esto debido a que la señal que se analiza viaja a la velocidad de la luz. Por lo tanto es rápido y confiable.
- Sin embargo, para una mayor precisión requiere un equipo que grabe la señal a una mayor frecuencia de muestreo.
- Es preciso continuar, con más pruebas; colocando más antenas en diferentes puntos circundando el proyecto de voladura.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente a todas las personas que estuvieron involucradas en este trabajo; menciono especialmente al ingeniero

Nelson Silva, por considerar oportuno probar los equipos de detección.

Gracias al ingeniero Yorhino Leon de mina Yanacocha, quien brindo las facilidades y compartió la información de campo que ha sido fundamental para este informe.

Quedo agradecido por el esfuerzo y dedicación de mi asistente Victor Paredes, por su soportarme durante la preparación y realización de las pruebas.

Se ha marcado un nuevo hito en el desarrollo de la instrumentación para voladura en Peru.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Cavanough, G. (2015). Measurement of Detonation Temperature and Pressure. QMR Detonation Sensors. Australia.

Chen, H.; Pan, X.; He, Y.; Jiao, J.; Shen, J.; Ben, C. Measurement of time-varying electron density of the plasma generated from a small-size cylindrical RDX explosion by Rayleigh microwave scattering. Plasma Sci. Technol. 2021, 23, 045401. Canada

Fine, J., & Vinci, S. (Diciembre, 1998). Causes of Electromagnetic Radiation From Detonation of Conventional Explosives. Adelphi, USA.

Soloviev, S., & Surkov, V. & Sweeney, J. (Junio, 2002). Quadrupolar electromagnetic field from detonation of high explosive charges on the ground surface. Journal of Geophysical Research VOL. 107, USA.

Soloviev, S.P. Generation of electric and magnetic field during detonation of high explosive charges in boreholes. J. Geophys. Res. Solid Earth 2005, 110, 1-14. UK.