

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE EVENTOS
SÍSMICOS EN INTERIOR MINA (SOCAVÓN) PARA DETERMINAR
LUGARES CRÍTICOS POR CAÍDA DE ROCAS

INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR
LENIN WILLIAM LIÑAN LOAYZA

PROMOCIÓN
1997-I

LIMA-PERÚ
2011

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE EVENTOS SÍSMICOS EN INTERIOR
MINA (SOCAVÓN) PARA DETERMINAR LUGARES CRÍTICOS POR CAÍDA DE
ROCAS**

**A mis padres, Esposa e Hija por
su apoyo permanente para poder
completar el presente informe**

SUMARIO

El presente informe se basa en el monitoreo de eventos sísmicos en el interior de una mina subterránea (socavón) para identificar las zonas vulnerables a los efectos de las liberaciones de energía y prevenir sus efectos mediante un sostenimiento oportuno. Para este propósito, se realizara un estudio de los geófonos uniaxial y triaxial utilizados en diferentes niveles de la mina subterránea. Así también, se realizara un estudio de los sistemas de adquisición utilizados para su posterior procesamiento, el cual permite estimar las intensidades de los sismos en el interior de una mina. Luego se realizara el análisis para determinar el riesgo sísmico, la ubicación del evento sísmico, así como la relación de los eventos sísmicos con la voladura de extracción de mineral para el caso de una mina subterránea, indicando el tiempo de ejecución y los costos que implica poner en funcionamiento el sistema de monitoreo de eventos sísmicos.

A partir de los datos obtenidos es posible visualizar, analizar e interpretar la sismicidad sirviendo como metodo de apoyo para tomar acciones de prevención en la seguridad y productividad de una mina que es el principal objetivo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA	
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Objetivos del trabajo.....	4
1.3 Evaluación del problema.....	5
1.4 Limitaciones del trabajo.....	5
1.5 Síntesis del trabajo.....	5
CAPITULO II	
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	
2.1 Evento Sísmico.....	7
2.2 Estallido de Roca.....	7
2.3 Riesgo Sísmico.....	7
2.4 Magnitud.....	7
2.5 Sensores sísmicos.....	7
2.6 Magnitud de eventos sísmicos inducidos.....	8
2.7 Escala relativa de riesgo sísmico.....	10
2.8 Daño por estallido de roca.....	11
2.9 Geófonos.....	12
2.10 Medidor de intensidad de sismo.....	16
2.11 Determinación de P y llegada de la onda S.....	17
2.11.1 Ubicación.....	18
2.11.2 Parámetros de la fuente.....	18
2.12 Teoría de muestreo y frecuencia de Nyquist.....	19
CAPITULO III	
METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	
3.1 Alternativa de solución.....	20
3.2 Solución del problema.....	20
3.2.1 Diagrama de bloque del sistema sísmico.....	21
3.2.2 Comunicación del sistema.....	22
3.2.3 Instalación del geófono.....	22

3.2.4	Configuración del sistema.....	26
3.2.5	Conexión de los geófonos con los QS.....	28
3.3	Recursos humanos y equipamiento.....	31
CAPITULO IV		
ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS		
4.1	Análisis descriptivo de los eventos sísmicos.....	32
4.1.1	Análisis de ubicación de los eventos sísmicos.....	36
4.1.2	Análisis de la relación de los eventos sísmicos con la voladura.....	39
4.1.3	Análisis del Riesgo Sísmico.....	41
4.1.4	Análisis del comportamiento de los eventos sísmicos.....	43
4.2	Análisis teórico de los eventos sísmicos.....	44
4.3	Planes de acción tomadas de los resultados de análisis.....	46
4.4	Presupuesto y tiempo de ejecución.....	49
4.4.1	Costo de la implementación del sistema de monitoreo sísmico.....	49
4.4.2	Tiempo de ejecución.....	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		51
ANEXO A		
MEDIDOR DE INTENSIDAD DE SISMO (QS).....		52
ANEXO B		
TABLA DE COTAS PROMEDIO ALTURA DEL PIQUE.....		57
ANEXO C		
RS485 MODEM RACK.....		60
ANEXO D		
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		63
BIBLIOGRAFIA.....		66

INTRODUCCIÓN

Las compañías mineras subterráneas en el Perú que vienen operando por muchos años empiezan a afrontar problemas de inestabilidad, y problemas de sismicidad inducida debido al minado siendo una potencial fuente de estallidos de rocas, la inestabilidad también se genera por la profundización de la mina, es decir que las operaciones para la extracción de mineral se realizan a mayores profundidades, cuanto mayor es la profundidad, mayores son los problemas de inestabilidad.

Las cavidades abiertas a lo largo del periodo de explotación de la mina, la gran profundidad en la que se viene operando actualmente y el aspecto litológico del yacimiento constituido mayormente por rocas rígidas son factores que han provocado un desequilibrio en la redistribución de los esfuerzos, los mismos que conducen a constantes liberaciones de energía con potencial de estallidos de rocas.

Durante la explotación en los niveles inferiores se comienza a evidenciar problemas de sismicidad inducida con especial énfasis en los tajeos operativos donde se realiza la voladura incrementándose tanto en número como en magnitud, por esto se presentan numerosos incidentes por proyección de roca cuando los esfuerzos superan la resistencia del macizo rocoso. Este fenómeno rompe el esquema de las operaciones influyendo directamente en el incumplimiento del programa de producción.

Así mismo, conscientes de que el fenómeno de sismicidad inducida puede llevar hasta paralizar las operaciones si no se plantean alternativas de solución inmediatas, se define implementar en las operaciones un sistema de monitoreo sísmico en una mina que consiste en una distribución espacial de 22 sensores geófonos entre uniaxiales y triaxiales distribuidos en 3 niveles de producción dentro del área de influencia de las actuales operaciones de interior mina que nos permite ubicar, cualificar y cuantificar el fenómeno con la finalidad de realizar los análisis interpretativos del caso para brindar las medidas de control evitando los accidentes de personal y equipos.

A partir de las informaciones de monitoreo, es posible evidenciar un cambio súbito de la sismicidad inducida en la mina, por ejemplo un incremento en el número de eventos de regular a gran intensidad, o un cambio en la distribución diaria de eventos, y asociar estos cambios a una variación en la estabilidad del macizo rocoso donde tiene lugar el minado, se puede determinar controles para evitar un aumento de la exposición de los

trabajadores a la sismicidad o la interrupción temporal de la explotación de determinada parte de la mina.

Para este propósito, este trabajo se divide en cuatro capítulos, conclusiones y cuatro anexos.

En el capítulo I, se refiere al planteamiento del problema que se tiene con la inestabilidad y la sismicidad inducida, la evaluación del problema con el objetivo de reducir los accidentes de equipo y del personal que labora, las limitaciones que se tienen con respecto a la solución planteada.

En el capítulo II, se refiere a los conceptos teóricos con los que se basa el presente informe.

En el capítulo III, se refiere al método que se usa para dar solución al problema, mostrando para ello la distribución de los sensores geófonos en interior mina, así como del sistema sísmico que se implementa.

En el capítulo IV, se refiere al análisis que se realiza para poder determinar la ubicación de los eventos sísmicos, así como los costos y el tiempo de ejecución.

Finalmente, se presenta una sección con las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema.

A medida que se profundiza en la mina aumenta el riesgo de accidentabilidad en las labores, se pone en riesgo a los trabajadores y los equipos, diversas zonas se vuelven vulnerables a las liberaciones de energía. Existen precedentes de accidentes en equipos de extracción de mineral y de personal llegando a ser fatídicos a causa de este fenómeno. Con la finalidad de contrarrestar estos eventos, se toman medidas para proteger la vida y salud de los trabajadores, así como reducir los accidentes de equipos.

Las razones fundamentales del desarrollo de sismicidad en la minería subterránea pueden distinguirse en forma aproximada, como diferentes combinaciones de 3 factores básicos:

Esfuerzos inducidos

Estructura geológica, propiedades del macizo rocoso

Aspectos del método de minado

Cada uno de estos factores tiene una amplia variación e influencia potencial, a menudo la evolución de la sismicidad se debe a esfuerzos crecientes asociados a niveles de extracción local, así, muchas minas que hoy ya son sísmicamente activas y propensas a estallidos han experimentado para llegar al estado actual, una progresión paso a paso de creciente severidad sísmica. Cada etapa de esta transición es notoria, sin embargo no es fácil de identificar cuando está ocurriendo por primera vez. De esta manera, se puede distinguir distinguir 5 pasos o etapas:

Sismicidad nula: Baja, infrecuente, o irrelevante.

Sismicidad molesta: Leve aumento de actividad, sin mayores problemas operacionales o de planeamiento.

Sismicidad significativa, pero de daño menor: Ocurrencia regular de sismos importantes, pero con un limitado daño por estallidos.

Sismicidad significativa, y daño significativo: Eventos de gran magnitud ocurren regularmente, tales que el daño por estallidos ya empieza a afectar a las operaciones, producción, seguridad de la fuerza de trabajo que es muy importante, y confiabilidad de las reservas minerales.

Sismicidad severa y daño severo: La sismicidad minera y los estallidos dominan las

operaciones y el planeamiento, lo que requiere modificaciones fundamentales de secuencia y diseño minero, la viabilidad de las operaciones en general ya se encuentra amenazada.

En las etapas tempranas de extracción, la sismicidad está principalmente causada por concentraciones localizadas de esfuerzos elevados, fallas, diques, y cambios en la rigidez del macizo rocoso. A medida que aumenta la extracción, volúmenes mayores de roca quedan sometidos a elevados esfuerzos, ocurriendo falla o colapso de tajeos y pilares, con la consiguiente liberación de energía potencial de deformación acumulada, lo que a su vez genera eventos sísmicos de magnitud moderada y potencialmente dañinos. En las etapas finales de extracción, pueden ocurrir cambios regionales en el nivel de esfuerzos, afectando a mayores volúmenes de roca y con mayor potencial de grandes eventos sísmicos y estallidos.

1.2 Objetivos del trabajo.

El objetivo central consiste en estudiar y analizar un sistema de monitoreo basado en geófonos cuya finalidad es identificar los factores que hacen a una mina sísmicamente activo, determinar las magnitudes y ubicación del evento para tomar las medidas preventivas de manera oportuna como por ejemplo evitar la caída de rocas, al realizar la instalación de mallas por debajo de las rocas como ilustrado en la Figura 1.1. En esta figura se observa la instalación de mallas de sostenimiento por debajo de las rocas, con la finalidad de evitar su caída.

Así también, es posible minimizar las consecuencias de la sismicidad minera sobre la producción y la seguridad.

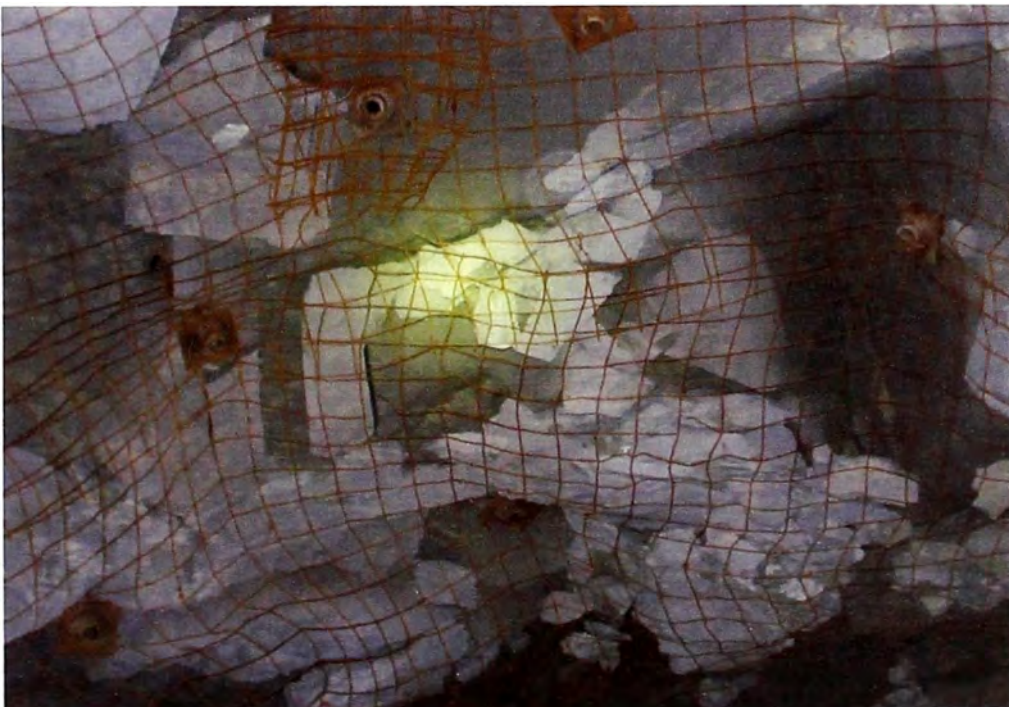


Figura 1.1. Caída de rocas sostenidas con mallas

1.3 Evaluación del problema

Para poder reducir los accidentes de equipo y personal, se requiere contar con una estación individual de monitoreo sísmico que sea instalado en la superficie, en una ubicación convenientemente cercana a las oficinas de la Mina.

La mina se encuentra ubicada a 4200 msnm, este punto se toma como nivel cero, es decir como punto de referencia para poder ubicar los diferentes niveles de la mina. El sistema de monitoreo sísmico está basado en sensores, software y hardware, los sensores se instalarán en 3 niveles diferentes de la mina, Nv. -770, -970 y -1170 (lugares ubicados debajo tomando como punto de referencia el nivel cero descrito) como se muestra en la Figura 1.2, cada color rojo, verde y azul representa un nivel y en cada nivel se ejecutan labores de extracción de mineral.

Para efectos de sensoriamiento de sismos, se utilizan sensores geófonos uniaxiales y triaxiales, los cuales cuentan con sistemas de acondicionamiento, adquisición y comunicación para una computadora (PC).

La capacidad técnica de esta instalación permite:

Detectar eventos sísmicos de magnitudes en el rango de -4.0 a + 5.0.

Determinar la frecuencia con el cual ocurren eventos sísmicos.

Estimar la magnitud y radio de ubicación de cada evento detectado (Esta estimación de radio o distancia es importante debido a que, por tratarse de un yacimiento relativamente estrecho, la detección del radio de un evento sugiere de inmediato un número pequeño y razonable de fuentes potenciales del evento que coinciden con sitios o tajeos de ubicación real. Diferente sería el caso para un yacimiento masivo o esférico, donde un radio de evento tendría demasiadas fuentes, con la consiguiente incertidumbre adicional en la ubicación del evento).

1.4 Limitaciones del trabajo

La solución para los problemas de sismicidad inducida no es completa, es decir intentar desarrollar una técnica absolutamente completa para determinar la probabilidad, intensidad o distribución de los problemas de sismicidad inducida. Esta solución completa aún no es posible, el enfoque realista actual consiste en establecer el contexto básico y las condiciones adecuadas a sismicidad y estallidos de roca en la mina subterránea.

De lo establecido se indica que los aspectos esenciales que determinan la severidad de las condiciones sísmicas son: El minado profundo, la presencia de roca competente, fallas prominentes, zonas altamente esforzadas y ciertas estrategias de extracción de mineral.

1.5 Síntesis del trabajo

El complejo efecto dinámico al cual está sometido las operaciones en profundidad, desequilibra el normal proceso de minado comprometiendo la estabilidad del macizo

rocoso por el fenómeno de la sismicidad inducida que cada cierto tiempo puede producir un estallido de roca.

Para poder predecir posibles consecuencias que involucren la seguridad e integridad de las operaciones, es que se implementa un sistema de monitoreo sísmico que nos permite determinar con cierta precisión las coordenadas de los hipocentros y la magnitud del evento con cuyos valores estimamos el riesgo sísmico y de esta manera identificar los sectores de mayor vulnerabilidad sísmica, el cual muchas veces obliga a reestructurar el programa de producción de una determinada labor a fin de evitar cualquier riesgo de accidentabilidad a causa de este fenómeno. A partir de la información que proporciona este sistema, es posible definir medidas preventivas de mitigación en forma oportuna.

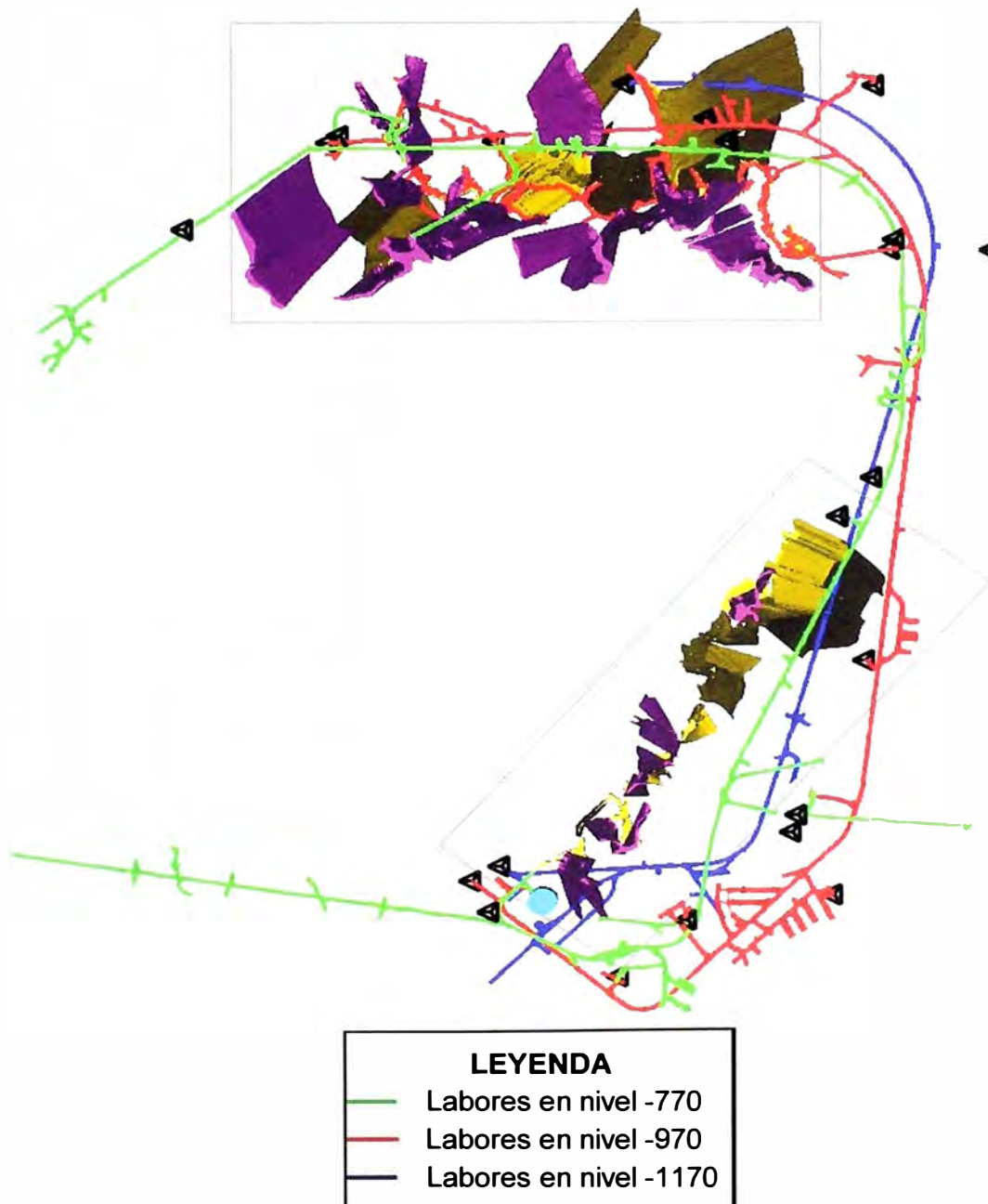


Figura 1.2. Regiones de importancia en el monitoreo

CAPITULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 Evento Sísmico

Es definido como una onda dinámica de efecto pasajero causada por falla o fracturamiento del macizo rocoso, normalmente identificado con la vibración acústica de deslizamiento o ruptura de roca. Constituye una respuesta normal del macizo rocoso a modificaciones de esfuerzos causados por la excavación de cavidades mineras.

2.2 Estallido de Roca

Evento sísmico que resulta en daño evidente al macizo rocoso.

2.3 Riesgo Sísmico

Probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de cierta magnitud. No existe un sistema universalmente aceptado para esta cuantificación. Está estrechamente asociado con el sistema de monitoreo adoptado, ya que la finalidad de este último es precisamente definir de una manera conveniente la ubicación o sectorización de alto y bajo riesgo sísmico.

2.4 Magnitud

Una medida relativa del tamaño, capacidad o potencia de un evento sísmico, basado en mediciones de máximo desplazamiento para una determinada frecuencia. A partir de las numerosas escalas de magnitud, la Magnitud Richter es la de más amplia utilización, habiendo sido originalmente formulada en 1958 para caracterizar sismos naturales en California. Por último, el término Magnitud Local se usa para designar una escala de magnitud calibrada con un sistema de monitoreo sísmico instalado localmente.

2.5 Sensores sísmicos

Pueden estar basados en cualquier combinación de geófono, acelerómetro y acelerómetros de equilibrio de la fuerza, en combinaciones uniaxial, biaxial y triaxial. Cada tipo de sensor tiene diferentes ventajas en términos de rango de amplitud, gama de frecuencias, confiabilidad y costo. La configuración de triaxial ofrece las estimaciones más precisas de los parámetros de la fuente y son basados en un sistema de geófono masa - resorte con corrección electrónica, este tipo de sensores brindan una muy buena estabilidad en temperatura, este geófono convierte el movimiento sísmico en valor eléctrico proporcional a la velocidad. En este trabajo se utilizan geófonos uniaxiales y triaxiales dispuestos en diferentes puntos de la mina. En la Figura 2.1 se muestra un geófono triaxial que físicamente es similar al geófono uniaxial. El geófono piezoeléctrico

es un transductor de velocidad y tiene como principio de medición el movimiento relativo de terreno, la masa del sistema descansa sobre un conjunto de placas hechas de un material piezoeléctrico sensible a la presión tal como el cuarzo o la turmalina. Una aceleración del terreno hacia arriba aumentará el peso aparente de la masa y en consecuencia subirá la presión que actúa en los cristales piezoeléctricos. Una aceleración del suelo hacia abajo disminuirá el peso aparente de la masa y en consecuencia la presión ejercida sobre las placas. La variación de la presión induce variaciones de voltaje entre los extremos de las placas.



Figura 2.1. Geófono triaxial

2.6 Magnitud de eventos sísmicos inducidos

Los eventos sísmicos en minería generalmente siguen una ley exponencial, denominada distribución de magnitud de Gutenberg-Richter como se indica en la ecuación 2.1, y que es definida por:

$$\text{Log } N = a - b m \quad (2.1)$$

Donde:

m es la magnitud del evento

N es el número de eventos de magnitud igual o superior a **m**

b es el exponente de la ley de potencia

a es la cantidad de eventos en la base de datos

El parámetro **b** está relacionado con el riesgo sísmico. Para un determinado universo

de datos, un elevado valor de **b** implica que hay relativamente pocos eventos de gran magnitud, mientras que un bajo valor de **b** es indicativo de un número relativamente elevado de eventos de gran magnitud.

Esta formulación significa que la frecuencia de ocurrencia de los eventos aumenta exponencialmente con una disminución en la magnitud. Así, por cada evento de magnitud +1.0, se puede esperar 10 eventos de magnitud 0.0 y 100 eventos de magnitud -1.0, y obviamente, por la naturaleza logarítmica relativa de la escala de magnitud Richter, cada paso o peldaño adicional de la misma equivale a un aumento de 10 veces en el tamaño de un evento sísmico. Por tanto, eventos de magnitud Richter +1.0 son 10 veces más potentes que eventos de magnitud 0.0, y 100 veces mayores que eventos Richter -1.0. En la Figura 2.2 se muestra el riesgo sísmico en donde el eje vertical es la cantidad de eventos (**N**) y el eje horizontal es la magnitud del evento sísmico (**m**), se muestra los eventos cuya magnitud son mayores o iguales a -2.0 sobre un período de tiempo de 1000 días, no se considera para la estimación los datos que tienen magnitud menor o igual a -2.0. Al realizar la extrapolación obtenemos el valor máximo de magnitud igual a 4.0 del evento sísmico que podría ocurrir en el futuro.

Desde esta perspectiva, es posible formular la clasificación cualitativa de tamaño de eventos, como sigue:

Eventos Pequeños: Magnitudes Richter de -3.0 a -2.0, apenas audibles en un ambiente quieto o silencioso, o percibidos como una leve vibración.

Eventos Medianos: Magnitud Richter -1.0, que pueden ser reportados a más de 100 m de su fuente, y se sienten como un golpe sonoro o equivalente a una voladura secundaria subterránea distante.

Eventos Grandes: Magnitud Richter 0.0, suenan como truenos cercanos o un disparo a corta distancia. Se sienten en toda la mina y moderadamente en superficie, hasta algunos cientos de metros de distancia, como reacción un trabajador cercano a la fuente salta y se protege por el ruido y vibración. En términos mineros, es equivalente a una voladura en labor de desarrollo.

Eventos Muy Grandes: Corresponden al rango de magnitud Richter +1.0 a +2.0, claramente se sienten en superficie, con vibración equivalente a una gran voladura de interior mina para extracción de mineral.

Es de interés señalar que uno de los mayores eventos de sismicidad inducida registrados en la historia ocurrió en Australia, precisamente en una mina cerca de Kalgoorlie al oeste de Australia, con magnitud Richter +4.3 a comienzos de la década de 1990. Por otra parte, los mayores eventos registrados en Canadá también son de magnitud superior a Richter +4.0, en las minas de níquel de la cuenca de Sudbury en

Ontario.

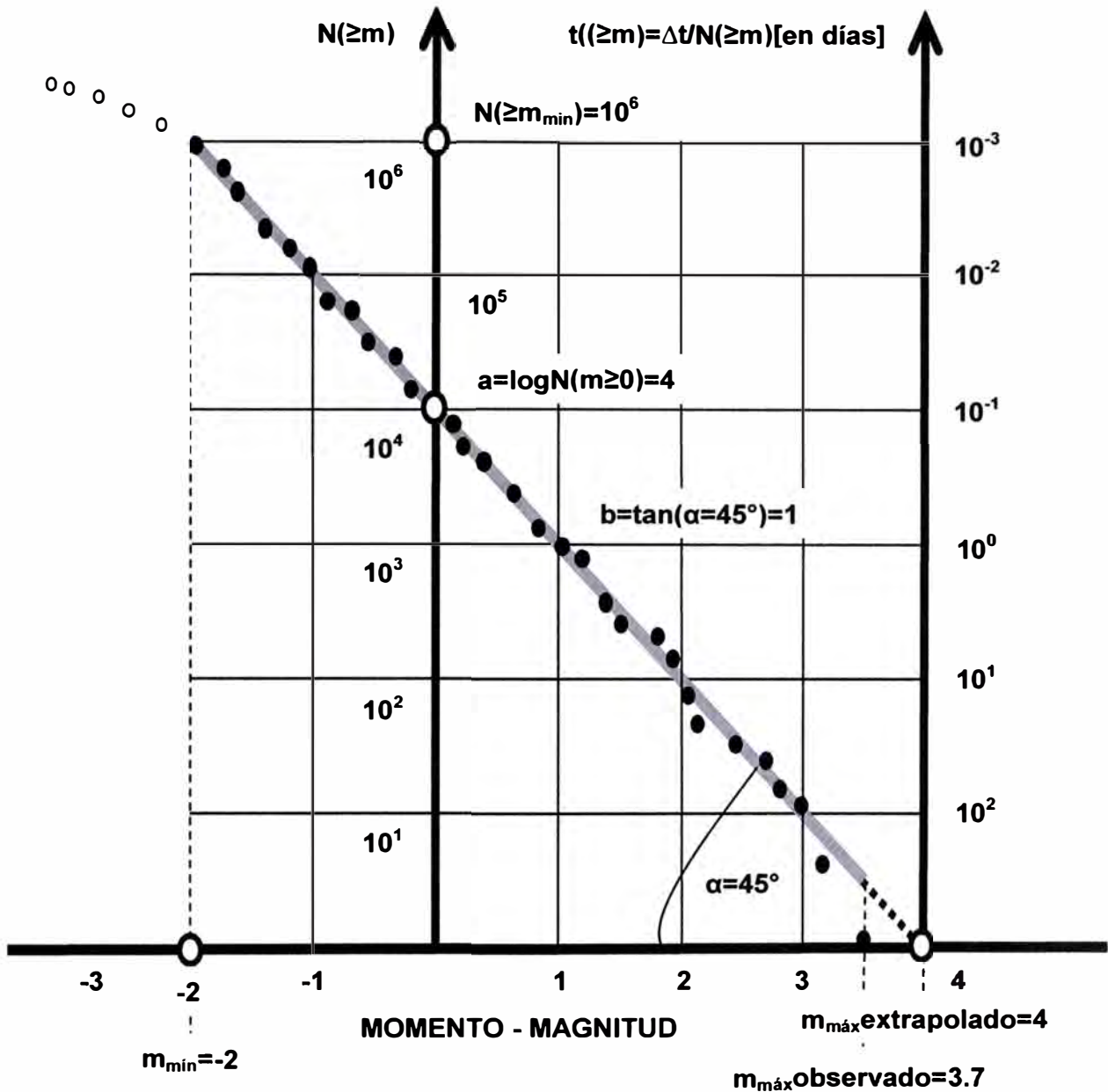


Figura 2.2. Frecuencia - Magnitud acumulada con magnitud mínima = -2.0, $a = 4$ y $b = 1$

2.7 Escala relativa de riesgo sísmico

A partir de los conceptos precedentes, se ha definido un parámetro relativo para cuantificar el riesgo sísmico de una determinada mina, sector, o bloque de minado denominado **Seismic Hazard Scale**, o **SHS** (Escala de Riesgo Sísmico). Este parámetro se define como la magnitud del mayor evento que alguna vez haya ocurrido en la mina como se indica en la ecuación 2.2.

$$\text{SHS} = \text{XMAX} \quad (2.2)$$

Donde:

SHS: Es la Escala de Riesgo Sísmico

XMAX: Es la magnitud del mayor evento registrado

En la Tabla 2.1 se define la relación entre el SHS y el riesgo sísmico relativo:

Tabla 2.1: Riesgo sísmico relativo

SHS	Riesgo Sísmico Relativo
-2	Nulo
-1	Muy Bajo
0	Bajo
1	Moderado
2	Alto
3	Muy alto

Como se puede deducir, esta definición aprovecha la anteriormente expuesta ley exponencial de sismicidad minera, y genera resultados reproducibles independientemente del rango de magnitud adoptado para su evaluación.

La limitación potencial del uso de **SHS** consiste en que, por definición, este parámetro intenta estimar el riesgo sísmico futuro, pero se basa en los registros sísmicos reales del pasado. Aún cuando ambos patrones de comportamiento sísmico, pasado y futuro, pueden aproximadamente coincidir en muchos casos, no hay garantía de que ello siempre ocurra. Situaciones singulares en que ello no ocurre, invalidando su uso potencial, son aquellas en que se anticipa que las condiciones futuras del macizo rocoso, y del método y secuencia de minado, pueden cambiar marcadamente con el tiempo.

2.8 Daño por estallido de roca

El daño resultante al macizo rocoso, y a los sistemas de soporte y refuerzo involucrados, constituye uno de los aspectos más complejos del estudio de estallidos de roca. Ello se debe a la extraordinaria variabilidad y carácter impredecible de estos fenómenos. Sin embargo, como en otros aspectos, los avances sobre esta materia sólo pueden iniciarse a partir de una adecuada y creciente comprensión de los mecanismos de falla asociados a estallidos de roca, y de las condiciones en que ellos son más propensos a ocurrir.

En general, los mecanismos de falla que se presentan pueden describirse en torno a 3 grandes grupos:

Dilatación o expansión de roca: Consiste en el aumento de volumen de la roca producto de su progresivo fracturamiento, y ocurre en sectores sometidos a elevados esfuerzos. Ocasionalmente la roca puede ser proyectada.

Proyección de roca por transferencia de energía sísmica: En un macizo naturalmente fracturado por esfuerzos, la energía cinética puede transferirse a bloques sueltos individuales, con su subsecuente proyección violenta.

Caídas de roca inducidas por vibración sísmica: La vibración dinámica desencaja o destraba bloques originalmente estables, rompiendo al mismo tiempo el soporte o refuerzo, y terminando en caídas gravitacionales, una vez que la onda sísmica se ha atenuado. Ocurre típicamente en excavaciones anchas.

La extraordinaria variabilidad del daño asociado a estallidos de roca se debe principalmente a 3 tipos de causas: Efectos de la fuente, efectos de la trayectoria, y condiciones locales de cada sitio.

Entre los efectos de la fuente podemos citar:

El mecanismo de falla del macizo rocoso, que gatilla el evento.

Las características físicas de tal falla, tales como tamaño y cantidad de energía liberada.

El patrón de radiación de la energía sísmica.

Típicos efectos de trayectoria son:

Atenuación de la energía debido a la presencia de cavidades subterráneas, y a las zonas de fractura en torno a tales cavidades.

Atenuación y disipación de energía que ocurre durante su transmisión, debido a la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso (energía consumida en trabajo o desplazamiento sobre tales discontinuidades).

Efectos asociados a condiciones locales de cada sitio incluyen:

Condiciones geomecánicas locales del macizo rocoso.

Nivel de esfuerzos inducidos en la mina.

Tipos de soporte y refuerzo.

Rigidez local de la mina.

Tamaño, forma, y orientación de los desarrollos mineros locales.

2.9 Geófonos

Son usualmente los sensores elegidos en la mayoría de las aplicaciones de minería, debido a su bajo costo, gran ancho de banda y excelente confiabilidad. Las empresas manufactureras de manera rutinaria fabrican dos tipos de geófonos, con frecuencias naturales de 4.5 Hz y 14 Hz. El geófono de 4.5 Hz tiene un ancho de banda de frecuencia

utilizable de entre 3 Hz y 2000 Hz, pero debe ser instalado dentro de 2 grados de su orientación predefinidas con respecto a la vertical. El geófono de 14 Hz es omnidireccional y puede ser instalado en cualquier ángulo, con un ancho de banda de frecuencia utilizable, de entre 10 Hz y 2000 Hz, La respuesta en baja frecuencia se ilustra en la Figura 2.3, donde la sensibilidad no amortiguada es de 80 V/m/s.

En la Figura 2.4 se ilustra un geófono uniaxial que tiene frecuencia natural de 4.5 Hz integrado con cable, varios geófonos de este tipo son las que se integran al sistema sísmico conjuntamente con los geófonos triaxiales.

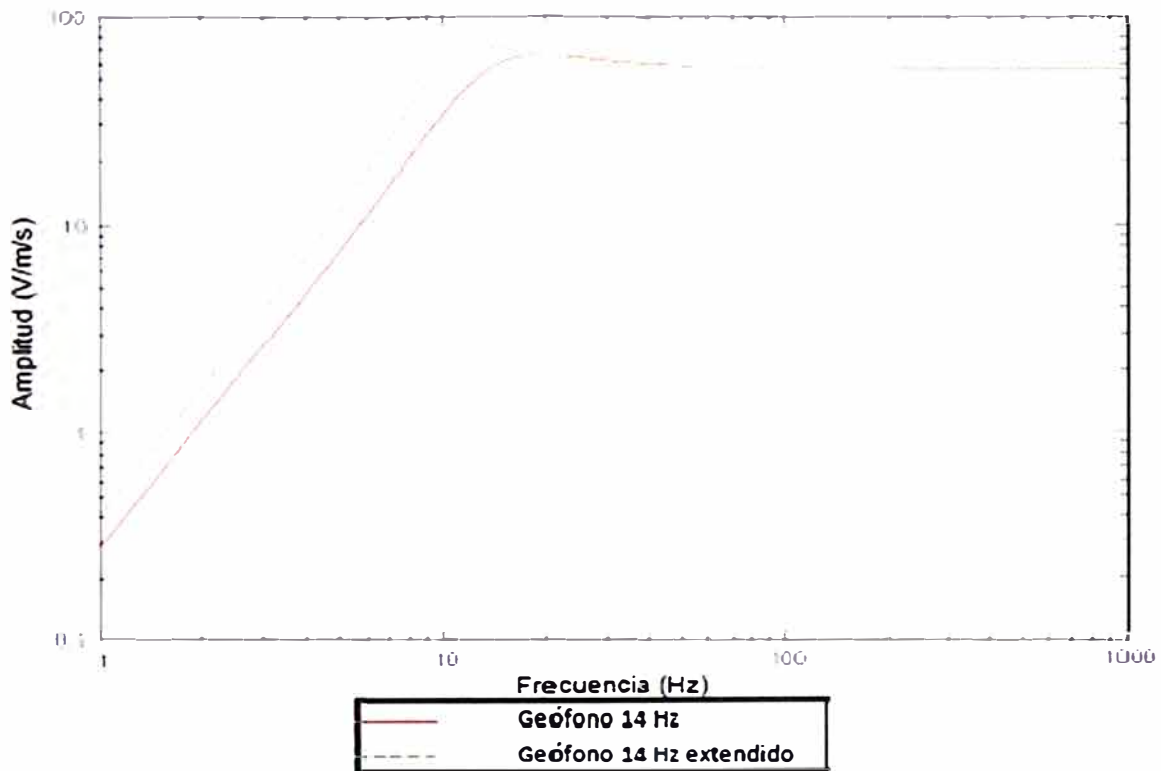


Figura 2.3. Respuesta en baja frecuencia del geófono 14 Hz



Figura 2.4. Geófono uniaxial integrado con cable

El geófono opera como un transductor de velocidad, con el principio de medición de movimiento relativo de piso de una masa inercial. La masa es por razones prácticas suspendido por un resorte, así al final tendremos una variación del clásico problema masa/resorte/amortiguamiento como se muestra en la Figura 2.5.

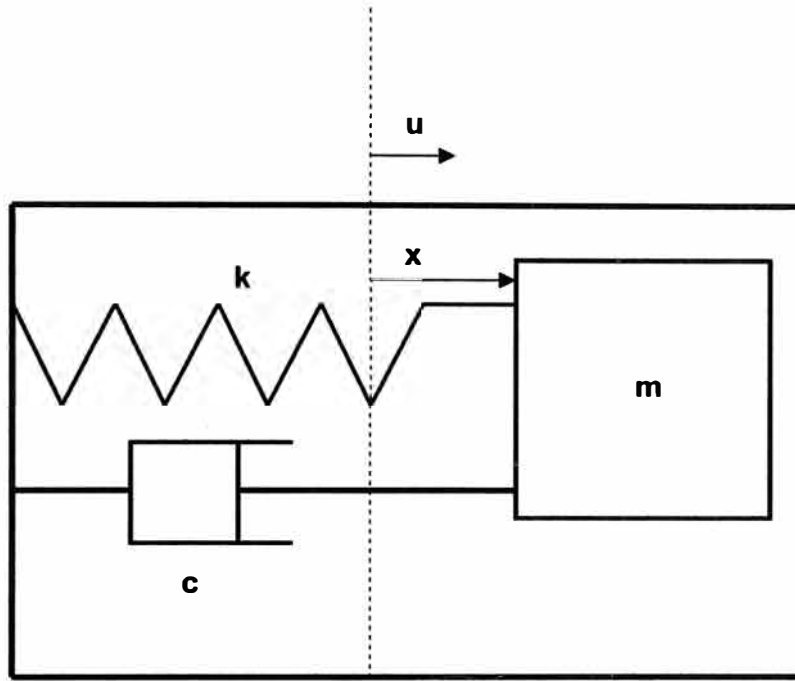


Figura 2.5. Posición de equilibrio de la masa

Aplicando la segunda ley de Newton a la masa. Ver ecuación (2.3).

$$m(\ddot{u} + \ddot{x}) = -kx - c\dot{x} \quad (2.3)$$

Donde:

- \ddot{u} Desplazamiento respecto al suelo a ser medido
- \ddot{x} Desplazamiento de la masa respecto al suelo y caja
- m Masa inercial
- k Constante del resorte
- c Coeficiente de amortiguamiento

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (2.3) se obtiene la función de transferencia definida por.

$$\frac{\bar{x}(s)}{\bar{u}(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2b\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.4)$$

Donde:

- $\bar{x}(s)$ Transformada de Laplace de $x(t)$
- $\bar{u}(s)$ Transformada de Laplace de $u(t)$
- s Variable compleja en la frecuencia

$\omega_n = 2\pi f_n$ la frecuencia natural, $\omega_n^2 = k/m$

b ; Factor de amortiguamiento relativo, $2b\omega_n = c/m$

Cuando $\omega \gg \omega_n$ la función de transferencia es aproximadamente -1. La masa no se mueve con respecto a una estructura inercial de referencia y el movimiento relativo de la caja y la masa perfectamente refleja el movimiento de piso. Este es el clásico modo de operación del sismómetro.

Los geófonos operan en el modo de sismómetro, donde internamente consta de amplificadores, escalamiento de pulsos y filtros pasa bajo como se muestra en la Figura 2.6. El ancho de banda más usado está por encima de la frecuencia natural. La bobina y el magneto las cuales son usadas para detectar el movimiento de la masa inercial produce una salida proporcional a la velocidad. La unidad de sensado produce una razonable cantidad de potencia a baja impedancia para el manejo de los cables. El amortiguamiento es determinado por la resistencia de la carga y cada tipo de instrumento especifica el abrir el circuito de amortiguamiento y una relación para determinación de la corriente de amortiguamiento a una carga dada.

En la Figura 2.6, se ilustra la estructura en diagrama de bloques de un geófono triaxial donde se aprecia las 3 entradas de movimiento sísmico para cada eje, y sus respectivas salidas diferenciales que son recepcionados por el medidor de intensidad de sismo.

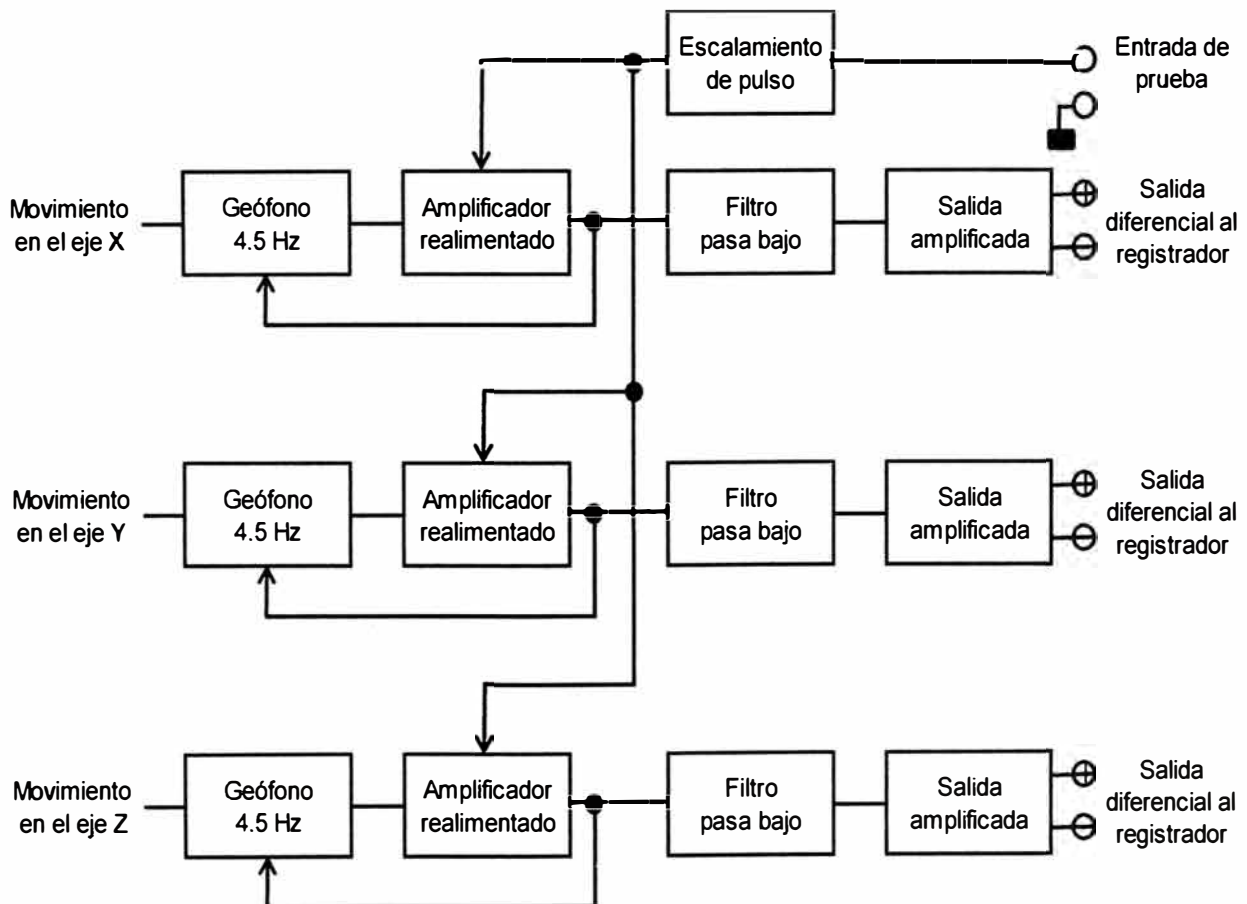


Figura 2.6. Diagrama de bloque interno de un geófono triaxial.

Los geófonos de 4.5 Hz tienen un desplazamiento máximo de 4mm como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Especificaciones básicas del geófono

Tipo Nombre	Frecuencia Natural [Hz]	Sensitividad no amortiguada [V/m/s]	Angulo de inclinación [°]	Limite de desplazamiento [mm]	Rango de frecuencia de uso aproximado [Hz]
G4.5	4.5	28	2	4	3 - 2000

2.10 Medidor de intensidad de sismo (QS)

El Medidor de intensidad de sismo (QS) es diseñado para ser usado en aplicaciones donde la conexión al centro de cómputo esté disponible para proveer tiempos y configuraciones de parámetros cuando son requeridos. Los datos son almacenados internamente y transferidos al centro de cómputo cuando sea solicitado.

El hardware del QS consiste de dos módulos electrónicos principales, un CPU con convertidor A/D y una tarjeta modem como se muestra en la Figura 2.7. Estos dos módulos son conectados juntos vía slot de conexiones los cuales también sirven como un punto de terminación para las conexiones externas. Se conecta un módulo de alimentación que es fijado al QS con opción de usar fuente DC. Ver características técnicas del QS en el anexo A.

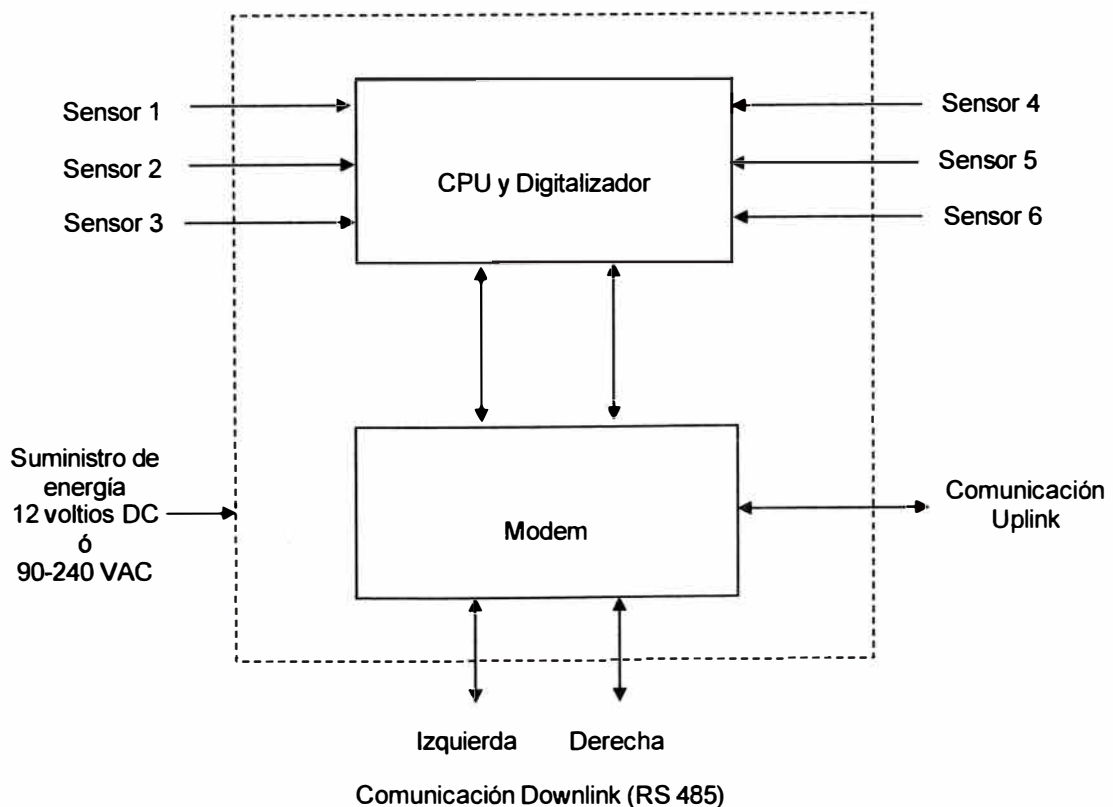


Figura 2.7. Diagrama de bloques del QS

La tarjeta contiene el CPU y todos los periféricos requeridos para proveer la funcionalidad del QS. La tarjeta tiene una memoria RAM, memoria flash, puertos seriales y FPGA junto con los convertidores A/D. La tarjeta modem es usado en el QS cuando se conecta a la red RS-485. El modem soporta dos conexiones de enlace (enlace izquierdo/enlace derecho) para la conexión de otro QS o bus RS-485.

El cableado para el uplink está adecuado para ser usado con comunicaciones RS-485 o con modulación FSK como presentado en la Tabla 2.3, dependiendo del modem que se ha seleccionado, en este trabajo se utiliza comunicación RS-485.

Tabla 2.3: Comunicación uplink

PLUG QS PARA COMUNICACIÓN UPLINK		
COLOR	RS-485	FSK
ROJO	Tx/Rx	Tx
AZUL	Tx/Rx	Tx
AMARILLO	Sin conexión	Rx
VERDE	Sin conexión	Rx
TRENZA	Pantalla	Pantalla

El cableado para el downlink (izquierda/derecha) es solamente usado para comunicación RS-485 como se presenta en la Tabla 2.4, si hay otro QS puede ser conectado al bus RS-485.

Tabla 2.4: Comunicación downlink

PLUG QS PARA COMUNICACIÓN DOWNLINK		
COLOR	RS-485	FSK
ROJO	Tx/Rx	Tx
AZUL	Tx/Rx	Tx
TRENZA	Pantalla	Pantalla

2.11 Determinación de P y llegada de la onda S

Las funciones de P y S permiten al usuario elegir manualmente la posición de llegada de la onda P y S en un sismograma seleccionado. Se estima la llegada de S usando un filtro de polarización y la función característica. Los procedimientos implementados para la detección de la fase se utilizan información de tiempo de viaje. La onda S es el que normalmente tiene la energía predominante con respecto a la onda P. El desplazamiento

para las ondas P y S se caracteriza porque van en dos direcciones Longitudinal para la onda P y transversal para la onda S. Referencia(Seth Stein and Michael Wysession, "An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure", paginas 56 - 63, 2007).

2.11.1 Ubicación

El cálculo de la ubicación de eventos se realiza automáticamente cuando se realice la adquisición de datos del evento. Numerosos métodos confiables han sido desarrollados para calcular automáticamente la ubicación de origen mediante llegadas de las ondas P y S o diferencias de S-P que se complementan con indicaciones hacia la fuente y azimut. La exactitud requerida para la localización es de aproximadamente 3% de la distancia media del hipocentro de la fuente a las estaciones usadas en el procedimiento de la localización para una configuración razonable de estaciones en lo referente a un evento. Una ubicación de precisión más alta se logra con procedimientos de ubicación relativa.

2.11.2 Parámetros de la fuente

El análisis espectral es una técnica estándar usada en estudios de sismos locales. La mayoría de las teorías sísmicas predicen que el espectro del campo lejano sigue siendo constante en las frecuencias bajas y decae en frecuencias más altas. Los parámetros de fuente se calculan del espectro de las ondas P y S. Las técnicas espectrales de estimación se utilizan para minimizar el efecto de ventanas de datos. El ruido y el efecto de sitio causado por la geología local se reducen por apilamiento de espectros individuales. Los espectros de sismogramas individuales y del espectro apilado se corrigen para el efecto de la atenuación. Los parámetros de atenuación se calculan para cada acontecimiento independientemente. sin embargo se recomienda elegir la opción de estimar la atenuación mediante un grupo de eventos. Se calculan los siguientes parámetros: Momento sísmico escalar, magnitud local, energía irradiada de P y S. En la Figura 2.8, se ilustra las formas de onda de las señales P y S. Los parámetros que son utilizados para la detección del evento son la distancia y el tiempo de llegada que se consigue con el disparo de calibración como se explica en la sección 4.1.1 del capítulo IV.

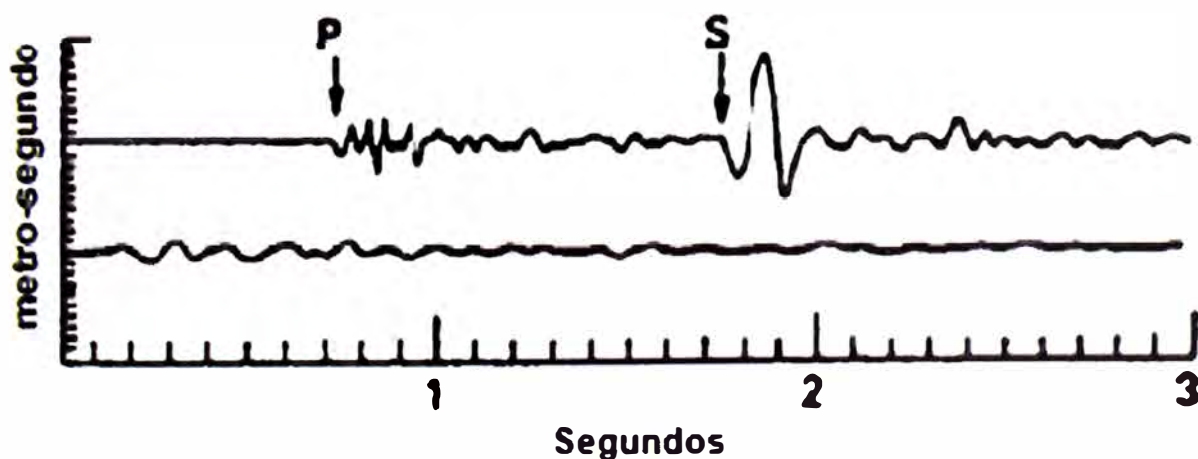


Figura 2.8. Formas de onda de las señales P y S

2.12 Teoría de muestreo y frecuencia de Nyquist

Una señal sísmica es una función continua del tiempo. Generalmente el intervalo de muestreo utilizado en eventos sísmicos es de 1 a 4 ms, el cual depende de la resolución vertical que se desee obtener del terreno, la señal digitalizada es una muestra discreta de la señal continua. El teorema de muestreo permite asegurar que no se pierda ninguna información al momento de digitalizar la señal analógica, si la frecuencia de muestreo es mayor que el doble del componente de frecuencia más alto de la onda que está siendo muestreada.

La mitad de la frecuencia de muestreo es llamada frecuencia de Nyquist. Para un período de muestreo de 2 ms la frecuencia de Nyquist es igual a 250 Hz. A medida que este intervalo aumenta, la frecuencia disminuye y por ende también el ancho de banda de la señal, si el intervalo de discretización es demasiado corto, la superposición de las señales en el espacio de frecuencia corrompe la forma de la señal original como se ilustra en la figura 2.9.

$$f_s \geq 2 \cdot f_{\text{máx}} \quad (2.5)$$

Si el muestreo se efectúa exactamente en los intervalos de Nyquist basta para que no haya ningún tipo de superposición entre las copias de la señal analógica original. Al fenómeno de solapamiento de la señal original durante su discretización se le conoce como aliasing. Para evitar esto se filtra la señal con un filtro pasabajo antes de discretizarla de tal manera que las componentes de alta frecuencia que no sean de interés quedan eliminados desde el principio. La aplicación del muestreo se realiza en la sección 4.1 del capítulo IV.

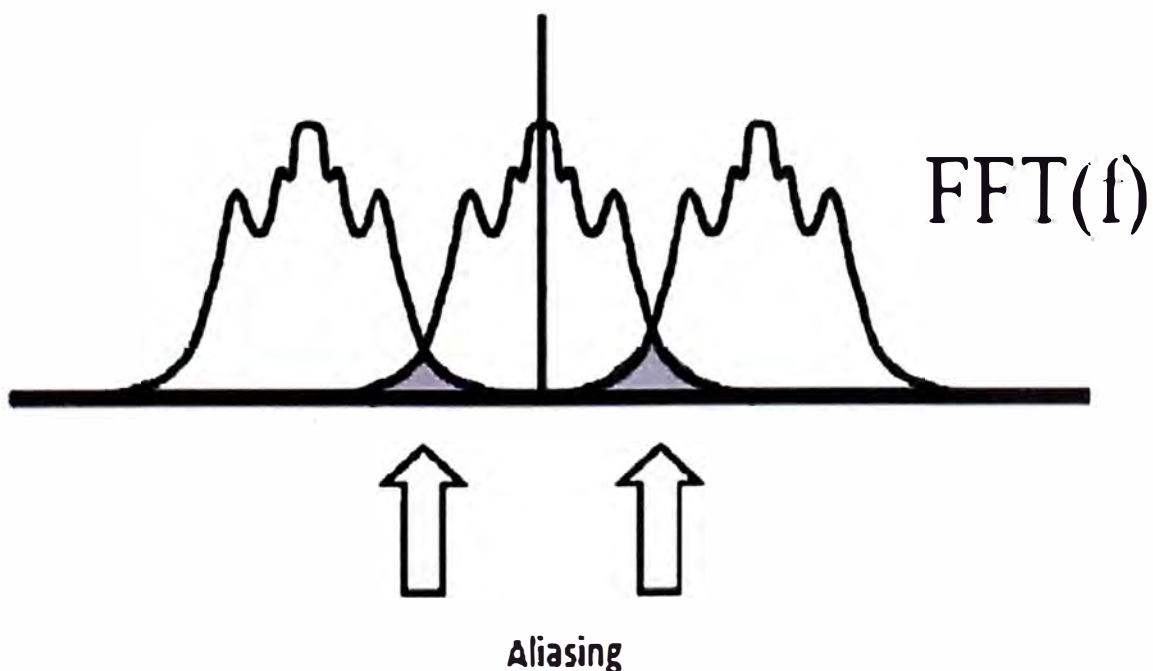


Figura 2.9. Superposición de ondas - Aliasing

CAPITULO III METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 Alternativa de Solución

La mejor alternativa para la detección de sismos, consiste en instrumentar la mina con geófonos para que puedan transmitir las ondas de los eventos sísmicos que sucedan cerca de las labores en los diferentes niveles de la mina.

3.2 Solución del problema

Para la solución del problema se dispondrá de geófonos en 3 niveles de la mina en donde las labores se ejecutan de manera permanente, la configuración de instalación de los geófonos se ilustra en la Figura 3.1, se consideran ocho geófonos en el nivel -770, cuatro geófonos en el nivel -970 y diez geófonos en el nivel -1170, esta distribución en cantidades incluido los medidores de intensidad de sismo (QS) se indican en la Tabla 3.1. En la Figura 3.1 se visualiza los tres niveles de la mina, nivel -770 (línea verde), -970 (línea roja) y -1170 (línea azul) en donde se distribuyen e instalan los geófonos, el ducto vertical de color celeste representa el pique por donde el personal se desplaza por medio de ascensores a los diferentes niveles de la mina, el serpentín en color plomo representa la rampa por donde se desplazan los equipos motorizados a los diferentes niveles de la mina.

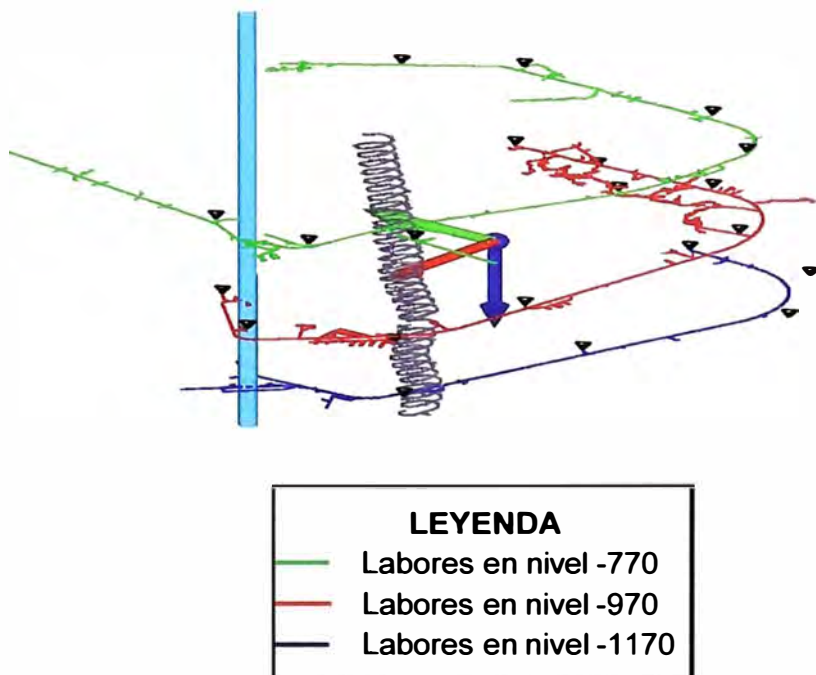


Figura 3.1. Distribución de geófonos en la mina.

Tabla 3.1. Cantidad de geófonos y QS por nivel

NIVEL	GEOFONO UNIAXIAL	GEOFONO TRIAXIAL	QS
-770	6	2	1 y 2
-970	3	1	3
-1170	9	1	4 y 5

3.2.1 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA SÍSMICO

El diagrama se presenta en base a la Tabla 3.1 del cual los geófonos uniaxiales y triaxiales son conectados a sus respectivos medidores de intensidad de sismo (QS) que se explica en la sección 2.10 del capítulo II. Los QS reciben la señal para ser enviadas al conversor de señal MR485 (Convertor RS-485/RS-232) y las deriva a la red LAN como se ilustra en la Figura 3.2. El ruido es permanente en las labores, siendo filtrada por un filtro pasabajo no influyendo significativamente en la señal mencionada. A través de un cable de fibra óptica se envía las señales a la computadora de procesamiento de datos sísmicos en donde se analizan los eventos y se brindan las medidas de control a las operaciones.

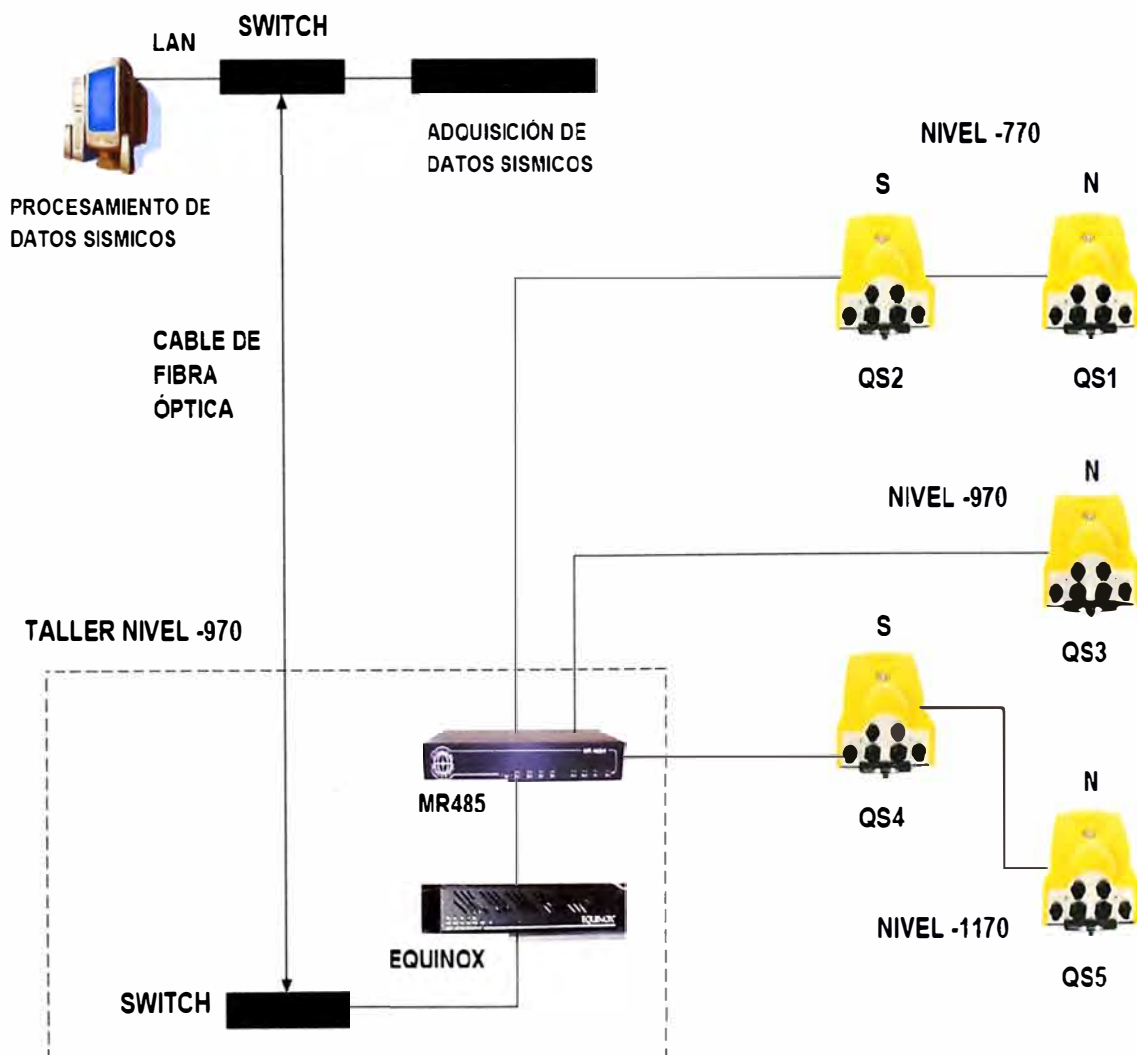


Figura 3.2: Diagrama de bloque del sistema sísmico

3.2.2 Comunicación del sistema

Los QS son conectados al servidor de eventos sísmicos vía sistema de comunicación basada en RS-485. El diagrama de bloques de esta comunicación es mostrada en la Figura 3.2 como conexión LAN. Ver las características del conversor RS-485/RS-232 (MR485) en el anexo C.

El sistema es basado en bus RS-485 el cual conecta todas las unidades de QS al servidor usando la infraestructura disponible en la mina. Cada QS actúa como un nodo en un bus y pueden ser usados por unidades de QS más abajo en cadena conectados al bus, es decir una serie de unidades de QS pueden ser conectadas juntos para formar el sistema de monitoreo sísmico.

El bus RS-485 corre en modo half duplex y así solo requiere de un par de cables para la conexión. El sistema instalado en la mina usa cables de cobre para el bus RS-485, este es conectado al MR485 el cual lo convierte a RS-232 y es enviado al servidor de eventos sísmicos vía red LAN.

3.2.3 Instalación del geófono

Para la instalación se coloca el geófono en varillas que van numerados en correcto orden para ordenar y facilitar la instalación. Se mide la resistencia a través de cada uno de los tres componentes del geófono, si la resistencia es incorrecta en algún componente no se debe realizar la instalación. Para una lectura correcta la resistencia de la bobina debe indicar 375 ohmios aproximadamente tal como se ve en la Figura 3.3, si la lectura es incorrecta se espera a que mida corto (cerrado 0 ohmios) o circuito abierto de unos cuantos mega ohmios.



Figura 3.3. Resistencia en terminales del geófono

Se debe revisar que el agujero realizado no obstruya cuando se instale la varilla antes de instalar el geófono. Se refuerza los últimos 2 metros de la tubería flexible con alambre acerado de tal manera que no quede torcido como se ilustra en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Reforzamiento de la tubería flexible

Se hace una muesca en la parte superior de la tubería para que presione ingresando la parte superior al hueco, el corte se debe realizar a un ángulo de 45°. Se debe sujetar la tubería sobresalido 2 metros por debajo del geófono. Se debe realizar con cinta aislante ajustando firmemente alrededor del geófono con la tubería como se ve en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Aseguramiento del geófono con la tubería.

Se instala el geófono con la cabeza hacia el hueco, se debe presionar constantemente en todo el tiempo que demore su ingreso, para realizar este trabajo se requiere de dos personas, la primera persona sujeta firmemente la varilla hacia el hueco, cuando la varilla ha ingresado al hueco una distancia suficiente, la segunda persona empata la siguiente varilla con el primero como se aprecia en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Inserción del geófono

La primera persona empuja la varilla cuidadosamente dentro del hueco alineándolo hacia el norte marcado de la varilla, cuando el instrumento se ha insertado unos 30 cm se debe alinear el instrumento hacia el norte marcado, este trabajo es realizado por la primera persona rotando la varilla hasta que el alineamiento se consiga, la segunda persona mantiene el cable del geófono y la tubería firmemente en sus manos mientras la primera persona mantiene presión en la dirección de instalación de la varilla. La profundidad final que se inserta el geófono es de 10m dentro de la roca, la inserción de la varilla se ilustra en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Inserción del geófono con la varilla

Cuando el geófono y la tubería se encuentren ya instalados y han sido orientados, se debe retirar cuidadosamente la varilla separándolo del geófono como se ilustra en la Figura 3.8. Los resortes del geófono lo mantendrán fijo en las paredes del hueco.



Figura 3.8. Retiro de la varilla

La manera más fácil y para el efectivo tapado es realizado con una madera cilíndrica agujereada para el pase de la tubería y el cable del sensor como se ilustra en la Figura 3.9. Se moja algunos trapos con mezcla de agua y cemento y se colocan dentro del hueco como una tapa de collar.



Figura 3.9: Madera cilíndrica para tapado del hueco.

Dejar un tiempo de secado de 24 horas para que endurezca antes de bombear la mezcla en espacio vacío interno, esto asegurará que el sistema esté disponible sin oponerse a la presión de bombeo, para un mejor tapado, la relación de agua y cemento debe estar entre 0.45 y 0.50.

3.2.4 Configuración del sistema

Cada medidor de intensidad de sismo (QS) tiene un único número de serie y está asociado con un id dentro del sistema, el id es único cuando se usa en la comunicación con los QS. Cada QS puede monitorear hasta seis sensores sísmicos uniaxiales o 2 sensores sísmicos triaxiales.

Se asigna los id de los geófonos correspondiente a los QS provenientes de los 3 niveles de la mina tal como se ilustra en la Figura 3.10, las tres entradas al conversor MR485 (RS-485/RS-232) son nombradas como Leg 1 (Corresponde al nivel -770), Leg 2 (corresponde al nivel -970) y Leg 3 (Corresponde al nivel -1170) de un total de 8 puertos disponibles. Del T1 al T4 son referidos a los geófonos triaxiales, y del U1 al U18 son referidos a los geófonos uniaxiales.

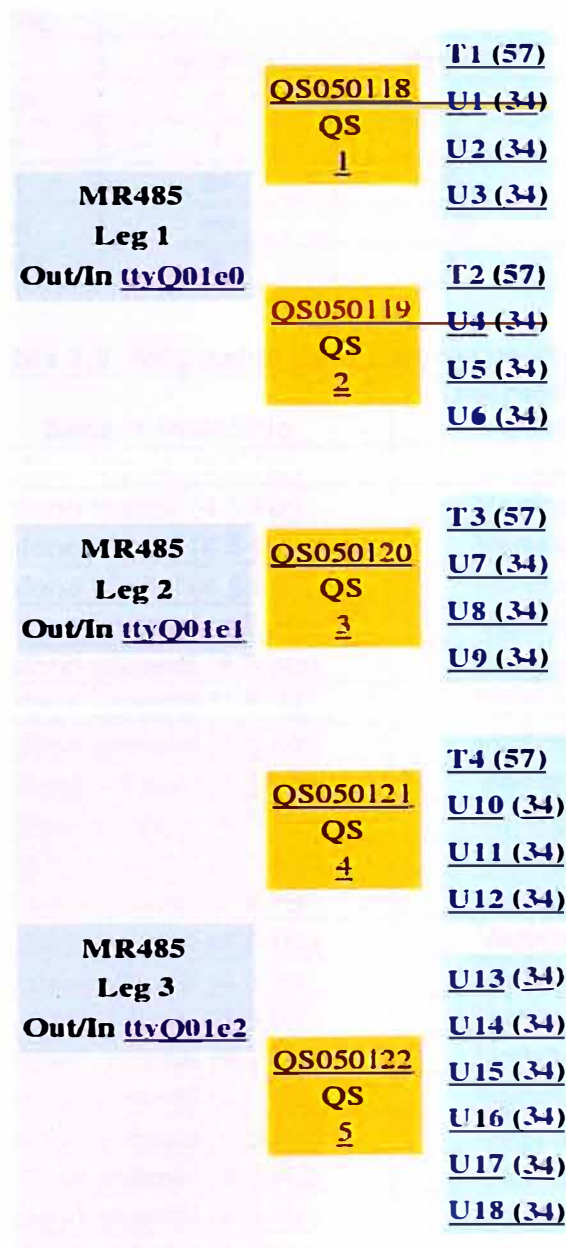


Figura 3.10. Asignación de id a los geófonos

El sistema es conectado a un conversor MR485 de 8 puertos, el cual opera en modo half duplex a velocidades que varían desde 9600 hasta 115200 bits por segundo. La configuración para los puertos se definen en la Tabla 3.1, así como los id para los geófonos se muestran en la Tabla 3.2. Los sensores se instalan en forma vertical hacia arriba y tienen una tolerancia de 2° de inclinación como máximo, se asigna un nombre a cada puerto correspondiente de cada uno de los tres niveles de la mina para tener la identificación al momento de los lugares donde ocurran los eventos sísmicos.

Tabla 3.1. Configuración puertos en el MR485

Descripción	Leg 1	Leg 2	Leg 3
Nombre del puerto	ttyQ01e0	ttyQ01e1	ttyQ01e2
Tipo	Entrada/Salida	Entrada/Salida	Entrada/Salida
Velocidad	115200	115200	115200
Bits de parada	1	1	1
Paridad	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Bits de datos	8	8	8
Transmisor	1	2	3
Half-duplex	Si	Si	Si
Transmisión	10	10	10
Sincronización	5	5	5

Tabla 3.2. Asignación de id para los geófonos

Site id	Nombre	Sensor instalado	Orientación del sensor	Sensor id
1	T1	Geófono triaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	57
2	T2	Geófono triaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	57
3	T3	Geófono triaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	57
4	T4	Geófono triaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	57
5	U1	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
6	U2	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
7	U3	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
8	U4	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
9	U5	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
10	U6	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
11	U7	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
12	U8	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
13	U9	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
14	U10	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
15	U11	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
16	U12	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
17	U13	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
18	U14	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
19	U15	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
20	U16	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
21	U17	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34
22	U18	Geófono uniaxial (4.5 Hz)	Vertical UP	34

3.2.5 Conexión de los geófonos con los QS

Se presenta el diagrama de conexiones del sistema de geófonos con su bornera de conexiones, medidores de intensidad de sismo (QS) con su bornera de conexiones, y el conversor MR485. Conexiones QS Sismico 1 y Sismico 2 son las entradas para los geófonos en el QS de tipos uniaxial y triaxial. La comunicación downlink se utiliza para conectar un QS con otro en el bus RS-485. La comunicación uplink se utiliza para conectar el QS con el conversor MR485 como se ilustra en la figura 3.11.

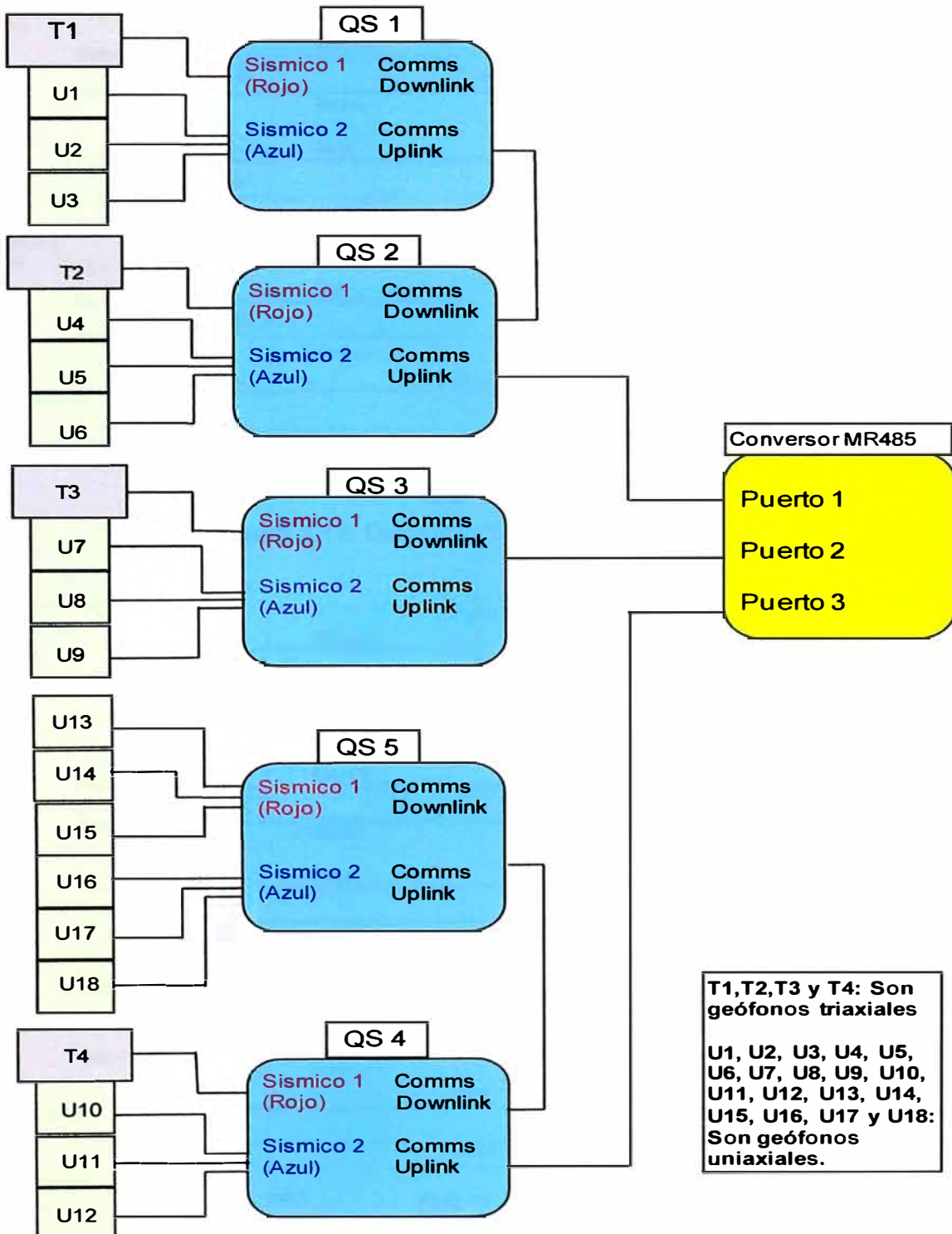
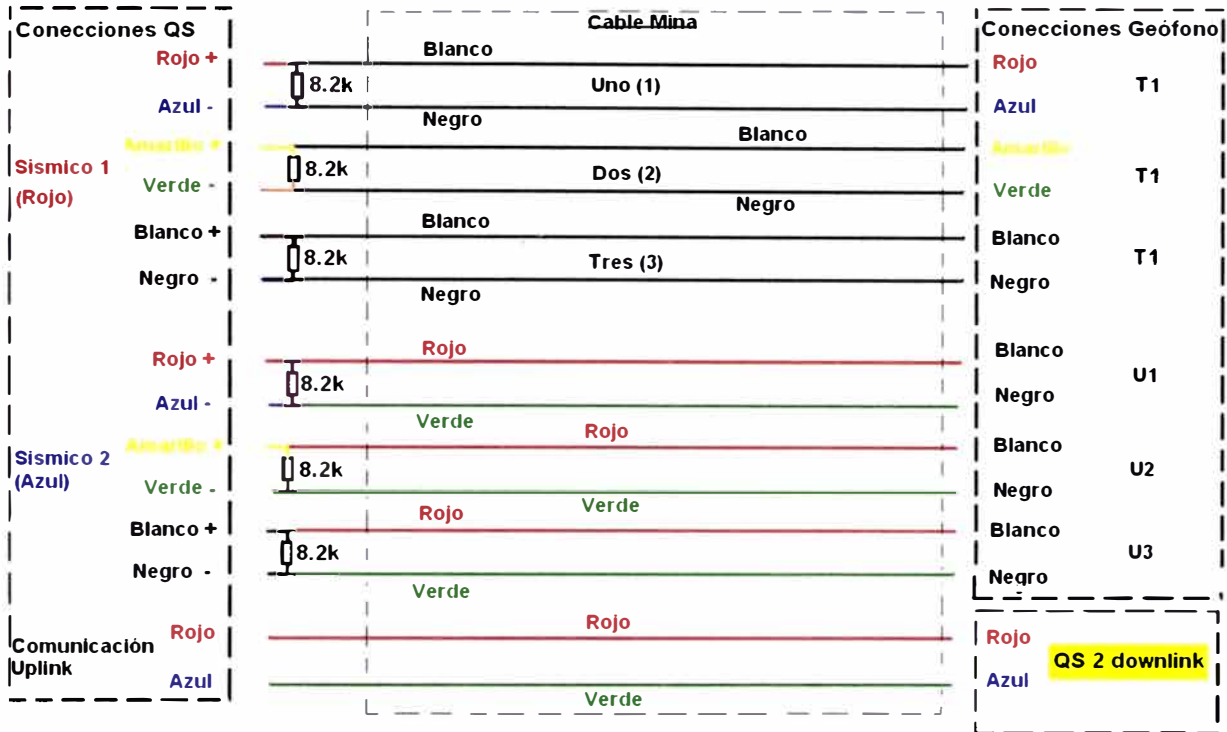


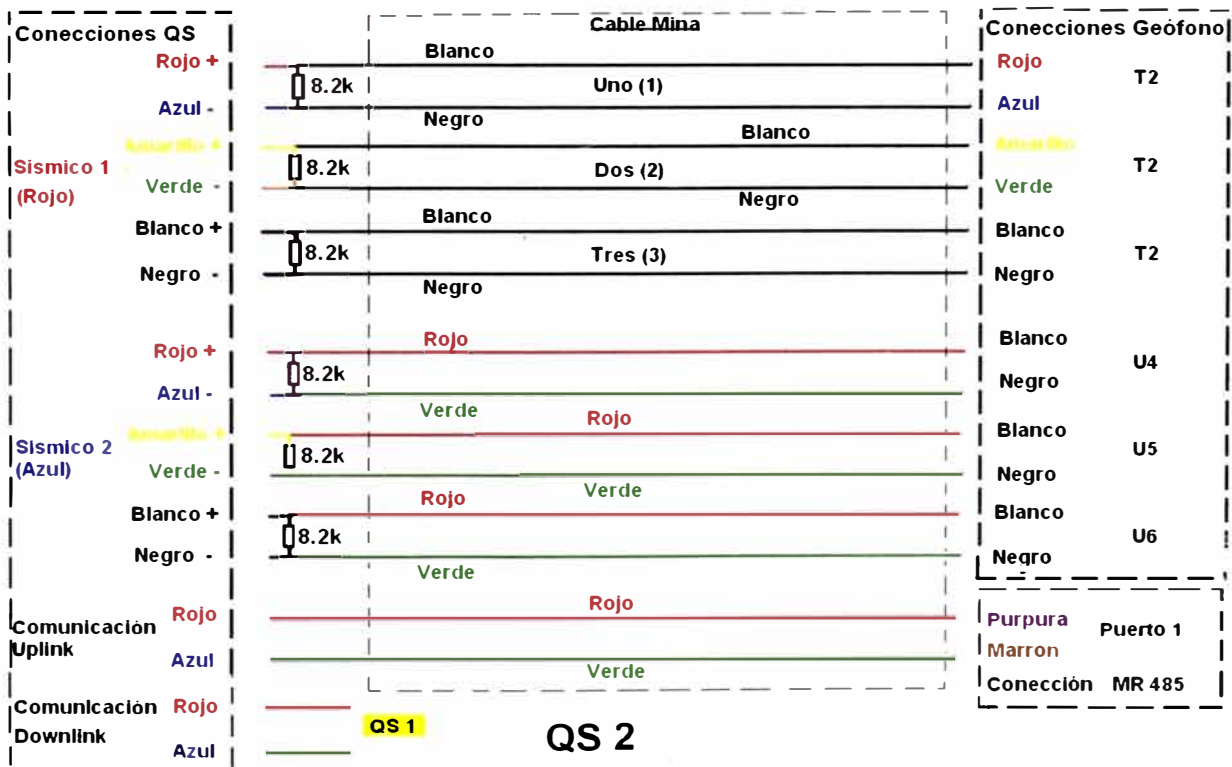
Figura 3.11. Diagrama de conexiones de los geófonos, QS y conversor MR485

La conexión eléctrica para cada medidor de intensidad de sismo (QS) son como se muestran en las figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16. El cable mina es el cableado entre el geófono, QS y las comunicaciones en el bus RS-485.



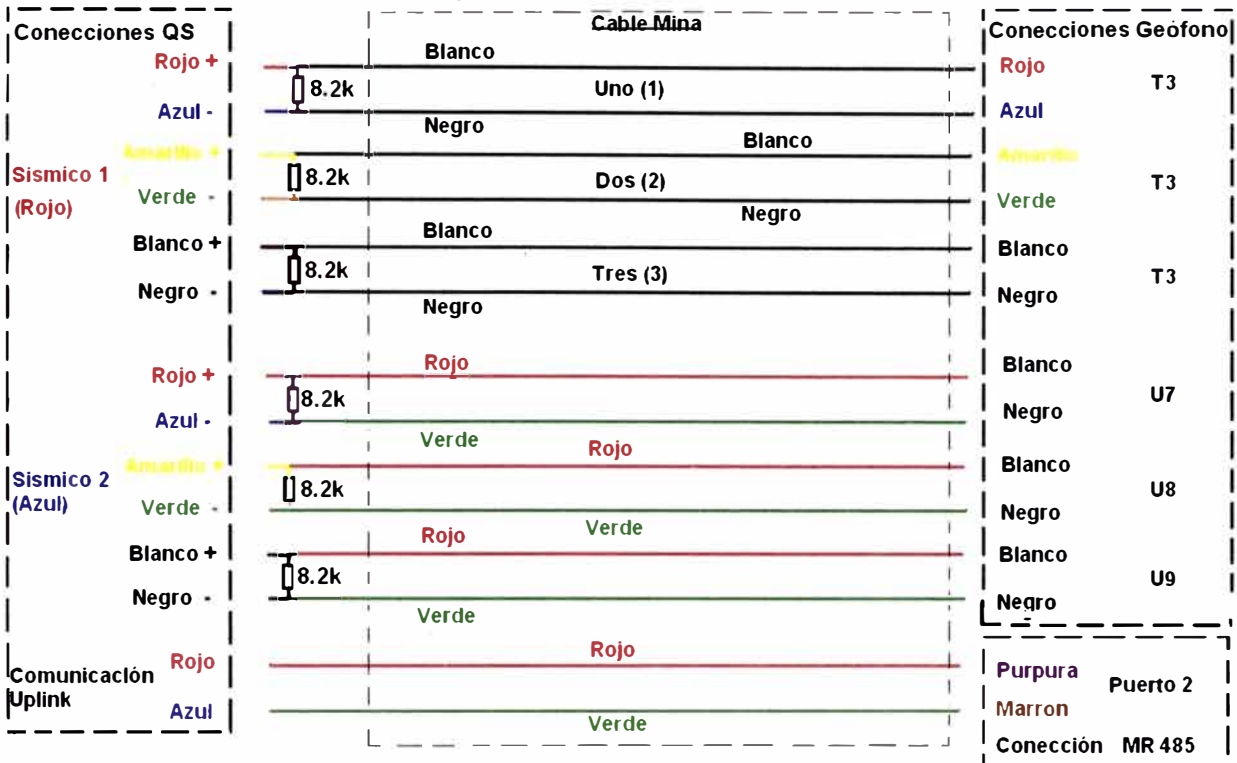
QS 1

Figura 3.12. Diagrama de conexión del QS 1



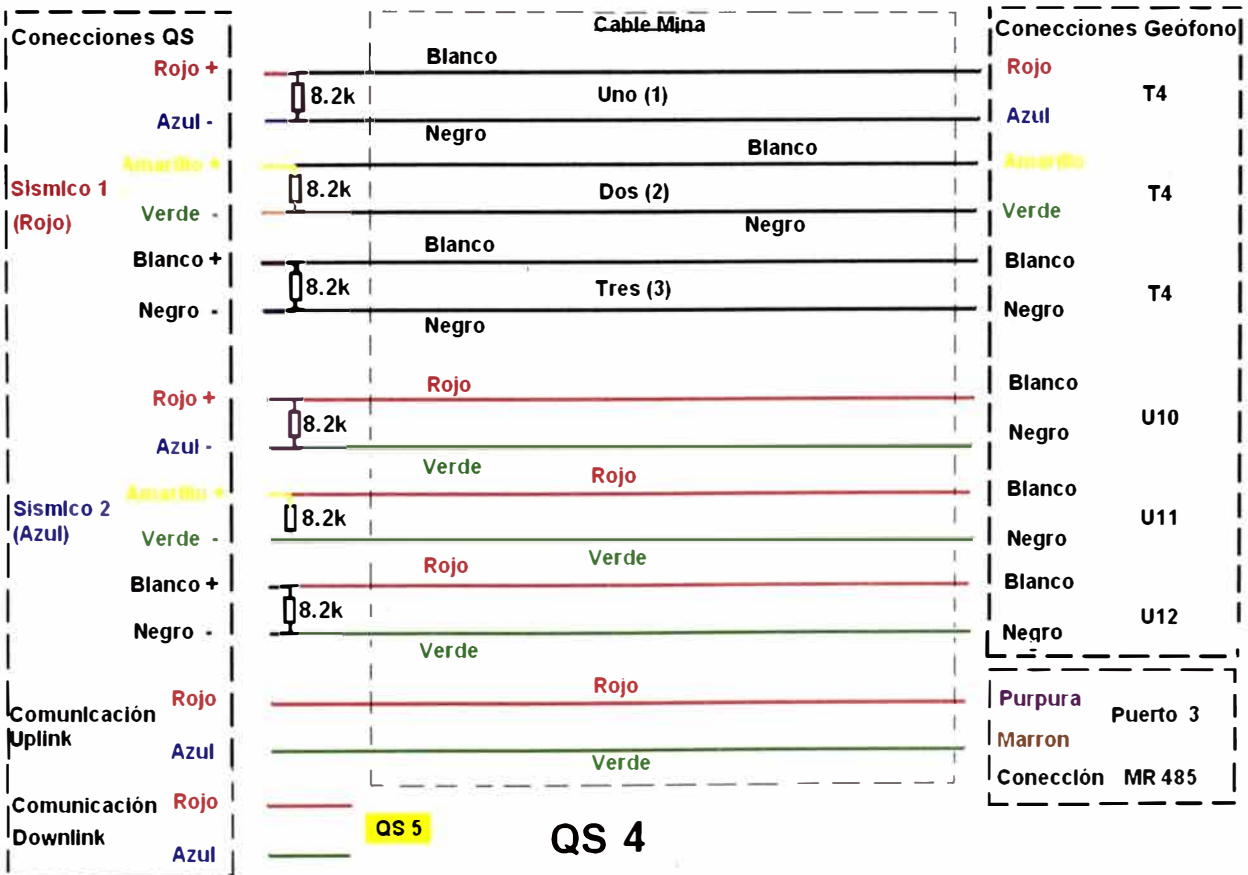
QS 2

Figura 3.13. Diagrama de conexión del QS 2



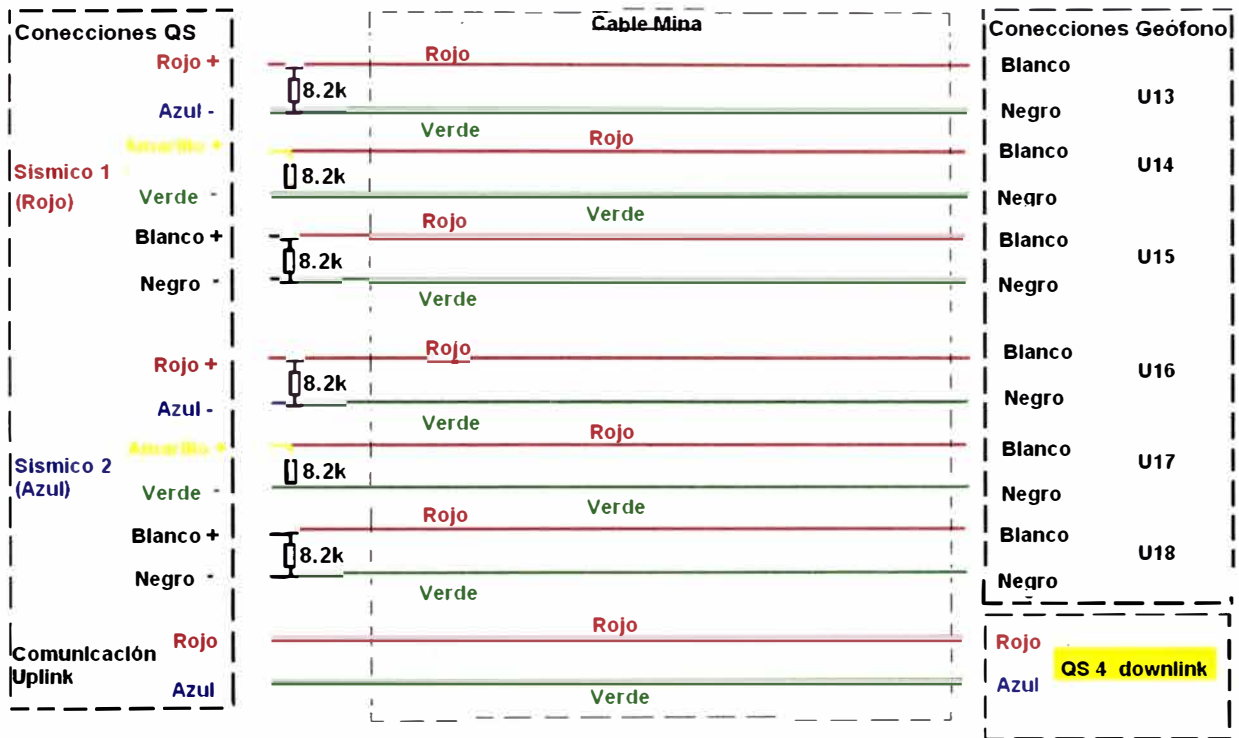
QS 3

Figura 3.14. Diagrama de conexión del QS 3



QS 4

Figura 3.15. Diagrama de conexión del QS 4



QS 5

Figura 3.16. Diagrama de conexión del QS 5

3.3 Recursos humanos y equipamiento

Para poder implementar el sistema de monitoreo de eventos sísmicos se requiere primero realizar perforaciones en el macizo rocoso para la instalación de cada geófono utilizando equipos de bajo perfil para la perforación, mano de obra especializada para la instalación de los geófonos en donde se incluye materiales de instalación, y equipos tales como medidor de intensidad de sismo (QS), modem, cableado en general incluyendo el de fibra óptica, switches para la red LAN y Servidor.

CAPITULO IV ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis descriptivo de los eventos sísmicos

En las labores de extracción de mineral de interior mina los eventos sísmicos suceden diariamente, varios de estos eventos son reportados por el personal que escuchan los ruidos en el macizo rocoso, y la gran mayoría detectados por el sistema de monitoreo sísmico implementado que permite determinar zonas críticas de caídas de rocas.

Cuando sucede un evento sísmico en una zona, se produce el fracturamiento de la roca que tiene como consecuencia un desplazamiento en longitud y volumen aparente, la sumatoria de los volúmenes desplazados en cada evento sísmico determina el volumen aparente acumulativo, este parámetro con la acumulación de energía en la roca nos permite determinar el tiempo en que probablemente se pueda producir una liberación de energía grande.

Las ondas que se emiten por el fracturamiento pasan a través de la roca hasta llegar a los diferentes geófonos instalados, debido a que los geófonos se encuentran a diferente distancia de la fuente, los tiempos de llegada de la ondas son también diferentes, por esto cada geófono determina su radio de acción formando una esfera de donde pudo haberse producido el evento sísmico, las esferas que genera cada geófono que ha detectado el evento se intersectan determinando un pequeño volumen que será el lugar del evento, para poder determinar de manera más eficiente el lugar del evento sísmico, los geófonos son instalados alrededor de las operaciones de extracción de mineral. Una vez conocido el lugar de los eventos sísmicos se van almacenando diariamente los datos de lugar, magnitud y tiempo. Con la información de la base de datos se analiza el riesgo sísmico para un determinado rango de valor de magnitud teniendo como resultado la estimación de la frecuencia con que ocurren eventos sísmicos de determinada magnitud. También se analiza la relación que existe entre los eventos sísmicos con la voladura determinando en que horas del día aumenta la magnitud del evento sísmico para realizar las medidas de control evitando los accidentes en general de los trabajadores como de los equipos de operación.

El movimiento de terreno se representa como una forma de onda que es detectado por el sistema de monitoreo de eventos sísmicos, este movimiento es convertido en una señal eléctrica analógica para luego ser amplificada. La señal de la onda sísmica pasa

por etapas de acondicionamiento, muestreo y conversión de señal.

La señal de la onda sísmica pasa por la etapa de acondicionamiento, en esta etapa a la señal se le aplica un filtro pasaje para disminuir el efecto del ruido y para limitar la banda del sistema, además que el filtro compensa la fase, en la Figura 4.1 se ilustra el circuito pasabajo de frecuencia de corte 40 KHz.

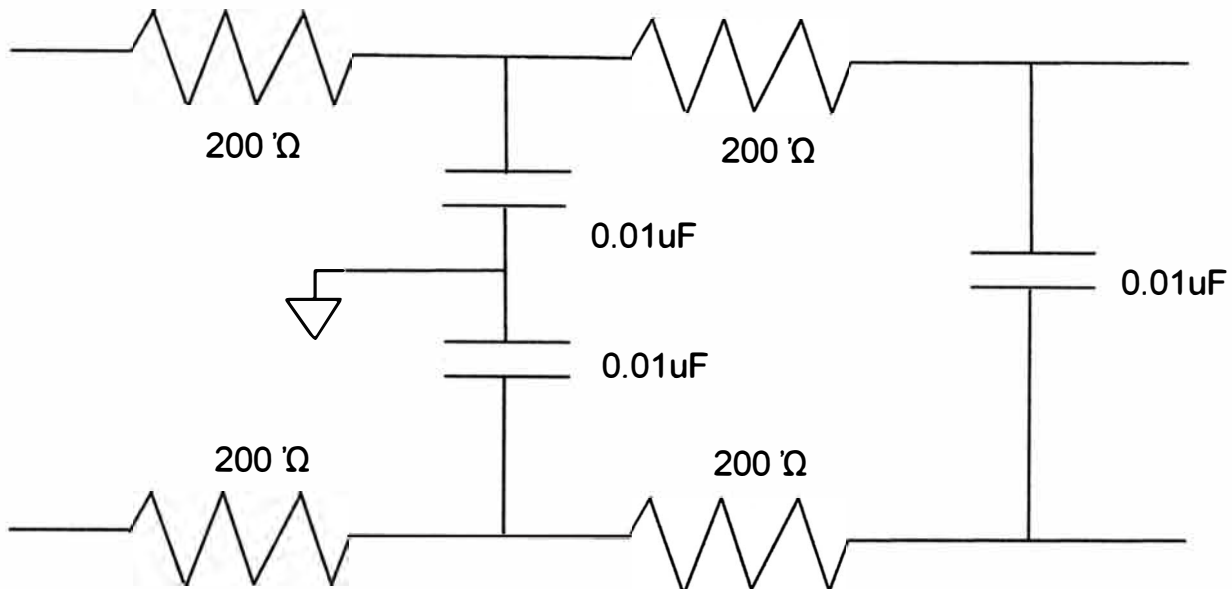


Figura 4.1. Filtro diferencial pasabajo

La señal pasa por la etapa de amplificación para luego realizar la conversión analógico - digital, la señal pasa por un muestreo en donde se asegura evitar el traslape de las ondas. Al fenómeno de solapamiento de la señal original durante su discretización se le conoce como aliasing, esto se explica en la sección 2.10 del capítulo II. Para evitar esto se filtra la señal con un filtro pasabajo antes de discretizarla de tal manera que los componentes de alta frecuencia que no sean de interés queden eliminados desde el principio. Se asegura que la frecuencia de muestreo sea mayor o igual a dos veces la frecuencia máxima de la señal. En la Figura 4.2 se ilustra la discretización de la señal.

La implementación del módulo conversor analógico digital ADC tiene como objetivo principal mejorar las características del ruido del sistema completo y eliminar los problemas de distorsión y acoplamiento de la señal. Se utiliza el conversor AD7710 debido a su gran margen dinámico, como microcontrolador se tiene un circuito PIC16F84. La operación del conversor que se ilustra en la Figura 4.3 se controla escribiendo en un registro de control la frecuencia de muestreo, el formato de los datos y la ganancia., Además tiene la posibilidad de realizar calibraciones sin interrumpir el proceso de medida. Se utiliza un cristal de 9.8304 MHz. Para poder obtener frecuencias de muestreo exactas de 200 Hz, 100 Hz y 50 Hz. El microcontrolador utiliza un cuarzo de 357 MHz.

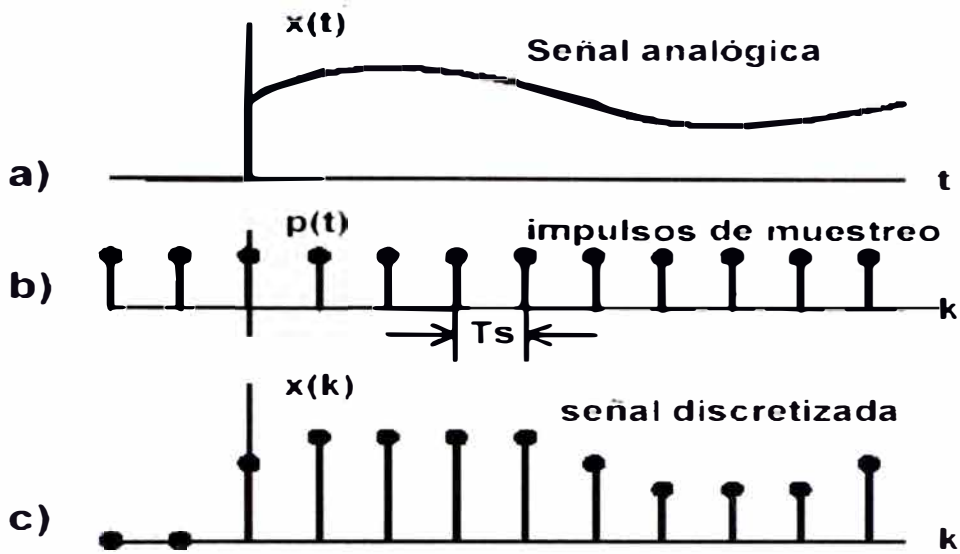


Figura 4.2. Proceso de muestreo

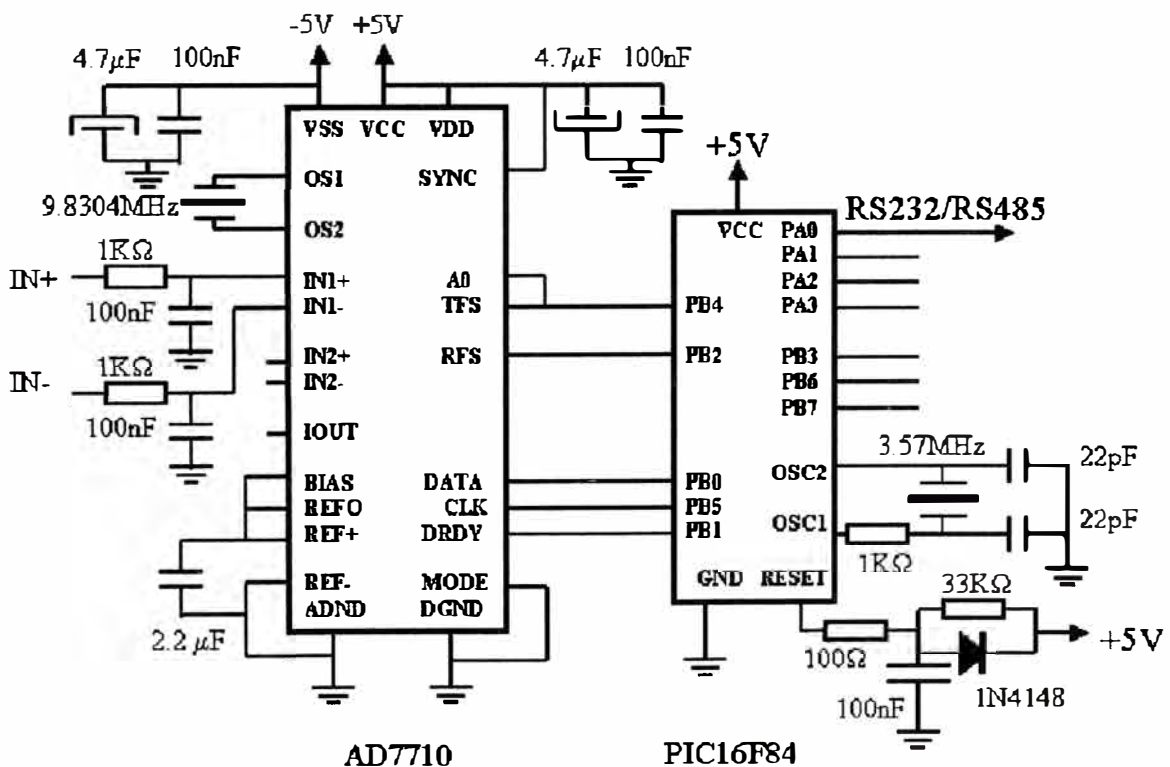


Figura 4.3. Conversor analógico digital

La cuantización a 12 bits nos dá como resultado un paso de nivel de 0.000488. Es posible mostrar el espectro de frecuencias de la señal sísmica aplicando la transformada de Fourier discreta (TDF) a la señal. Ver ecuación (4.1). En la figura 4.4, se muestra la señal sísmica de la onda P, aplicando la TDF resulta un espectro en la frecuencia como se ilustra en la Figura 4.5.

$$X(\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\Omega n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.1)$$

$$\text{Donde: } \Omega = \frac{2\pi k}{N}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (4.2)$$

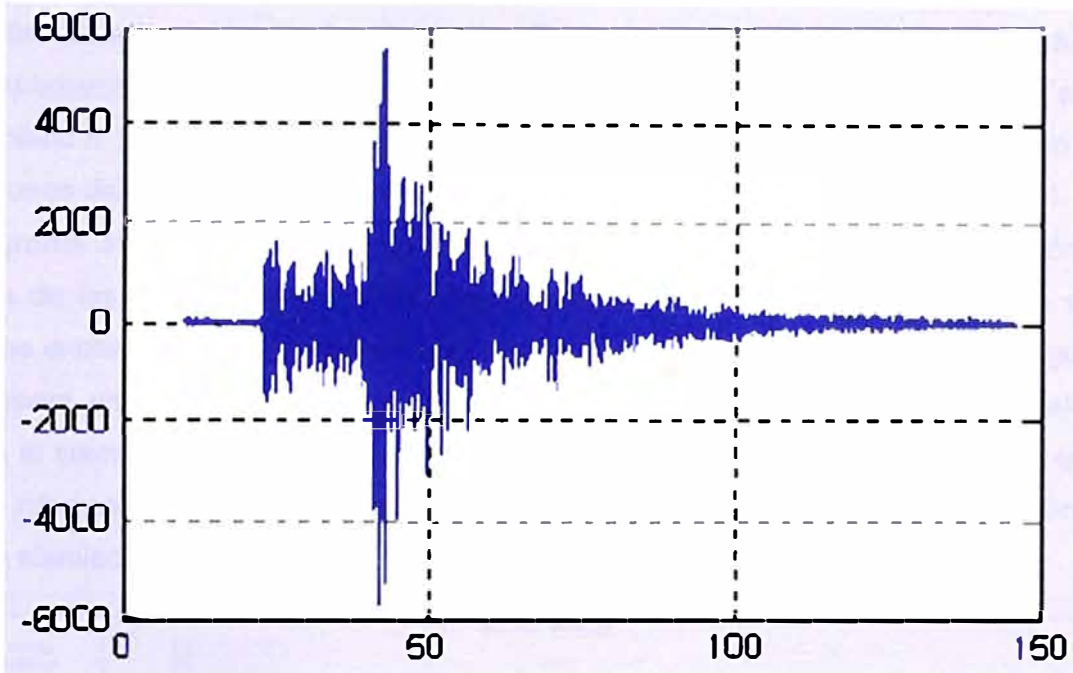


Figura 4.4. Gráfica de la señal sísmica

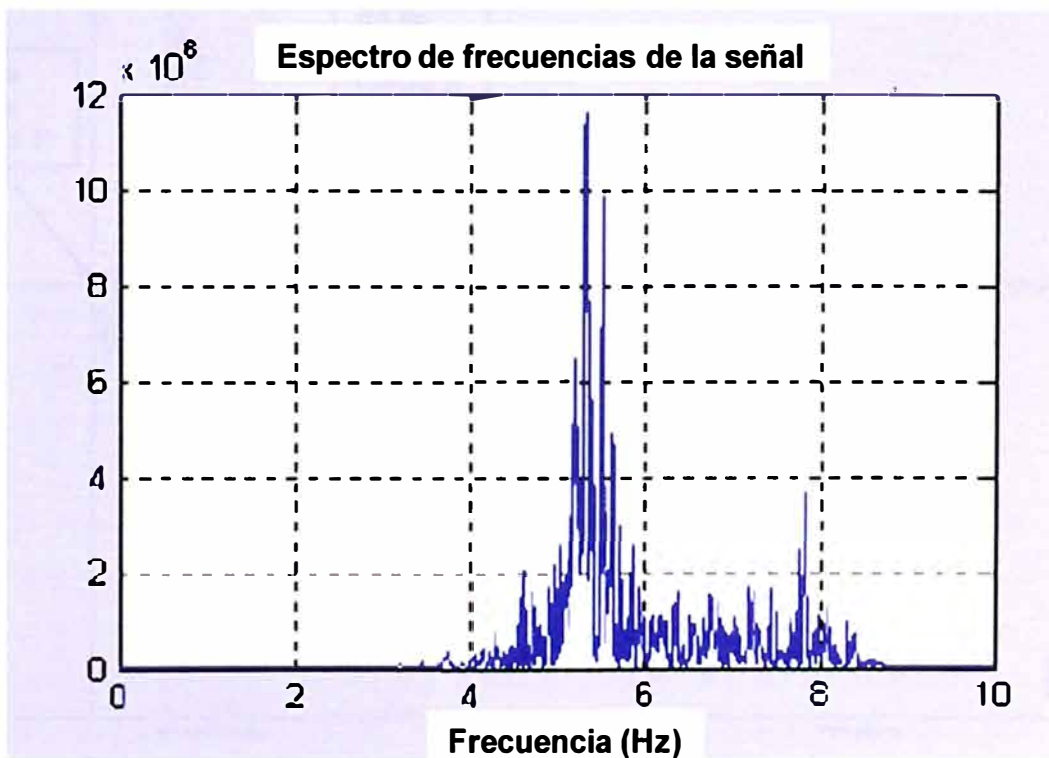


Figura 4.5. Espectro de frecuencias de la señal sísmica.

4.1.1 Análisis de ubicación de los eventos sísmicos

Las ondas emitidas por la fuente sísmica son de dos tipos, las ondas tipo **P** o de choque y las ondas tipo **S** o de corte, ambas son ortogonales entre sí y tienen velocidades de propagación distintas para un mismo material. Para poder determinar la ubicación del evento y el momento de ocurrencia (x,y,z,t) es necesario por lo menos tener 4 datos, en este caso los tiempos de llegada de las ondas P y S a los geófonos. La variación de la presión hacen activar al geófono, lo comprime y/o expande produciendo un desplazamiento que tiene límite máximo de 4 mm como se describe en la Tabla 2.2 del capítulo II. El desplazamiento del geófono generado por la variación de presión induce variaciones de voltaje a la salida como se explica en la sección 2.5 del capítulo II. En un sismograma lo más importante de todo el procesamiento es elegir la ubicación de la llegada de las ondas P y S correctamente para determinar el lugar del evento sísmico como se explica en la síntesis del trabajo de la sección 1.5 del capítulo I. En la Figura 4.6, se observa un sismograma típico de un geófono triaxial, las dos líneas verticales que cruzan el sismograma denotan la llegada de la onda P y de la onda S y son las que nos dan la información más importante para poder realizar los cálculos de localización de un evento sísmico.

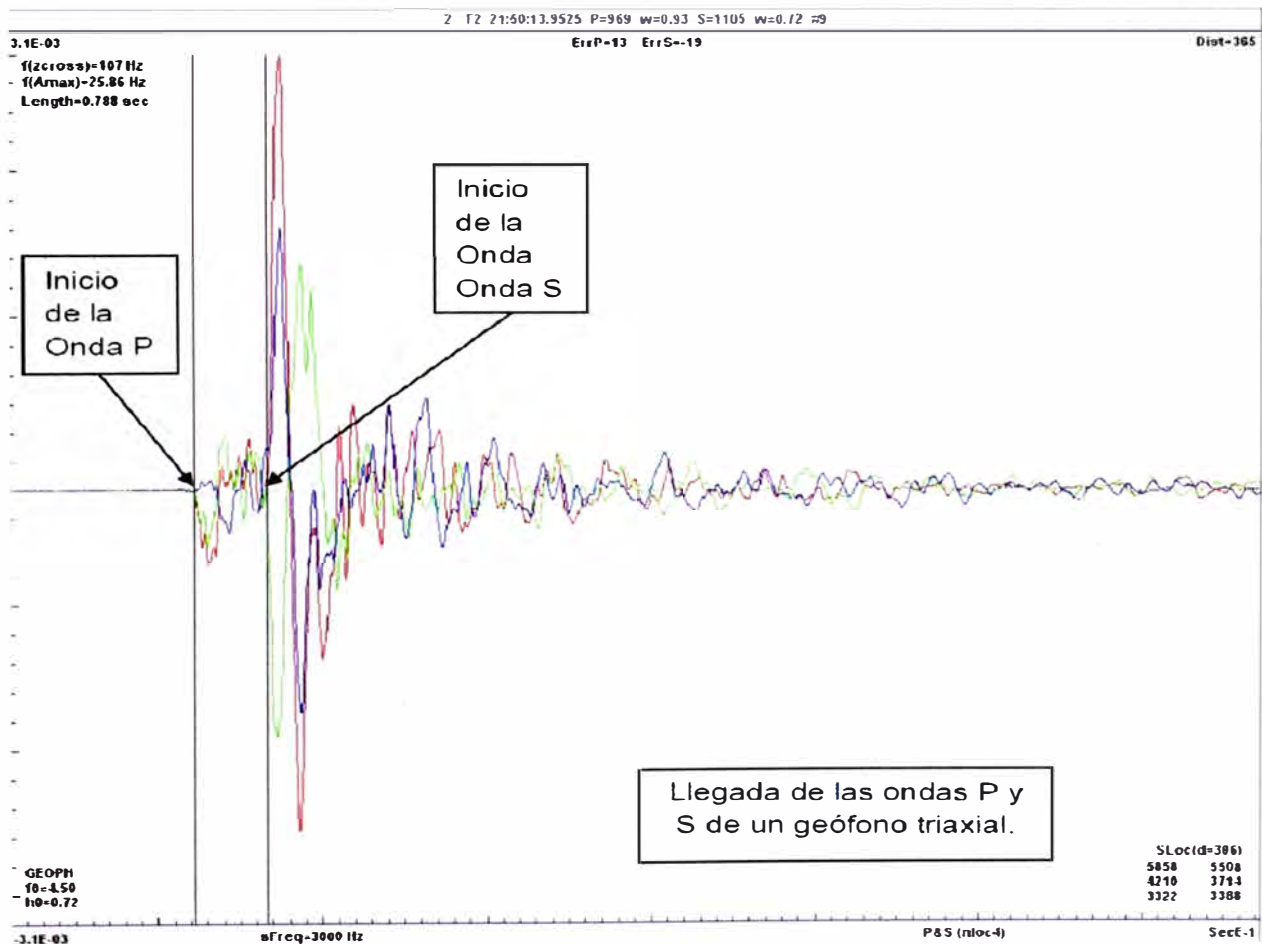


Figura 4.6. Sismograma típico de un geófono triaxial.

El sistema de monitoreo sísmico tiene un arreglo de geófonos que reciben una señal. El propósito del muestreo y de la suma de las señales captadas por el grupo de geófonos es la atenuación del ruido generado por la fuente y externos. Los arreglos además de atenuar los ruidos coherentes, también modifican el ruido aleatorio. El ruido aleatorio es atenuado por la raíz cuadrada del número de geófonos que están siendo sumados en el arreglo.

Para evaluar cuantitativamente el ruido lo que usualmente se hace es medir su intensidad respecto de la señal que interfiere.

$$S/N = 20\log(S/N) \quad (4.3)$$

Durante el procesado de los datos sísmicos se logra un aumento sustancial de la relación señal ruido.

Las velocidades sísmicas de las ondas P y S se refiere a la rapidez de propagación de las ondas que lo realizan con velocidades V_p y V_s tal como se muestra en las ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$V_p = \frac{\sqrt{\frac{4u}{3} + k}}{\sqrt{r}} \quad (4.4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{u}{r}} \quad (4.5)$$

Donde:

- K es el número de bulk
- u es el módulo de rigidez
- r es la densidad del macizo rocoso

Estas ecuaciones se aplican cuando se tiene un macizo rocoso puro, por tanto se tiene que los minerales puros como el cuarzo, calcita, entre otros poseen velocidades de propagación única.

Las ondas sísmicas internas V_p y V_s al propagarse en el subsuelo y encontrar superficies que separan materiales con distintas velocidades, se refractan, se reflejan o se difractan.

Al momento de instalar el sistema como se explica en la sección 3.2.1 del capítulo III, y antes de intentar hacer cualquier tipo de análisis es necesario conocer las velocidades de las ondas **P** y **S** para la mina, lo cual nos garantiza una ubicación confiable de los eventos sísmicos. Para poder obtener las velocidades de las ondas, se realiza un disparo (voladura) de calibración de un punto o lugar conocido cuyos resultados se aprecia en la Figura 4.7, las velocidades de todos los geófonos se alinean. Este disparo consiste en un único taladro disparado desde una ubicación conocida, por ende se conocen las distancias (**e**) desde el punto de voladura hacia los geófonos, así mismo se conoce el momento previamente planeado de voladura t_0 . Los geófonos instalados detectan la llegada de las ondas P y S en un tiempo **t** diferente para cada geófono. Realizando la diferencia de tiempos $t-t_0$, se obtiene el tiempo que demoraron las ondas en llegar al geófono, de esta forma conoceremos la ubicación y el tiempo de ocurrencia de este evento (**x,y,z,t**) y las incógnitas dentro del sistema de ecuaciones:

$$V=e/(t-t_0) \quad (4.6)$$

Para cada geófono pasarán a ser las velocidades de las ondas **P** y **S**. En la mina se realizó el disparo de calibración dando como resultado:

$$V_p = 5276 \text{ m/s} \quad (4.7)$$

$$V_s = 3038 \text{ m/s} \quad (4.8)$$

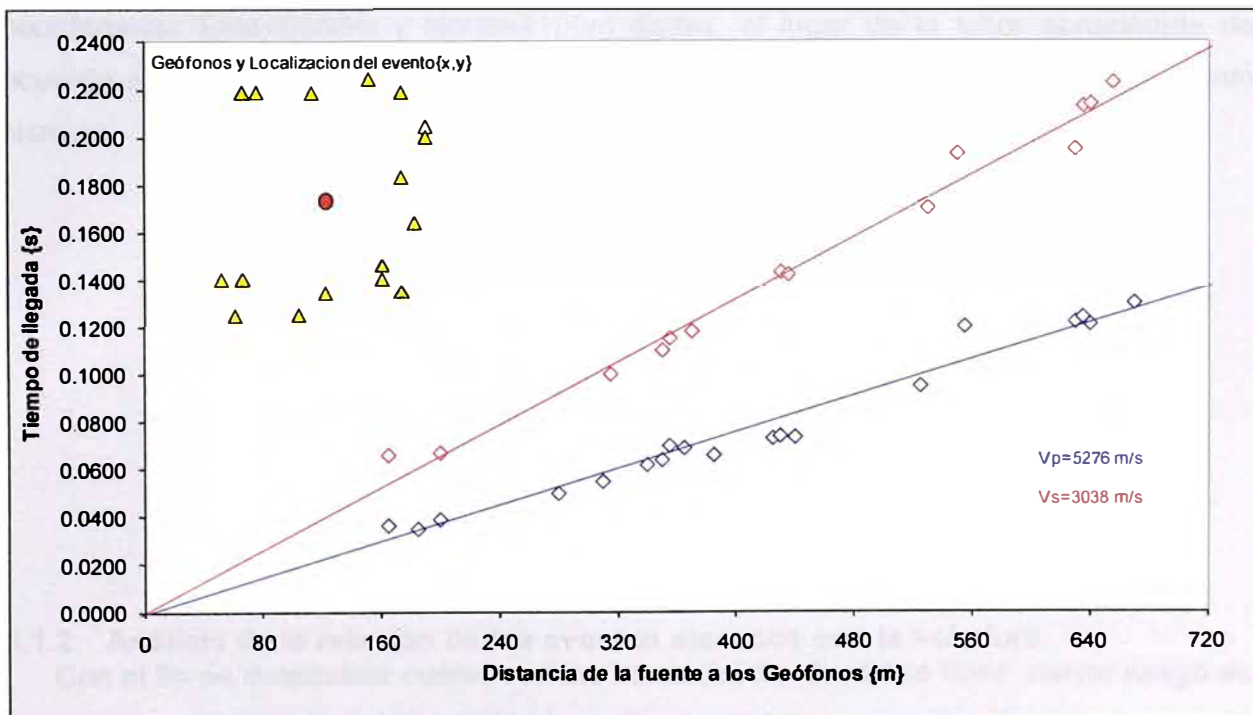


Figura 4.7. Disparo de Calibración

En la Figura 4.7, se observa los resultados de la calibración, en la parte superior izquierda se observa la ubicación previamente definida del disparo de calibración (círculo rojo) y en un diagrama Distancia vs. Tiempo se define la velocidad promedio para cada

onda dependiendo del tiempo de llegada de las ondas **P** y **S** a cada geófono y la distancia del punto de disparo a los geófonos.

Debido a que el minado es un proceso dinámico en la que cambia constantemente la geometría de la mina así como su geología, es muy importante que se efectúen de forma periódica estos disparos de calibración para mantener la exactitud de la ubicación de cualquier evento sísmico en la mina, recalculando las velocidades ya obtenidas. En la mina se utiliza un disparo de producción como disparo de calibración una vez al mes.

Es importante una adecuada ubicación de los eventos por cuanto nos permite localizar potenciales estallidos de roca, en ese sentido, todo procesamiento de dato sísmológico subsiguiente depende de una buena ubicación del evento. Toda interpretación basada en la ubicación de un conjunto de eventos sísmicos, por ejemplo eventos ubicados cerca al pique será inexacta, por no decir errónea, es decir si la ubicación está mal, todo está mal.

Una vez ubicado de forma confiable el evento en base a los sismogramas obtenidos, podemos determinar los parámetros de la fuente sísmica tal como se puede ver en la Tabla 4.1, para la ubicación del evento en la mina nos guiamos de los datos de localización obtenidos como lo muestra la Tabla 4.1, Altura=3148 m y del cuadro del anexo B en donde nos brinda el nivel aproximado que es -970, además con las coordenadas Este=5966m y Norte=4100m dadas, el lugar de la labor aproximada de acuerdo al plano del anexo B determinando el lugar en la mina donde ocurrió el evento sísmico.

Tabla 4.1. Localización de un evento sísmico

Localización	Distancia (m)
Este	5966
Norte	4100
Altura (msnm)	3148

4.1.2 Análisis de la relación de los eventos sísmicos con la voladura

Con el fin de determinar cuáles son las horas del día donde se tiene mayor riesgo de exposición a la sismicidad inducida, se realiza un histograma diferenciado por zonas, tanto para la zona Sur como para la zona Norte de la mina. Para un tiempo de muestra de 6 meses, se coloca en una base de datos los eventos sísmicos ocurridos de manera diaria en donde se incluye su magnitud, los eventos sísmicos ocurridos se colocan por cada hora del día, desde las 00:00 horas hasta las 24:00 horas del día.

En la mina se tienen horas fijas de voladura para extracción de mineral que son: 6:45 horas, 18:45 horas y 23:45 horas todos los días, lo que se desea analizar es, en que horas del día se tiene mayor cantidad de eventos sísmicos de mayores magnitudes relacionadas con la voladura para restringir el acceso del personal en esas horas.

En el caso de la Zona Sur de la mina como se muestra en la Figura 4.8 que es la más sensible a este fenómeno, la mayor cantidad de eventos se suscitan durante las 3 horas posteriores a la voladura evidenciándose una mayor cantidad de liberaciones de energía en este lapso de tiempo. En la figura 4.8, los rectángulos de colores rojo, amarillo, verde y azul representan la magnitud del evento sísmico.

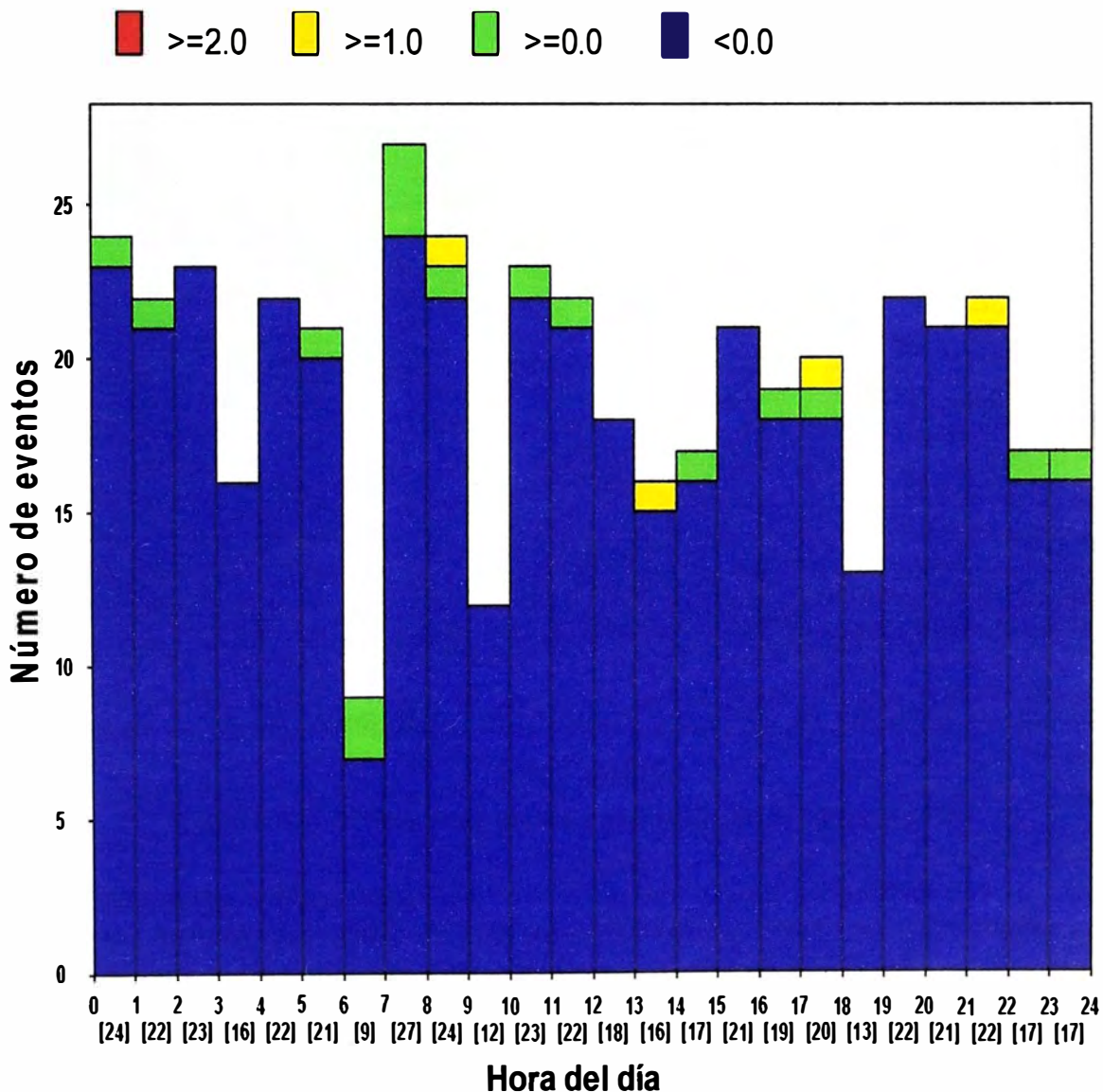


Figura 4.8. Histograma diario de los eventos sísmicos zona Sur

En el caso de la zona norte de la mina como se muestra en la Figura 4.9, los horarios de disparo son los mismos que la zona sur, y el comportamiento de los eventos sísmicos en este caso no parece estar directamente relacionado a un horario de disparo determinado. Por lo que no se restringe el acceso del personal a ésta área de trabajo.

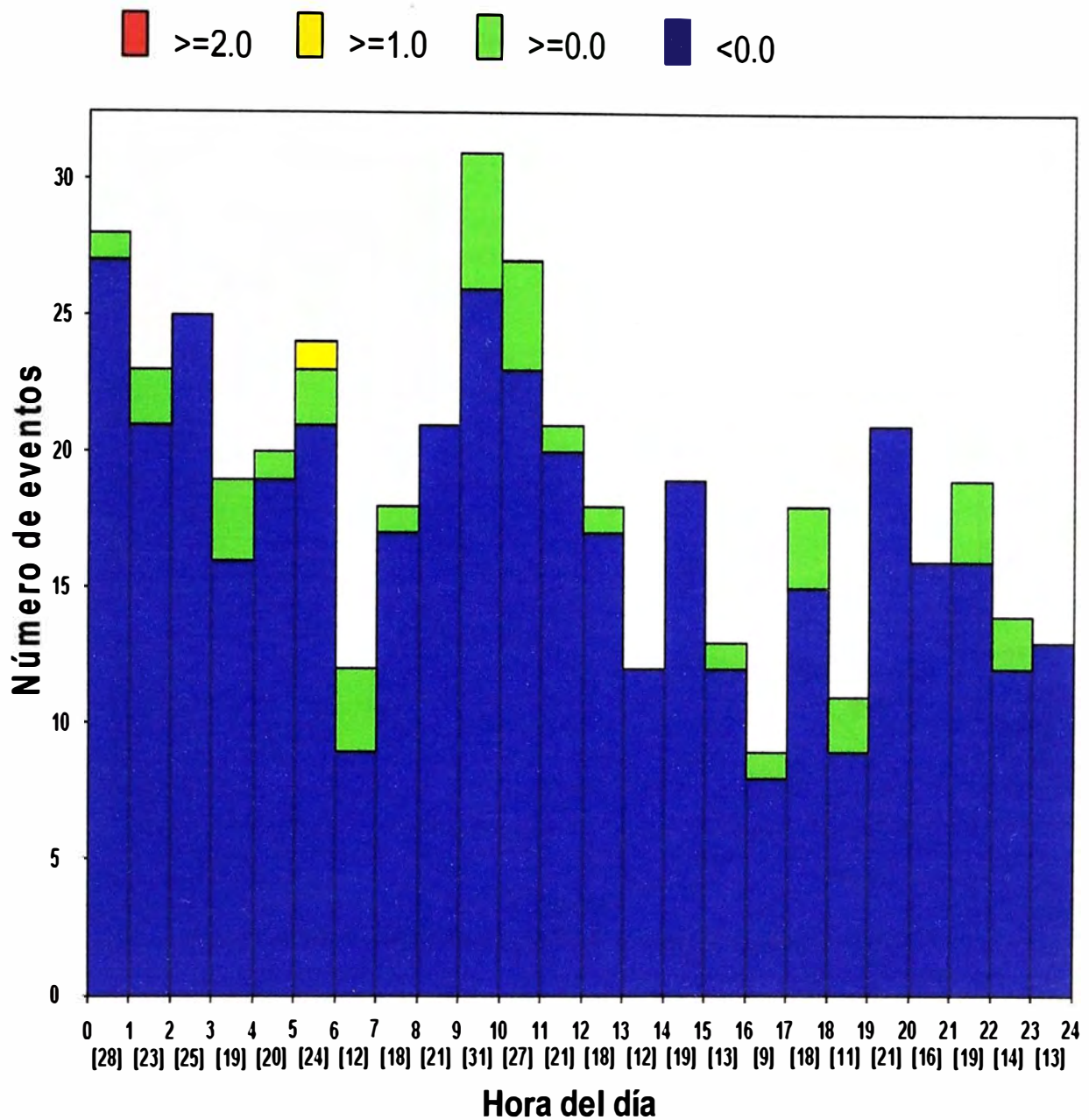


Figura 4.9. Histograma de los eventos sísmicos zona Norte

4.1.3 Análisis del Riesgo Sísmico

El riesgo sísmico está asociado a la ocurrencia de un evento de gran intensidad que genere daños y es definido como la probabilidad de la ocurrencia de un evento sísmico igual o mayor a una magnitud específica en un volumen y tiempo determinado.

En cuanto a minas, el riesgo sísmico se estima en base a probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos sobre cierta magnitud y su tiempo de ocurrencia $t (\geq m)$ como se describe en la sección 2.6 del capítulo II, es decir que ocurra un evento de una magnitud mayor o igual a m cada período de tiempo t . En el caso de la mina, como se observa en la Figura 4.10, se tiene una magnitud de -0.8 , es decir, para realizar un análisis consistente consideraremos a todos los eventos con magnitud mayor o igual a -0.8 .

Referencia(A. J. Mendecki, G Van Aswegen y P. Mountfort, "A Guide to Routine Seismic Monitoring in Mines" paginas 10-15, 1999).

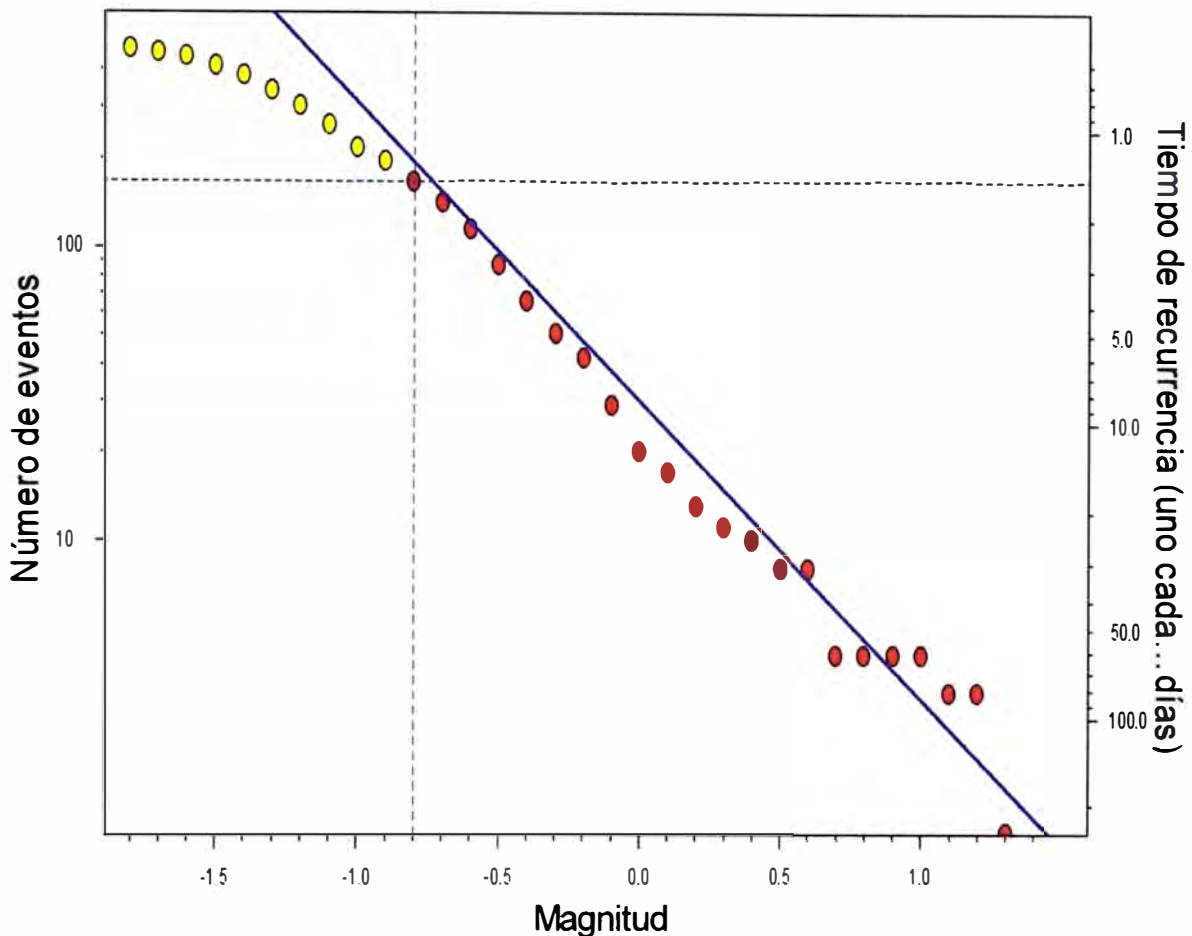


Figura 4.10. Gráfico de frecuencia – magnitud para la mina

La relación frecuencia – magnitud como se muestra en la Figura 4.10 está definida como una relación logarítmica como la que se define en la ecuación (2.1). La Figura 4.10 nos muestra un total de eventos sísmicos registrados de 246 de las cuales para eventos cuyas magnitudes son mayores o iguales a -0.8 obtenemos 167 eventos sísmicos $N(>=-0.8)=167$ que son registrados de forma confiable de un total de 246, **a** es la actividad sísmica y representa el numero de eventos con magnitud iguales o mayores a 0.0, **m** es la magnitud del evento siendo el valor máximo de 1.4, y el exponente **b** indica el riesgo sísmico general, mientras más alto sea **b**, menor será el riesgo sísmico cumpliendose lo indicado en la sección 2.6 del capítulo II, en este caso de la zona de la mina que es la más sensible a la sismicidad inducida el valor de **b** = 1.02. Con estos datos históricos que se muestran en la Figura 4.10 es posible realizar la previsión de los intervalos de tiempo que ocurriran los eventos sísmicos de cierta magnitud y donde estas ocurriran, por ejemplo eventos sísmicos de magnitud 1.0 se espera a que ocurra cada 90 días, y eventos sísmicos de magnitud 0.4 se espera a que ocurran cada 20 días.

4.1.4 Análisis del comportamiento de los eventos sísmicos

En las figuras 4.11 y 4.12 se muestran los 3 niveles de la mina -770, -970 y -1170 en donde se registraron un total de 1722 eventos, de los cuales se registraron 1207 en la zona sur, 452 en la zona norte y 63 en la zona Baja las cuales se muestran con puntos.

Los eventos están distribuidos como se observa en las Figuras 4.11 y 4.12, el mayor número de eventos se han evidenciado en la zona sur, con una alta concentración de eventos sísmicos, por lo mismo que esta labor está siendo minado intensamente. Recientemente los eventos se han presentado por debajo del nivel -770, zona donde debe quedar un puente entre el sub nivel de operación y el nivel de comunicación, lo cual nos indica que la mayoría de la energía se está acumulando en este puente. En la zona norte de la mina tenemos más bien una distribución mucho más homogénea de los eventos sísmicos pero con picos altos en magnitud.

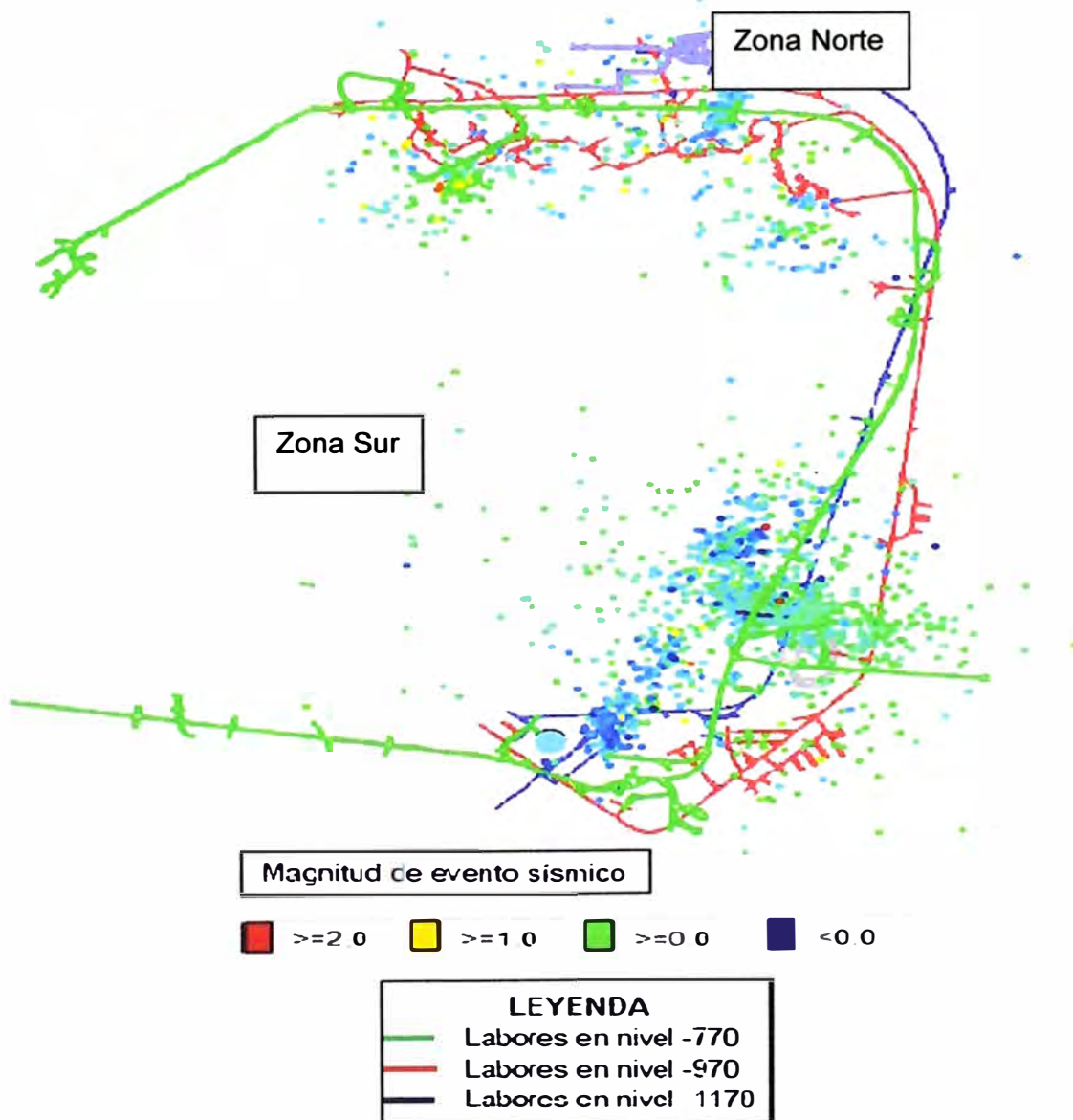


Figura 4.11. Eventos registrados en la mina en vista de planta

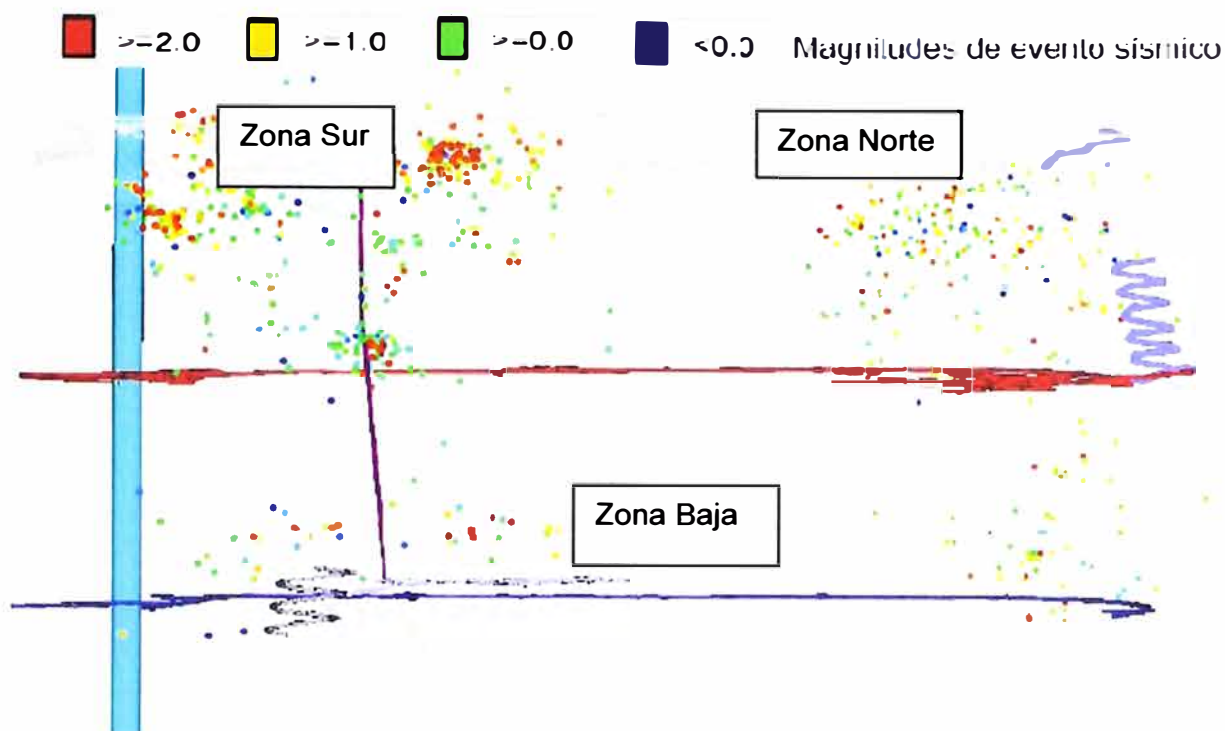


Figura 4.12. Eventos registrados en la mina en vista de perfil

Esta diferencia en el comportamiento de la zona sur con respecto a la zona norte, aparentemente obedece a razones geológicas. En el caso de la zona sur, todos los tajos son del típico yacimiento con presencia de mármol, caliza é intrusivo. Por otro lado en la zona norte, además de tajos con mármol, cuya zona de mármol es de menor volumen que en la zona sur se tienen tajos en brecha.

Como era de esperarse la mayor parte de la energía se libera en rocas de mejor calidad, es decir más duras, y por lo tanto tenemos una mayor incidencia de eventos en la zona sur. La brecha es más bien una roca plástica lo cual le permite absorber mucha más energía que un Mármol. En efecto, la mayoría de los eventos registrados en la zona norte se ubican en los tajos en contacto, es decir tipo mármol, mientras los emplazados en brecha presentan un mínimo de sismicidad.

Por otro lado se observa que la totalidad de los eventos se presentan en los alrededores de la zona de operación, lo que descarta un origen tectónico de la sismicidad y confirma que este fenómeno es inducido por el minado.

4.2 Análisis teórico de los eventos sísmicos

Con el fin de poder determinar ambientes favorables a las liberaciones de energía de gran intensidad dentro de las operaciones, se hace análisis del comportamiento de los principales parámetros de la fuente sísmica. En este sentido, se ha determinado dos comportamientos confiables que nos permiten dar la voz de alarma en el caso de repetirse condiciones potencialmente inseguras. Se ha tomado el volumen aparente

acumulativo CAV (cumulative aparent volumen) y el N° de Schmith como indicadores de estos ambientes. En la Figura 4.13 se ilustra la correlación del volumen aparente acumulativo y el número de schmidt, lo que se muestra en elipse color verde es el momento de la liberación de energía mas grande hasta el momento registrada por el sistema de monitoreo de eventos sísmicos que corresponde al mes 4.

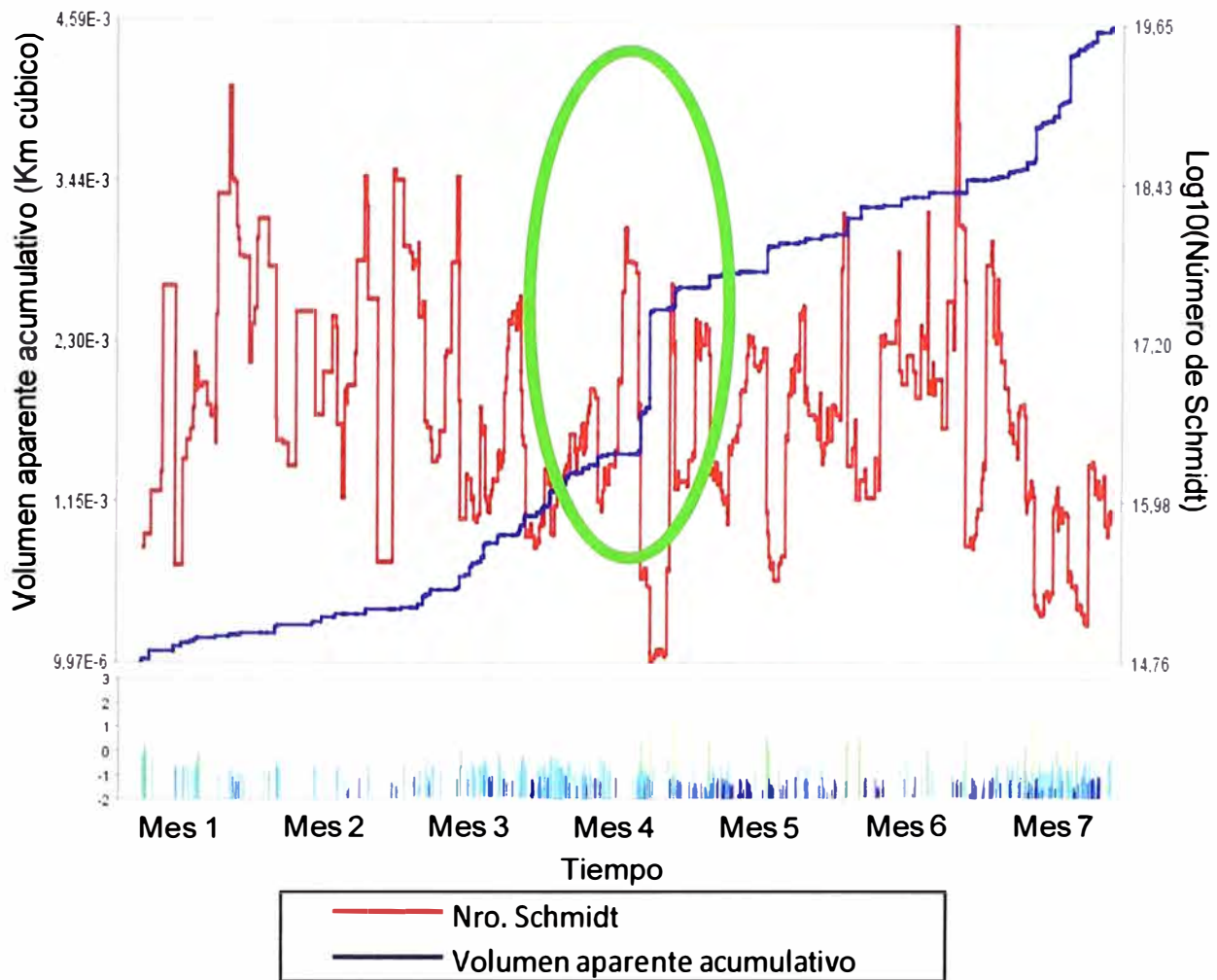


Figura 4.13. Correlación del CAV y el n° de Schmidt con los eventos sísmicos.

En la figura 4.13, en línea azul tenemos el volumen aparente acumulado, en línea roja se tiene el n° de Schmidt, en la parte inferior se tiene el registro de los eventos sísmicos, mientras más alta sea la línea es mayor la intensidad del evento sísmico. El evento de mayor intensidad que se ha registrado desde que se instaló el sistema fué de +1.5 durante el mes 4. Se observa que previo a esta liberación de energía se tuvo un dramático incremento de volumen aparente acumulado haciendo prácticamente una línea vertical, del mismo modo se tuvo el pico más bajo en el número de Schmith indicándonos estos dos parámetros un ambiente favorable para una liberación de energía de gran intensidad. Referencia(Dr. A. J. Mendecki, "Seismic Monitoring in Mines", paginas 190 - 213, 2007).

Es necesario recalcar que este método solo nos indica un ambiente favorable para la liberación de energía que tendría como consecuencia un evento sísmico de gran magnitud, no nos garantiza la ocurrencia de un evento sísmico de gran intensidad, pero nos indica que la probabilidad de ocurrencia es mucho más alta de forma que se pueda indicar a las operaciones las medidas a tomar en cuanto a ritmo de explotación, exposición del personal y equipos de extracción de mineral.

El volumen aparente acumulativo es la sumatoria de todos los volúmenes aparentes de cada evento que se ha producido. Para el cálculo del volumen aparente se presenta la siguiente ecuación:

$$Va = \frac{M^2}{2GE} \quad (4.9)$$

Donde:

M es el momento sísmico

E es la energía sísmica radiada

G es la rigidez del maciso rocoso

El número de Schmidt nos representa la acumulación de energía en el maciso rocoso.

Para el cálculo del Nro. de Schmidt se presenta la siguiente ecuación:

$$\text{Nro. Schmidt} = \frac{\eta}{\rho d} \quad (4.10)$$

Donde:

η es la viscosidad sísmica

d es la difusividad sísmica

ρ es la densidad de la roca

4.3 Planes de acción tomadas de los resultados de análisis

De los resultados de análisis visto en los puntos anteriores, se han tomado las siguientes acciones preventivas que van a ayudar a disminuir significativamente los accidentes por caídas de rocas en el personal, así como de los equipos:

Realizar el cambio de sostenimiento manual a sostenimiento mecanizado como se ilustra en la Figura 4.14.

La utilización de pernos helicoidales para realizar el sostenimiento, se ha modificado con la aplicación del 100% de pernos helicoidales cuya resistencia es de 20 toneladas en lugar de los Split sets cuya resistencia es de 7 toneladas. Ver Figura 4.15.

Restricción de tránsito de personal en zonas críticas, y el uso de reportes eventos sísmicos. Ver Figura 4.16.

Restricción de disparos de voladura en zonas críticas. Ver Figura 4.17.

Definición de pilares y puentes en zonas de mayor criticidad. Ver Figura 4.18.



Figura 4.14. Sostenimiento mecanizado en zonas de alta sismicidad.

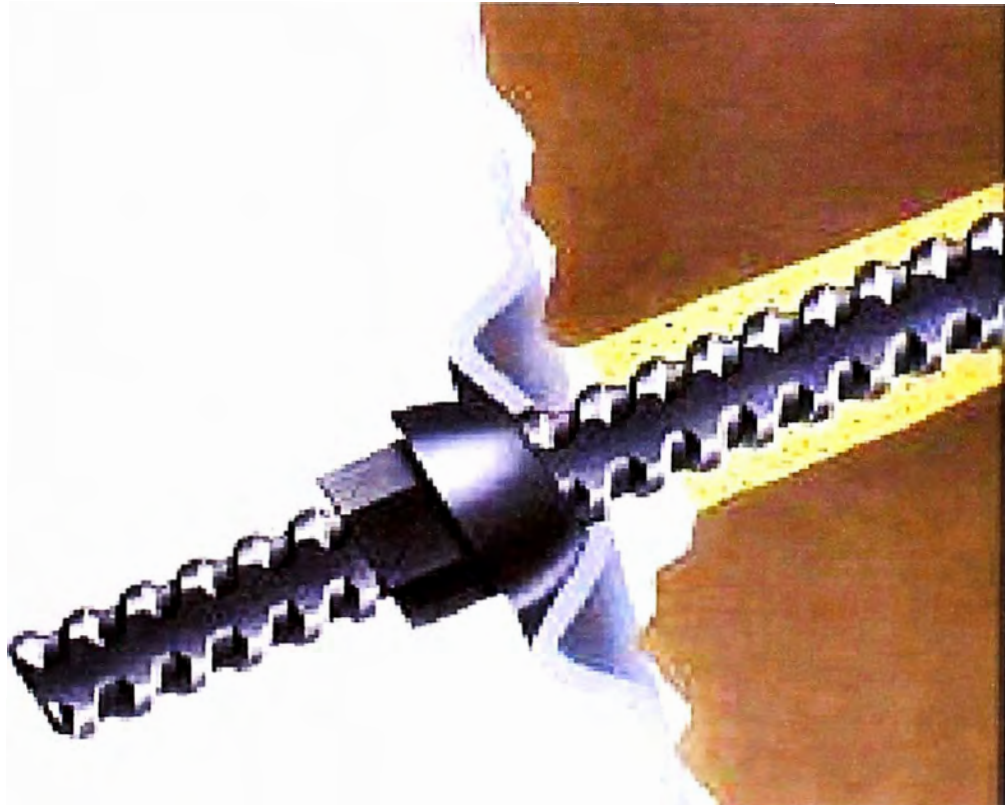


Figura 4.15. Perno helicoidal para sostenimiento

REPORTE DE RUÍDOS EN EL MACIZO ROCOSO	
Fecha y hora:	
Ubicación de la persona que reporta:	
Su nombre y actividad en el momento del ruido:	
¿Escuchó Ud el ruido? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
¿Qué sintió o a que se pareció el evento?	
<input type="checkbox"/>	Reventazón y crujido
<input type="checkbox"/>	Estruendo distante
<input type="checkbox"/>	Ruido agudo de rotura
<input type="checkbox"/>	Sacudimiento o sople del aire o golpe de aire
<input type="checkbox"/>	Golpe fuerte o explosión
<input type="checkbox"/>	¿Hubo mas que un ruido?
Otros detalles:	
¿Sintió Ud el ruido? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
¿A que se parece lo que sintió?	
<input type="checkbox"/>	Vibración débil
<input type="checkbox"/>	Golpe sonido sordo
<input type="checkbox"/>	Sintió que cayó la roca
<input type="checkbox"/>	Vibración extendida (un segundo o más)
<input type="checkbox"/>	Sintió la vibración en sus pies
<input type="checkbox"/>	Sintió la vibración de la superficie
¿Desea Ud una respuesta a su reporte?	
<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No

Figura 4.16. Reporte de eventos sísmicos

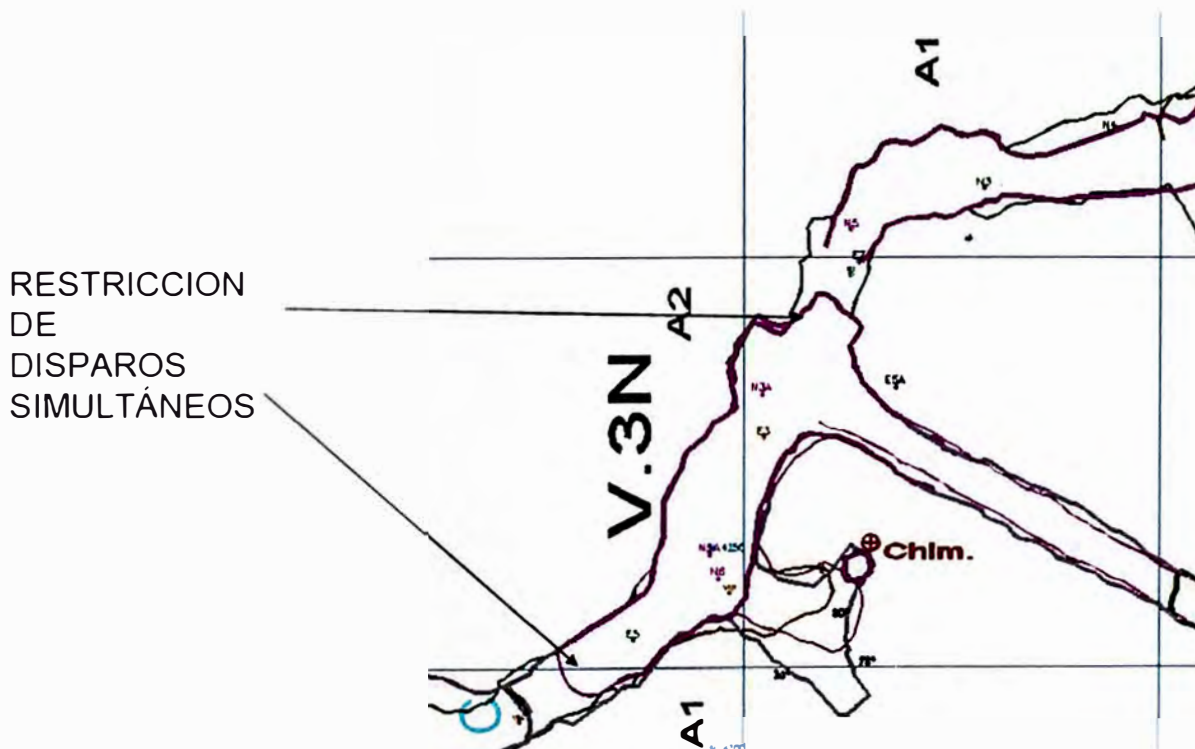


Figura 4.17. Restricción de disparos de voladura en zonas críticas.

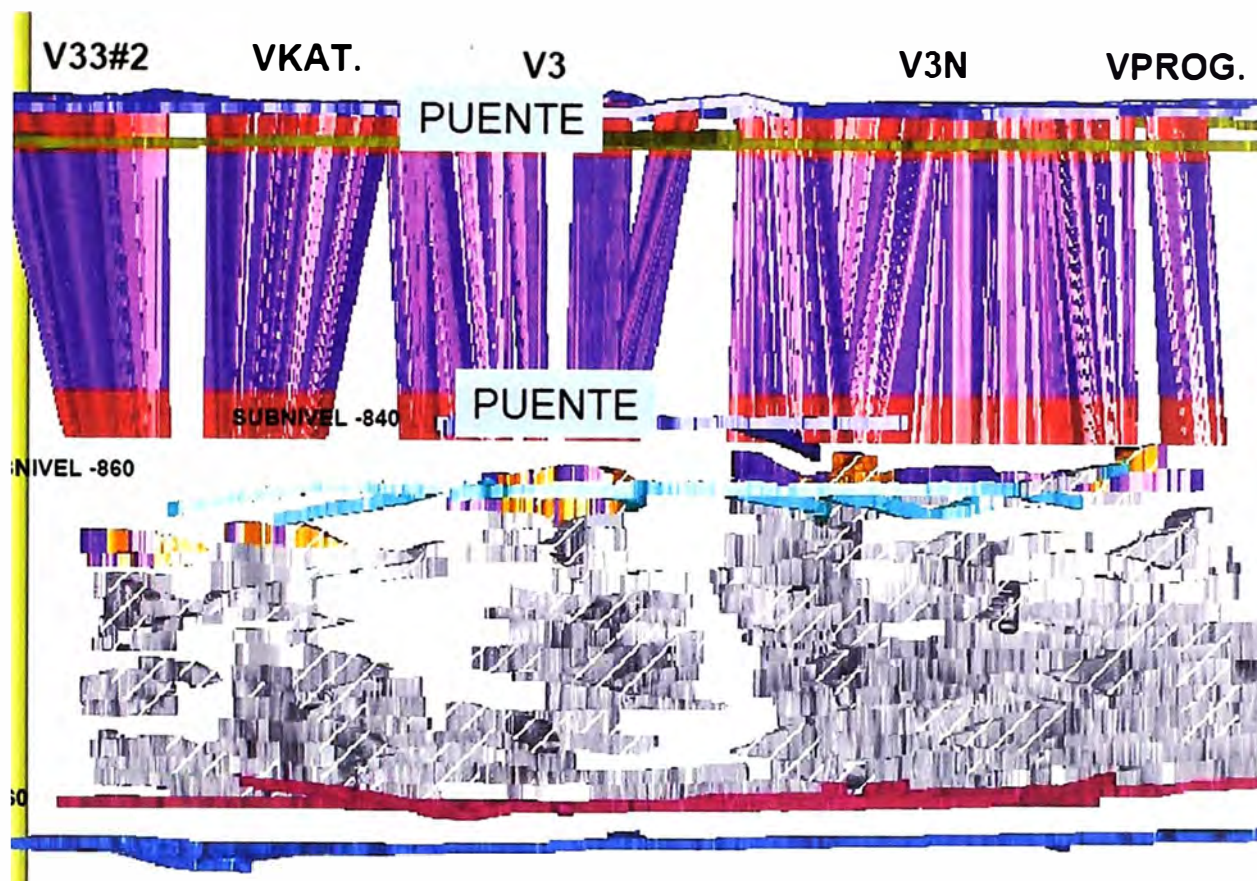


Figura 4.18. Definición de pilares y puentes en las zonas de mayor criticidad.

4.4 Presupuesto y tiempo de ejecución

A continuación se muestran los cuadros de presupuesto y tiempo de ejecución.

4.4.1 Costo de la implementación del sistema de monitoreo sísmico

Los costos de implementación del sistema de monitoreo sísmico en la mina son los que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Costos de implementación del sistema de monitoreo sísmico

Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario US\$	Parcial Total US\$
1	Cajas de QS	5	7 967	39 835
2	Geófono Uniaxial	18	2 391	43 038
3	Geófono Triaxial	4	3 187	12 748
4	Computador y Software de Procesamiento	1	17 000	17 000
5	Costos Mineros	1	95 684	95 684
TOTAL				208 305

El costo anual de mantenimiento es de 15% del costo de adquisición de instrumentos, esto es: US\$ 14 343.15

4.4.2 Tiempo de ejecución

El tiempo desde que se solicita los equipos se indica en la tabla 4.2 expresado en semanas se muestra en la Figura 4.19.

TRABAJOS	SEM. 1	SEM. 2	SEM. 3	SEM. 4	SEM. 5	SEM. 6	SEM. 7	SEM. 8	SEM. 9
ADQUISICIÓN DE GEOFONOS, QS, SOFTWARE Y SERVIDOR	■								
PERFORACIÓN PARA INSTALACIÓN DE GEOFONOS	■								
PERFORACIÓN PARA ANCLAJES DE CABLE			■						
ACONDICIONAMIENTO DE AMBIENTE PARA ALMACENAMIENTO DE EQUIPOS	■								
INSTALACIÓN DE GEOFONOS Y SOFTWARE						■			
LIMPIEZA DEL ÁREA DE TRABAJO		■							
PUESTA EN SERVICIO								■	

Figura 4.19: Tiempo de ejecución de 9 semanas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha determinado cuales son las zonas con más alto riesgo sísmico de la mina en base a la cantidad e intensidad de eventos que se han registrado.

Se han identificado cuales son las condiciones favorables para la ocurrencia de un evento sísmico de gran intensidad, dándonos la posibilidad de tomar las medidas preventivas en la zona de peligro.

Se ha evidenciado una diferencia del comportamiento del macizo rocoso entre la zona sur y la zona norte, esto debido al tipo de roca entre una zona y otra, por un lado la zona sur posee tipos de roca mucho más rígidos convirtiéndole en una zona de mayor riesgo sísmico que la zona norte.

El sistema de monitoreo sísmico en sí, es solo una herramienta que nos permite tener pleno conocimiento de lo que sucede con la sismicidad inducida en el momento y de proyectarse a lo que pueda ocurrir en el futuro.

Como trabajo futuro dentro del control de la sismicidad inducida sería conveniente implementar el uso de un programa de modelamiento numérico tridimensional.

Para poder prevenir potenciales liberaciones de energía en zonas altamente esforzadas y anticipar el desplazamiento de los esfuerzos conforme se va avanzando el minado, es necesario efectuar un modelamiento numérico tridimensional para cuyo efecto tomamos los datos de la fuente sísmica e introduciéndolos en un programa de modelamiento, tendríamos un modelo dinámico que se actualiza constantemente con cada ocurrencia de un evento, permitiendo definir zonas potencialmente peligrosas, o la migración de esfuerzos de una zona a otra a causa de un evento de fuerte intensidad. Esta herramienta nos permitiría manejar el planeamiento, ritmo de minado, estrategia de sostenimiento, etc. de una forma más segura y productiva.

ANEXO A
MEDIDOR DE INTENSIDAD DE SÍSMO (QS)

CARACTERÍSTICAS AD		
Especificaciones	Tipos G, A, S y F	Tipo D
Canales sísmicos	6	4
Razón de muestra	software seleccionable 50, 100, 125, 200, 250, 400, 500, 1000, 2000, 3000, 6000, 12000, 16000, 24000	Software seleccionable 5, 6, 25, 10, 12.5, 20, 25, 40, 50, 80, 100, 160, 200, 400, 800
Ancho de banda	Hasta 10 000 Hz	Hasta 400 Hz
Rango dinámico (dB) a 50 sps	> 110	127
Señal de distorsión (dB)	> 100	120

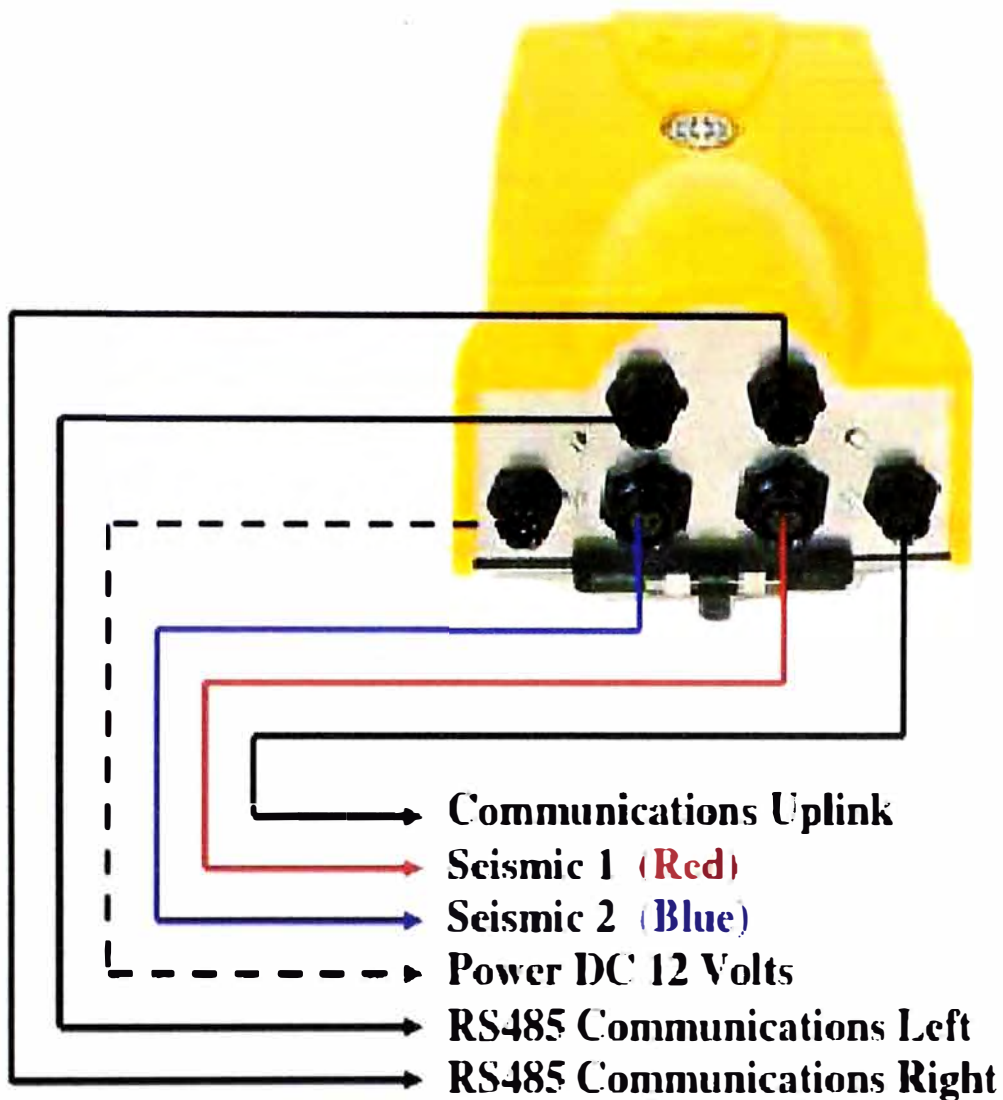
Propósito	Tipo	Descripción
Sensor 1 - 3	Pares balanceados	Pares balanceados y salida de calibración por canal
Sensor 4 - 6	Pares balanceados	Pares balanceados y salida de calibración por canal
Comms uplink	Varios	Puerto comms para conexión a la computadora central via RS232, RS485 o FSK
Comms downlink	RS485	Puerto comms para conexión a otras unidades QS o SAQS vía bus RS485
Alimentación	12 VDC 10-250VAC	Opcional en el QS Opcional en el QS

INTERFACES EXTERNOS
Puerto serial (RS232) para telemetría
Alimentación DC (12 V)
Alimentación AC (110 ó 220 V) 50/60 Hz
Sensor (Geófono, balance de fuerza o acelerómetro piezoeléctrico, banda ancha)

CONSUMO DE ENERGÍA			
	Energía Usada		
Tipo A/D	Tipo G, S, F	Tipo D	Tipo A
Número de canales	6	4	6
Normal (típico promedio)	2,6 W	1,7 W	3,0 W

ASPECTOS FÍSICOS	
Masa	1,3 Kg
Longitud Ancho Alto	220 mm 155mm 90mm
Protección	IP55
Temperatura Operación (°C) Almacenamiento (°C)	0 a 55 -40 a 65

CONECTOR QS HACIA EL SENSOR	
Color	Nombre
Rojo	X+
Azul	X-
Amarillo	Y+
Verde	Y-
Blanco	Z+
Negro	Z-



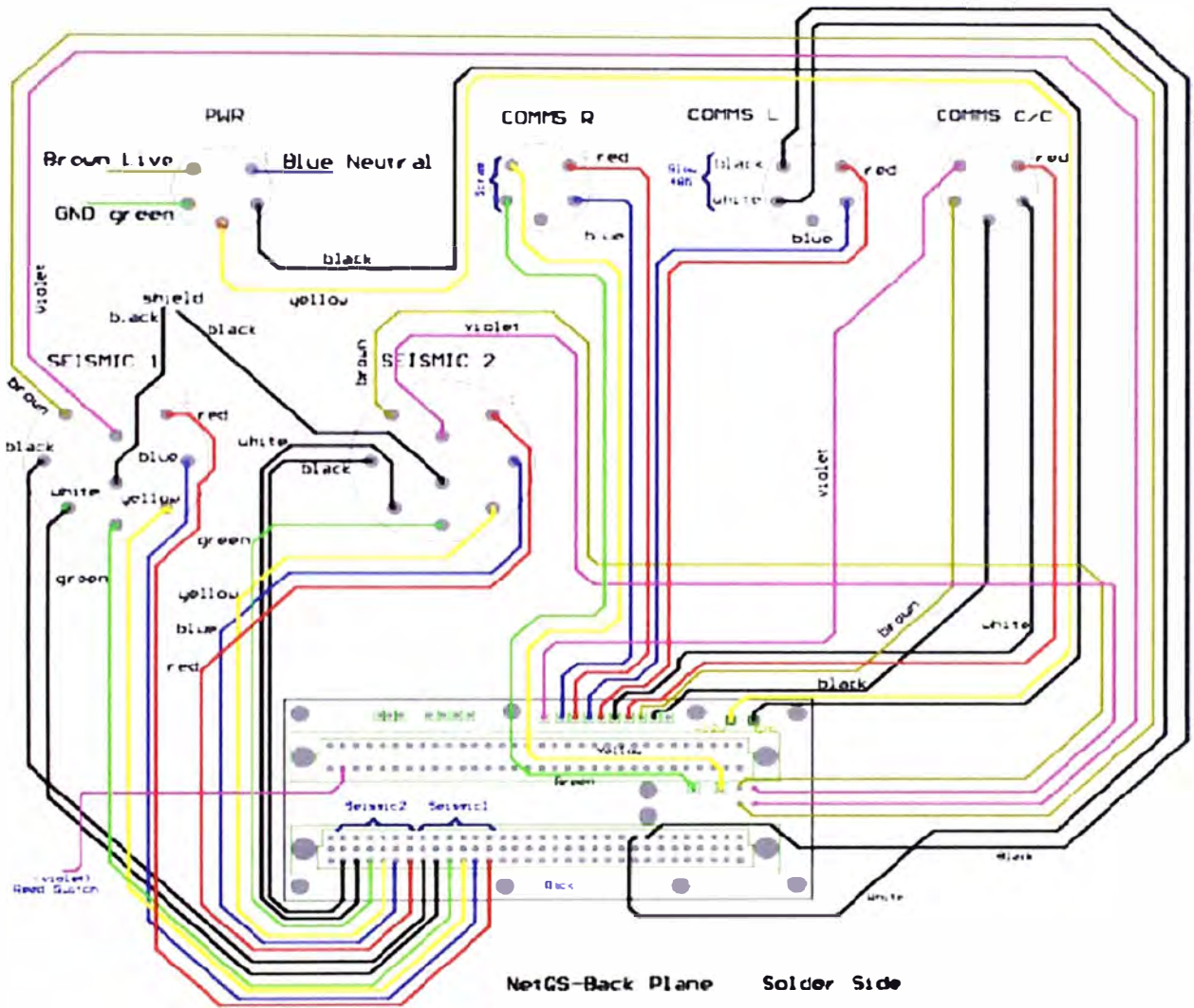
Power: **Red** = +12V
 Black = Ground

Comms Uplink: **Red** = RS485
 Blue = RS485

Comms Left/Right: **Red** = RS485
 Blue = RS485

Seismic 1 and 2: **Red** = X + (Pair 1)
 Blue = X - (Pair 1)
 Yellow = Y + (Pair 2)
 Green = Y - (Pair 2)
 White = Z + (Pair 3)
 Black = Z - (Pair 3)

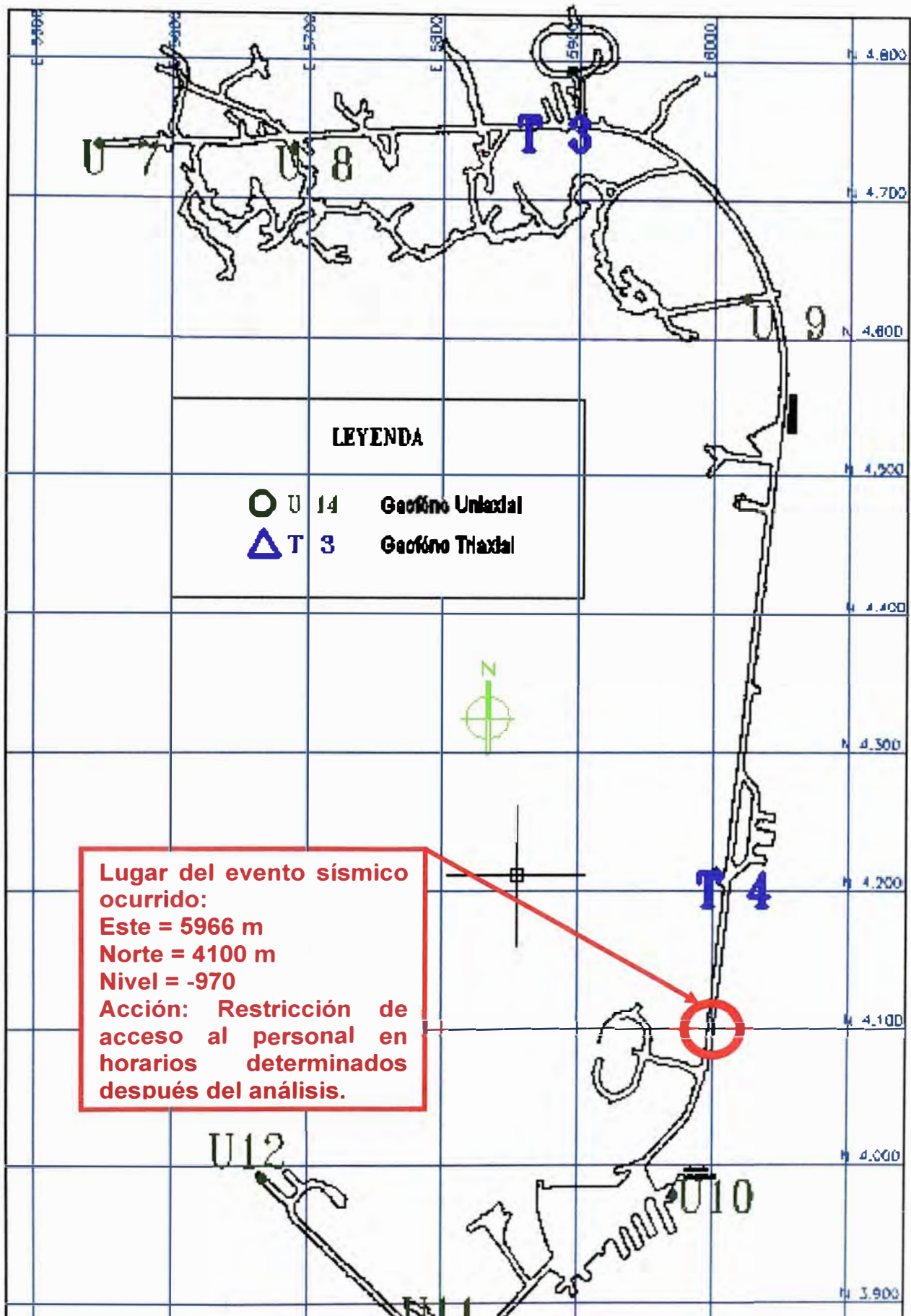
CABLEADO INTERNO DEL QS:



ANEXO B
TABLA DE COTAS PROMEDIO ALTURA DEL PIQUE

COTAS PROMEDIO ALTURA DEL PIQUE		
	NIVEL	COTA
1	-1250	2851.65
2	-1205	2895.68
3	-1170	2934.347
4	-970	3134.316
5	-770	3343.336
6	-760	3355.593
7	-600	3511.84
8	-450	3663.44
9	-440	3674.485
10	-360	3744.716
11	-280	3825.311
12	-200	3906.257
13	-150	3961.734
14	-125	3989.679
15	-100	4010.797
16	-50	4062.112
17	-40	4064.8
18	-10	4097.57
19	0	4101.78
20	40	4135.387
21	50	4150.371
22	75	4174.729
23	80	4182.765
24	100	4204.81
25	120	4232.229
26	170	4270.305
27	220	4315.05

Nivel -970: Ubicación del lugar del evento sísmico



ANEXO C
RS485 MODEM RACK

**RS485 Modem Rack
(MR485/8)**

ISS International Limited, South Africa

**<http://www.issi.co.za>
info@issi.co.za**



1 Descripción

El equipo modem RS485 forma parte del Sistema Sismico Integrado (ISS) y provee el modem para comunicación con las unidades de monitoreo digital ISS cuando usan el tipo de comunicación RS485.

El equipo modem RS485 es fabricado para soportar 8 líneas RS485 y alimentación de energía asociada en una sola unidad. Es posible expandir el ISS adicionando otros equipos modems y juntándolos en cascada.

El equipo modem RS485 puede instalarse dentro de un gabinete o puede ser instalado en un rack de 19".

La función del modem RS485 es convertir la señal RS232 del puerto serial de la computadora central en RS485 y viceversa. El sistema de comunicación RS485 usado por ISS opera en modo half duplex y a una velocidad que varía desde 9600 hasta 115200 bits por segundo.

2 Especificación Técnica

CARACTERÍSTICAS	
Descripción	Especificación
Número de líneas RS485	8
Tipo de codificación	RS485 - half duplex
Máxima distancia del cable	1,2 Km
Requerimiento de cable	1 par por línea
Status de los LED's	Energía Dato Tx (por línea) Dato Rx (por línea)
Distribución ATU	Entrada a la línea 1 Distribuido a otras líneas Cascada a otras unidades

INTERFACES EXTERNOS
Energía AC (110/220 V) 50/60 Hz
Señales RS485 (8*RJ45) 1 par cada uno
Señales RS232 (8*DB9)

ASPECTOS FÍSICOS	
Masa	1,9 Kg
Profundidad	175 mm
Ancho	418mm
Alto	65mm
Protección	Severo/Oficina
Consumo de energía	3 W

ANEXO D
GLOSARIO DE TÉRMINOS

Brecha

Es una roca sedimentaria detrítica compuesto de fragmentos angulares de roca de tamaño superior a 2 milímetros unidos por un cemento natural.

Evento sísmico

Es un evento físico causado por la liberación repentina de energía debido a una dislocación o desplazamiento en la corteza terrestre; parte de la energía es irradiada en todas direcciones en forma de ondas elásticas u ondas sísmicas. Es percibido en interior de la mina.

Falla (Falla geológica)

Es la zona de fractura en el material de la corteza a lo largo de la cual dos bloques adyacentes han sufrido una dislocación o un desplazamiento relativo paralelo a la falla; el plano de falla puede ser vertical u oblicuo, y la dislocación total puede ser de centímetros o de metros.

Geófono

Registra el movimiento del suelo generado por una fuente energética como son las voladuras y los eventos sísmicos.

Hipocentro

El hipocentro es el punto al interior de la Tierra, donde se inicia el movimiento sísmico. También corresponde al punto en el cual se produce la fractura de la corteza terrestre, que genera un evento sísmico. Se produce también la liberación de energía por fracturamiento de la roca.

Intrusivo

Es un tipo de roca, roca ígnea, esta roca proviene de la consolidación, congelamiento de un magma.

Macizo rocoso

Se llama roca al material compuesto de uno o varios minerales como resultado final de los diferentes procesos geológicos. El concepto de roca no se relaciona necesariamente con la forma compacta.

Magnitud

Medida cuantitativa del tamaño de un sismo en su fuente, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla. Es un parámetro independiente del sitio de observación y se determina midiendo la máxima amplitud de las ondas en un sismograma. La medida más usual es la magnitud Richter.

Mina

Una mina es el conjunto de labores necesarias para explotar un yacimiento y, en algunos casos, las plantas necesarias para el tratamiento del mineral extraído.

Onda sísmica

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica consistentes en la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños movimientos

en un medio.

Probabilidad de ocurrencia

Probabilidad de que un evento ocurra durante un intervalo de tiempo dado.

Profundización

Es realizar operaciones de explotación de mineral a mayores profundidades en interior mina.

Riesgo sísmico

Es la probabilidad de que en determinado sitio y durante un tiempo de exposición dado, las consecuencias económicas y sociales producidas por un evento sísmico excedan valores prefijados.

Sismicidad

Es el parámetro que describe la actividad sísmica en un área geográfica dada, definido por la ocurrencia de sismos en tiempo y espacio. Generalmente se refiere a la frecuencia de ocurrencia y a la magnitud de sismos pasados.

Sismograma

Un sismograma es un registro del movimiento del suelo llevado a cabo por un sismógrafo. La energía medida en un sismograma puede resultar de fuentes naturales como son los eventos sísmicos o de fuentes artificiales como son los explosivos.

Sostenimiento

Realizar labores para evitar la caída de rocas mediante perforaciones con pernos y tendido de mallas metálicas.

Voladura

Se denomina voladura a la acción de fracturar la roca mediante el empleo de explosivos.

Volumen aparente acumulativo

Es la sumatoria de los volúmenes desplazados por fractura de la roca en cada evento sísmico.

Tectónico

Las deformaciones de las rocas en la corteza terrestre y de las fuerzas que las causan.

Zona sísmica

Es el área geográfica delimitada dentro de una región sísmica, en la cual la amenaza y el riesgo sísmico son similares.

BIBLIOGRAFIA

1. Seth Stein and Michael Wysession, "An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure", Blackwell Publishing - USA, 2007.
2. Dr. A. J. Mendecki, "Seismic Monitoring in Mines", Chapman & Hall, Londres 2007.
3. A. J. Mendecki, "Data-driven Understanding of Seismic rock mass response to mining", South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001.
4. Serge Rudaz, "AC-23 Accelerometer Manual", Geosig Ltd. 2004.
5. A. J. Mendecki, G Van Aswegen y P. Mountfort, "A Guide to Routine Seismic Monitoring in Mines", Creda Communications, Cape Town, south Africa, 1999.
6. Kristina Larsson, "Seismicity in Mines", Luleå University of Technology, 2004.
7. Aleksander J. Mendecki, "Persistence of Seismic Rock Mass Response to Mining", ISS International Limited, 2005.
8. ISS International Limited, "Seismic Sensors", South Africa.
9. Errol de Kock, Peter Mountfort, "Technical Manual Quake Seismometer (QS)", ISS International Limited, 2006.
10. ISS International Limited, "RS485 Modem Rack (MR485/8)", South Africa.
11. Web: <http://www.issi.co.za>