



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA EN EL PROCESO DE DETONACIÓN
ELECTRÓNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL ELECTRICISTA

PAOLA CONSUELO LEPILEO SORIANO

PROFESOR GUÍA:
MARCOS ORCHARD CONCHA

MIEMBROS DE LA COMISION
HECTOR AGUSTO ALEGRIA
FRANCISCO JARAMILLO MONTOYA

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL ELECTRICISTA
POR: PAOLA CONSUELO LEPILEO SORIANO.
FECHA: AGOSTO 2012
PROF. GUÍA: MARCOS ORCHARD CONCHA

“ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA EN EL PROCESO DE DETONACIÓN ELECTRÓNICA.”

El aumento de la inversión extranjera en la industria minera chilena ha generado la necesidad de mejorar los procesos de extracción y tratamiento del mineral, así como de implementar políticas de disminución en sus costos asociados. Inicialmente, dichas políticas se centraron en disminuir los costos en el proceso de tronadura, apuntando mayormente al desarrollo de métodos que permitan conseguir una roca más fragmentada, y por ende, un menor gasto de recursos en el resto del proceso de obtención de mineral. En este sentido, los dispositivos I-Kon, una línea de detonadores electrónicos programables, permiten una asignación de tiempo de detonación para obtener una tronadura mucho más precisa. Debido a la gran cantidad de fallas que se presentan en el proceso de detonación controlado con I-Kon, surge la necesidad de un estudio sobre este proceso.

El presente trabajo de título tiene la finalidad de realizar un estudio FMECA (*Fault Mode, Effects and Criticality Analysis*) para el proceso de detonación impuesto por Orica Chile S.A y controlado por los dispositivos I-Kon en la división Orica Mining Services. Este estudio se realiza en dos de las muchas mineras a las que la empresa presta servicios: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y Compañía Minera Spence. Para la realización de este estudio se analiza detalladamente el proceso de detonación, identificando los posibles modos de falla, sus causas, nivel de impacto en la operación y sus efectos. Además se lleva a cabo una serie de encuestas a los operadores de los equipos I-Kon, para así obtener información sobre la frecuencia y criticidad de estas fallas. Con estos datos realizan una serie de gráficos que relacionan las fallas provocadas por algún tipo de causa con su criticidad y frecuencia.

Como resultado de este estudio se determinan las causas de las fallas más importantes del proceso de detonación, donde cuatro de las seis causas más significativas se asocian directamente a descuidos de los operadores en las distintas etapas del proceso. Para cada causa se sugieren medidas preventivas para evitar la aparición de fallas y en consecuencia, evitar los atrasos que éstas implican para la producción. Se sugiere también, como trabajo futuro, una mejora en los procedimientos de prevención para fallas causadas por problemas de interferencia, las cuales con un estudio más detallado de la correlación entre el campo electromagnético, la humedad del medio y la conductividad del mineral, podrían resultar en nuevas medidas de programación de tronaduras.

AGRADECIMIENTOS:

A Orica Chile S.A. por proveer un Tema de Memoria y por facilitar las dependencias para el desarrollo de esta.

A mi comisión, en especial a Francisco Jaramillo, por su apoyo y ayuda en esta etapa.

A mi familia por darme apoyo incondicional en esta larga larga jornada, A mi Padre Jorge Lepileo Barrios, mi Madre, María Soriano, mi hermano y su esposa, Jorge Lepileo y Carolina Escobar, y a mis dos adorados sobrinos Francisco y Martin Lepileo.

A mis amigos de universidad que me acompañaron gran parte del paso en la U y en el Die, David, Valdivia, Poly, Lanas, Francisco, y a todos los integrantes de los Jueves eléctricos.

A mis amigos que me aguantan cada sábado en nuestro sueño de ser emprendedores, Rafael, Victor, Tomas e Ignacio.

Y finalmente un agradecimiento extra a quienes me obligaron a hacer esta dedicatoria, Rafael Mascayano y Tomas Carrillo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.	1
1.1 MOTIVACIÓN.	1
1.2 OBJETIVOS.	2
1.2.1 <i>Objetivos generales.</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos.</i>	2
1.3 ESTRUCTURA.	2
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.	4
2.1 PROCESO DE DETONACIÓN.	4
2.1.1 <i>Detonador I-Kon.</i>	4
2.1.2 <i>Logger I-Kon.</i>	6
2.1.3 <i>Blaster.</i>	7
2.2 FMECA.	8
2.2.1 <i>Metodología FMECA.</i>	8
CAPITULO 3: BASE DE CONOCIMIENTO PARA FMECA.	11
3.1.2 <i>Proceso de almacenamiento, transporte y distribución de detonadores.</i>	11
3.1.3 <i>Proceso de primado, carguío y tapado de pozos.</i>	12
3.1.4 <i>Registro de detonadores.</i>	13
3.1.5 <i>Secuencia de tronadura.</i>	20
3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESO DE DETONACIÓN.	22
3.3 IDENTIFICAR MODOS DE FALLA.	22
3.3.1 <i>Errores apreciados en Logger.</i>	23
3.3.2 <i>Errores apreciados en Blaster.</i>	24
3.3.3 <i>Errores apreciados en terreno.</i>	25
CAPITULO 4: DESARROLLO DE FMECA.	27
4.1 IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA.	27
4.2 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA: CAUSAS Y EFECTOS.	28
4.2.1 <i>Detalle de causas.</i>	29
4.2.2 <i>Detalle de modos de falla.</i>	31
4.3 ANÁLISIS DE EFECTOS Y SEVERIDAD DE LAS FALLAS.	44
4.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE FALLA.	48
4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	49
CAPITULO 5: CONCLUSIONES.	60
5.1.1 <i>Trabajo futuro.</i>	62
CAPITULO 6: GLOSARIO.	63
CAPITULO 7: BIBLIOGRAFÍA	65
CAPITULO 8: ANEXO.	67

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1: DETONADOR ESTÁNDAR I-KON.....	5
FIGURA 2: LOGGER.....	6
FIGURA 3: (A) BLASTER 400, (B) BLASTER 2400.....	7
FIGURA 4: CONEXIÓN BLASTER - LOGGER - DETONADOR.....	7
FIGURA 5: BOOSTER.....	13
FIGURA 6: CONFIGURACIÓN AUTOMÁTICA.....	14
FIGURA 7: LÍNEA DE TIEMPO DE CONFIGURACIÓN AUTOMÁTICA.....	15
FIGURA 8: LÍNEA DE TIEMPO DE CONFIGURACIÓN MANUAL.....	15
FIGURA 9: LÍNEA DE TIEMPO DE CONFIGURACIÓN CON NÚMERO DE RETARDO.....	16
FIGURA 10: CONECTOR DETONADOR.....	17
FIGURA 11: CONEXIÓN Y REGISTRO DE DETONADORES.....	18
FIGURA 12: RESPUESTA AL ESCALÓN DE UN FILTRO PASA BAJOS.....	33
FIGURA 13: GRÁFICO FRECUENCIA DE OCURRENCIA V/S CRITICIDAD, DE FALLAS CAUSADAS POR DESCONEXIÓN DE CABLES.....	51
FIGURA 14: GRÁFICO FRECUENCIA DE OCURRENCIA V/S CRITICIDAD, DE FALLAS CAUSADAS POR DAÑO EN LA AISLACIÓN.....	52
FIGURA 15: GRÁFICO FRECUENCIA DE OCURRENCIA V/S CRITICIDAD, DE FALLAS CAUSADAS POR DAÑO EN EL CONDUCTOR.....	53
FIGURA 16: GRÁFICO FRECUENCIA DE OCURRENCIA V/S CRITICIDAD, DE FALLAS CAUSADAS POR INTERFERENCIA.....	54
FIGURA 17: GRÁFICO FRECUENCIA DE OCURRENCIA V/S CRITICIDAD, DE FALLAS CAUSADAS POR DAÑO DE FÁBRICA.....	55
FIGURA 18: GRÁFICO FRECUENCIA DE OCURRENCIA V/S CRITICIDAD, DE FALLAS CAUSADAS POR DAÑO EN OPERACIÓN.....	56

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1: RESUMEN DE MODOS DE FALLA Y APARICIÓN.....	28
TABLA 2: RESUMEN DE MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA "SIN RESPUESTA".....	32
TABLA 3: RESUMEN DE MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA "ERROR DE DATOS".....	34
TABLA 4: RESUMEN DE MEDIDAS CORRECTIVAS PARA FUGA DE CORRIENTE.....	36
TABLA 5: RESUMEN DE MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA "VOLTAJE EN DISPOSITIVOS".....	38
TABLA 6: RESUMEN MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA: "PROBLEMAS EN DISPOSITIVOS".....	39
TABLA 7: RESUMEN MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA "REGISTRO REPETIDO".....	40
TABLA 8: RESUMEN MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA "SIN CONEXIÓN".....	41
TABLA 9: RESUMEN DE MEDIDAS CORRECTIVAS PARA MODO DE FALLA "CAÍDA DE BOOSTER" Y "ATASCO DE MANGUERAS".....	42
TABLA 10: RESUMEN DE MEDIDAS CORRECTIVAS PARA EL PROCESO DE DETONACIÓN.....	43
TABLA 11: RESUMEN DE GRADO DE CRITICIDAD DE MODOS DE FALLA.....	47
TABLA 12: RESUMEN DE FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE FALLA.....	49
TABLA 13: RESUMEN DE GRADO DE CRITICIDAD Y FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE FALLA.....	50

CAPITULO 1: Introducción.

1.1 Motivación.

Desde los años 90 Chile ha triplicado su producción de cobre, producto de una significativa inversión extranjera, que ha posibilitado que en el año 2002, una producción que equivale a un 30% de la elaboración mundial y contribuyendo en un aumento del PIB nacional de un 8% en el año 1997 a un 10 % en el año 2000 (1). Actualmente la minería es la primera actividad económica del país, aportando el 16,4 % del PIB, y genera el 64,3 % de las exportaciones totales del país.

De hecho, la minería es la actividad más competitiva y más relevante en el ámbito internacional que dispone el país, constituyendo a Chile en una potencia minera a nivel mundial. En el año 2011 se extrajo un total de 5.249.745 toneladas aproximadamente, en este contexto es que es necesario que el proceso de extracción sea lo más económico posible.

El proceso de obtención de mineral consiste en la perforación del terreno, para ingresar en los pozos los elementos de iniciación de voladura y realizar la tronadura, luego el material extraído se envía en camiones hacia los chancadores, para después mediante correas transportadoras dirigir el material hacia la molienda y luego pasar a los procesos químicos que lo convertirán en concentrado o cátodos de cobre.

La tronadura tiene como misión el pre-acondicionamiento de la roca para su posterior procesamiento, teniendo como desafío transferir la energía del explosivo de la forma más eficiente posible. En un principio se optó por reducir los costos de este proceso, en desmedro de la calidad de los elementos iniciadores de la tronadura. Ahora se considera la tronadura como una etapa de la cadena de valor, teniendo como objetivo fragmentar la roca de forma que el proceso de obtención de cobre sea lo más económico posible, es decir lograr un material que cumpla con los requerimientos del proceso y no obtener el material con una tronadura a bajo costo, esto se logra utilizando detonadores electrónicos que a diferencia de los detonadores pirotécnicos aportan gran precisión al proceso (2). Por esta misma razón se comenzó a utilizar explosivos adecuados y sistemas de iniciación de alta precisión como es el caso de los detonadores *I-Kon*, los cuales a pesar de su elevado costo generan grandes beneficios a las compañías mineras. A pesar de lo conveniente

que es el sistema *I-Kon*, el proceso de tronadura presenta, en la práctica, una gran cantidad de problemas, en este contexto es que se hace necesario un estudio de fallas que pueden presentarse en él, identificando el momento en que se produce, la causa, cómo se mitigan, para luego categorizarlas entre las más probables y más severas para así poder dar directivas de cómo evitarlas o minimizar sus efectos. El estudio que se realiza es un estudio FMECA o Fault Mode, Effects and Criticality Analysis.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivos generales.

El objetivo de esta Memoria de Título es realizar un estudio FMECA sobre el proceso de detonación implementado por *Orica Mining Services* en las minas a las cuales presta servicios, principalmente a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y Compañía Minera Spence.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Conocer a fondo el proceso de detonación.
- Identificar los posibles problemas que se presentan en el proceso de detonación.
- Caracterizar y priorizar los modos de falla, considerando aspectos tales como frecuencia, efectos y cuán críticos son para el desarrollo de la operación.
- Proponer medidas correctivas y/o de mitigación efectivas para estos modos de falla.

1.3 Estructura.

Esta Memoria de Título se organiza de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se mencionan los conceptos básicos para comprender el proceso de detonación en una minera, incluyendo el funcionamiento de los detonadores y de los dispositivos necesarios para ejecutar la tronadura; adicionalmente se tratan los conceptos para el estudio FMECA, su objetivo y los pasos necesarios para realizarlo. En el Capítulo 3 se desarrolla la base para el estudio FMECA, se explican los elementos fundamentales a considerar en el proceso de detonación destacando las posibles fallas que pueden aparecer en dicho proceso. En el Capítulo 4 se destacan los modos de falla más importante, identificando en qué parte del proceso aparecen, y las medidas correctivas que utiliza la

compañía para continuar con el proceso. Finalmente se desarrolla el estudio de fallas y de criticidad dándoles valores cualitativos a la frecuencia en que se presenta cada falla y al grado de criticidad de cada una de éstas. En el Capítulo 5 se resumen los resultados obtenidos al realizar el estudio FMECA y se indican las medidas sugeridas a la compañía para evitar las fallas más problemáticas del sistema, además se indican las posibles líneas de trabajo futuro.

CAPITULO 2: Marco Teórico.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el proceso de detonación o tronadura es una etapa importante del proceso minero, ya que corresponde al inicio de la extracción del mineral. El proceso de detonación es la etapa donde se localizan los detonadores y explosivos dentro del terreno para comenzar la extracción del mineral.

En este capítulo se mencionan los conceptos necesarios para entender el proceso de detonación, se comienza explicando a grandes rasgos el proceso de detonación para luego describir los dispositivos necesarios para llevar a cabo dicho proceso. Luego se detallan los conceptos básicos para realizar un estudio FMECA.

2.1 Proceso de Detonación.

Para el proceso de detonación I-Kon cuenta con 3 elementos indispensables, el detonador, el *Logger*, encargado del registro de los detonadores y el *Blaster*, encargado de la programación de los detonadores, estos tres elementos en conjunto son los que permiten mantener un control de la detonación. El control que aportan los equipos I-Kon va desde la correcta instalación de los detonadores en los pozos y la conexión de estos al *Logger*, realizando pruebas de comunicación para asegurar una correcta conexión, hasta la integración de los *Logger* al *Blaster* para proceder a la programación de los detonadores y finalmente proceder a la tronadura. Los detonadores I-Kon se insertan en los pozos y se cubren con una mezcla de explosivo y material para terminar de cubrirlo, luego de este proceso se conectan los detonadores a el *Logger* y luego el o los *Logger* se integran al *Blaster*. A continuación se presentan los dispositivos que controlan el proceso de tronadura. (3)

2.1.1 Detonador I-Kon.

En la compañía se trabaja con 3 tipos de detonadores, el detonador pirotécnico, el detonador eléctrico y el detonador electrónico. El detonador I-Kon corresponde a un detonador electrónico que gracias a un microchip interno permite asignar a cada uno un tiempo de espera que va desde que se envía la señal de detonación hasta que efectivamente el detonador se inicia, esto permite una detonación mucho más exacta que cualquier otro detonador mencionado anteriormente. Estos detonadores permiten una mejor programación de la tronadura, haciendo más eficiente el proceso,

fragmentando la roca en pedazos que son más manejables en los procesos siguientes, disminuyendo también así, las vibraciones en el terreno provocadas por una tronadura.

El detonador electrónico I-Kon cuenta con los siguientes componentes (4):

- **Cable de alimentación:** Escogidos para tolerar la potencia de programación y de iniciación. Durante todo el proceso el detonador opera a 4[V], esto para no causar detonaciones no programadas para el momento de la detonación. Cuando estos detonadores entran al modo de programación son alimentados con 24[V].
- **Spark Gaps:** Dispositivos de protección ante descargas y aumentos de corriente no deseadas, estos dispositivos disipan la corriente extra hacia la carcasa protectora del detonador.
- **Resistencias:** Escogidas, al igual que los Spark Gaps, para proteger el circuito del detonador, estas resistencias limitan la corriente de entrada para que cualquier aumento de corriente que no haya sido disipado antes, no resulte en detonaciones no deseadas.
- **Condensadores:** Dispositivos para almacenar la energía necesaria para alimentar el chip durante el tiempo de espera antes de detonar.
- **Microcontrolador:** Dispositivo programable, el cual almacena el tiempo de espera del detonador.
- **Elemento de ignición:** Compuesto por un condensador y por un filamento explosivo, al momento que el tiempo de espera programado en el microchip se cumpla, la energía almacenada en el condensador se libera por el filamento el cual se enciende.
- **Carga base:** Carga explosiva pequeña, la cual se acciona por medio del filamento explosivo, esta carga base es la carga primaria necesaria para accionar el explosivo que se encuentra en el pozo.

En la Figura 1 se aprecia un detonador I-Kon.



Figura 1: Detonador Estándar I-Kon.

Como se mencionó anteriormente existen distintos detonadores I-Kon en el mercado, el uso de estos depende del lugar donde se realizará la tronadura, se utiliza el detonador estándar para tronaduras medianas a grandes. Los detonadores RX y XT son detonadores diseñados para condiciones inhóspitas para la carga, como por ejemplo lluvia o nieve. El detonador XT I-Kon es utilizado para pozos profundos.

2.1.2 *Logger I-Kon.*

El *Logger* (5) es un dispositivo portátil que permite registrar el ID de los detonadores que se han instalado en una línea de detonación determinada. Este aparato consta de un menú que permite registrar los detonadores conectados en paralelo a él, mediante los dos terminales que posee en la parte superior. Luego del registro, el *Logger* programa los detonadores con su respectivo retraso, el cual se puede ingresar manualmente o por medio de un software computacional específico. La programación se hace a un voltaje menor al que se requiere para la detonación, y así evitar activaciones no deseadas durante el proceso. Finalmente, dada una señal al *Logger*, este inicia la secuencia de detonación.

El *Logger* actúa también como un dispositivo de prueba para comprobar el estado de los detonadores en cada una de las etapas de la tronadura, midiendo fugas de corriente en el sistema y detectando una serie de problemas que se pueden dar en la conexión *Logger* - detonador.

Estos dispositivos deben cumplir con estrictas normas de seguridad para evitar daños causados por agua, choque y temperatura. Cada *Logger* tiene la capacidad para conectar y programar un máximo de 200 detonadores. En la se puede apreciar el *Logger I-Kon*.



Figura 2: *Logger.*

2.1.3 Blaster.

El *Blaster* (6) es el equipo de control encargado de iniciar la tronadura, existen 2 tipos de *Blaster*, el *Blaster 400* y el *Blaster 2400*, los cuales se diferencian en la cantidad de detonadores que pueden quemar por operación. El *Blaster 400* permite “quemar” hasta 400 detonadores, pues tiene la capacidad de controlar hasta 2 *Logger*, el *Blaster 2400* permite “quemar” hasta 2400 detonadores al ser capaz de controlar 12 *Logger*'s. En la Figura 3 se aprecia una imagen del *Blaster 2400* y *400*, respectivamente.

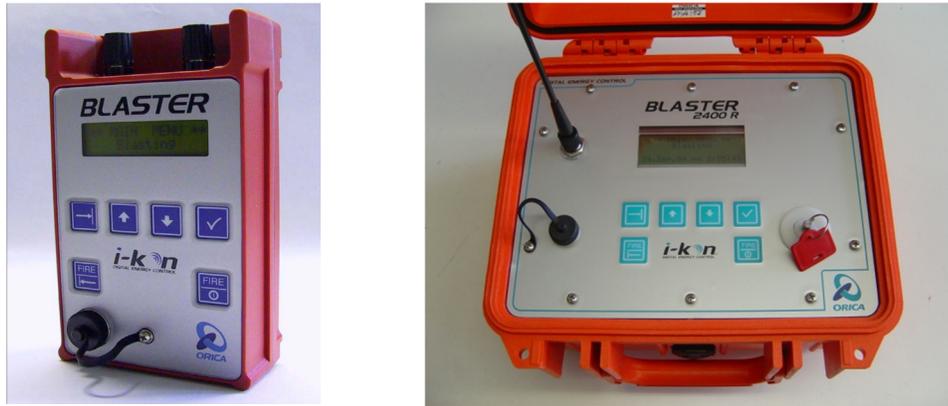


Figura 3: (a) Blaster 400, (b) Blaster 2400.

El *Blaster*, tal como el *Logger*, cumple con altos estándares de seguridad. A continuación en la Figura 4 se ve una imagen del *Blaster*, específicamente el *Blaster 2400*, integrado con 12 *Logger*, los cuales a su vez están conectados a los detonadores.

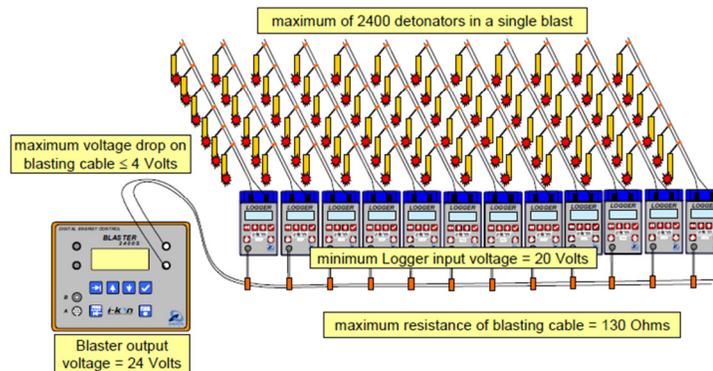


Figura 4: Conexión Blaster - Logger - Detonador.

El *Blaster*, antes de la detonación, realiza una simulación de ésta para detectar posibles problemas, después de que el sistema ha pasado las pruebas se puede proceder a la secuencia de detonación, que además cuenta con protocolos de seguridad muy estrictos en cuanto a la distancia de detonación y es el encargado de esta.

2.2 FMECA.

FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) es un método analítico-inductivo que puede ser ejecutado a nivel de piezas y componentes, o a nivel funcional. Este método permite establecer la probabilidad de los modos de falla versus la severidad de sus consecuencias, permitiendo encauzar los esfuerzos para evitar dichas fallas. En esta Memoria de Título se presenta el desarrollo de un FMECA a nivel funcional de un proceso minero.

FMECA se origina como una metodología formal en la década del 1940 por la Milicia de EE.UU. Luego en los años 60 la NASA hacía uso de variaciones de FMECA. En el año 1988 la compañía Ford Motors publicó “Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design For Manufacturing and Assembly Processes Instruction Manual” el cual aplica esta metodología (7).

El método FMECA se puede dividir en 2 análisis: análisis de modos de falla (FMEA) y el estudio de criticidad (CA). FMEA contiene toda la información sobre los modos de falla, su ocurrencia, su modo de detección y sus medidas de mitigación (8). Se necesita completar el FMEA para obtener toda la información necesaria y realizar correctamente el CA. El Análisis de Criticidad puede ser cualitativo o cuantitativo, en esta Memoria de Titulo, al no tener una base de datos a disposición de la ocurrencia de fallas, se realiza un estudio cualitativo del proceso de detonación.

2.2.1 Metodología FMECA.

Si bien existen varios tipos de FMECA, es posible distinguir una estructura base en el procedimiento, la cual se compone de las siguientes etapas (9).

- Definición del sistema u operación.
- Construcción del diagrama de bloques del sistema u operación.

- Identificar y analizar modos de falla.
- Estimar la tasa o probabilidad de ocurrencia de la falla.
- Estimar la severidad de la falla.
- Estimar la criticidad de los modos de falla.
- Identificar los medios disponibles para la detección, aislamiento y compensación de la falla.
- Documentar el análisis, resumir áreas de diseño que no se pueden corregir, identificar controles especiales para reducir el riesgo de falla.
- Hacer un seguimiento de la efectividad e implementación de acciones correctivas.

A continuación describen en detalle las distintas etapas del estudio FMECA.

2.2.1.1 Definición del sistema.

Para manejar lo complejo del estudio FMECA se debe particionar el proceso en sistemas y subsistemas, para identificar con mayor facilidad dónde ocurre cada modo de falla y a qué parte del proceso éste puede afectar.

2.2.1.2 Elaboración del diagrama de bloques.

El diagrama de bloques representa el sistema y sus respectivos sub-sistemas de una forma gráfica, y tiene la finalidad de mostrar la información necesaria sobre el flujo de los diferentes niveles, identificando los caminos críticos.

2.2.1.3 Identificar y analizar modos de falla.

Por cada parte o función del modelo del sistema, se debe realizar una completa lista de los modos de falla. Los efectos de estos modos de falla se deben definir para cada uno de ellos, algunos de los efectos que se pueden apreciar en el sistema pueden ser, Falla de sistema, Operación degradada o Falla de un estado del sistema.

2.2.1.4 Estimar la frecuencia de ocurrencia de la falla.

Debido a que este análisis es cualitativo, y no existe una base de datos de la cantidad de fallas que se producen en el sistema, no se puede cuantificar la ocurrencia de éstas, por esto, se

clasifica la frecuencia de aparición de la falla en niveles discretos, en este caso, 5 niveles, definidos a continuación.

- **Muy frecuente:** Una alta probabilidad de ocurrencia, aproximadamente mayor a 0.7 %.
- **Frecuente:** Con una probabilidad aproximada menor a 0,7% y mayor a 0,5 %.
- **Ocasional:** Estas fallas ocurre con una probabilidad aproximada menor a 0,5% y mayor a 0,3%.
- **Remoto:** Ocurre pocas veces, con una probabilidad menor a 0,3% y mayor a 0,1%.
- **Extremadamente remoto:** Probabilidad menor a 0,1%.

2.2.1.5 Estimar la severidad de la falla.

Este paso se realiza observando el proceso, y consultando sobre los efectos de cada falla en el sistema. Si no se cuenta con una base de datos a la cual consultar las fallas y sus efectos, se debe realizar una encuesta a los operarios para obtener la información necesaria y así poder continuar con el estudio.

2.2.1.6 Estimar la criticidad de los modos de falla.

Igual que en el caso anterior, si no se cuenta con una base de datos se debe hacer uso de las encuestas para obtener la información necesaria. Debido a que el estudio es cualitativo la clasificación se compone de niveles discretos, esta clasificación está dada por las siguientes categorías, las cuales se definirán durante esta Memoria de Título, Insignificante, Leve, Medio, Alto y Extremo.

2.2.1.7 Realizar estudio de criticidad.

Luego de realizar el FMEA y de asignar un grado de criticidad a cada falla se puede realizar el estudio de criticidad del proceso de detonación, se debe confeccionar una matriz de severidad, la cual, representa la probabilidad de ocurrencia de cada modo de falla y la criticidad de este. Usando la matriz se puede analizar fácilmente los modos de falla y así poder proponer acciones para evitar la aparición de estas.

CAPITULO 3: **Base de conocimiento para FMECA.**

En este capítulo se desarrollan los pasos previos para el estudio FMECA, analizando el proceso de detonación desde que los detonadores son sacados del polvorín hasta que la señal de detonación es enviada.

El estudio FMECA requiere que en primera instancia se realice una definición y caracterización completa del sistema, la cual se presenta a continuación.

3.1.1.1 Descripción del proceso de detonación.

El proceso de detonación o tronadura (10) - (11) comienza con el almacenamiento de los detonadores en los polvorines, continua con el transporte y la distribución de éstos en el terreno, luego sigue el proceso de cargar los pozos con los explosivos, posteriormente estos son tapados y comienza el registro de detonadores, seguido de las respectivas pruebas de conexión. Finalmente se inicia el proceso de tronadura, lo cual incluye iniciar los equipos, programar los tiempos de detonación para iniciar la secuencia de quema. A continuación se explica en detalle el proceso de detonación siguiendo el estándar de seguridad exigido por Orica S.A (4).

3.1.2 Proceso de almacenamiento, transporte y distribución de detonadores.

El almacenamiento de los detonadores se realiza en bodegas llamadas polvorines, los cuales deben ser lugares secos, mantener temperaturas entre los -25°C y los 65°C , y una humedad relativa inferior al 65%. Con respecto al apilamiento de cajas en polvorín, este tiene que ser de un máximo de 5 unidades y no deben estar almacenadas por más de 2 años, para asegurar esto, se utiliza un sistema de administración FIFO (*First In, First Out*), el cual es implementado por los mismos polvorineros.

El transporte de detonadores hacia el punto de quema se realiza en vehículos especializados, los cuales son autorizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y por una entidad externa fiscalizadora. Dicho vehículo debe transportar exclusivamente los

detonadores ya que por razones de seguridad no se permite el transporte de éstos junto con los explosivos. En caso de producirse una tormenta eléctrica, y con motivo de salvaguardar a los operadores el vehículo se debe situar lejos de las sub estaciones de energía y torres de alta tensión, además, el personal debe alejarse de éste a una distancia mínima de 600[m].

El manejo de los detonadores en terreno se debe realizar con extremo cuidado, ya que estos no se pueden golpear ni lanzar. El lugar de descarga desde el vehículo hacia el punto de quema debe estar debidamente señalizado y no debe interferir con el tránsito de camiones. El terreno de descarga debe ser plano y estar libre de obstáculos que puedan provocar caídas de los operarios, debe estar alejado de posibles zonas de caídas de rocas desde bancos superiores, y en caso de existir nieve, es el capataz el encargado de discernir si se cumplen las condiciones de seguridad para realizar la distribución de los detonadores en el terreno.

3.1.3 Proceso de primado, carguío y tapado de pozos.

El primado de un pozo consiste en introducir uno o más detonadores, usualmente un detonador electrónico junto con un detonador pirotécnico, y con una carga primaria de explosivos. La carga más el detonador se encapsula en un cartucho de plástico llamado *Booster*, el cual debe ser introducido cuidadosamente para evitar detonaciones no deseadas. Luego del primado, se procede a cargar el pozo con el material explosivo, el cual se inserta mediante una manguera, y se sitúa a 2,5[m] del fondo del pozo. Finalmente se realiza el tapado de los pozos, el cual consiste en cubrirlos con un material adecuado, usualmente se utiliza el material que fue extraído para hacer los pozos, para esta acción se requiere máximo cuidado ya que un mal manejo puede provocar una serie de fallas las cuales serán detalladas más adelante.

En la siguiente Figura 5 se aprecia el *Booster* en la mano izquierda del operador y en su mano derecha se ve la extensión del cable del detonador.



Figura 5: Booster.

Luego de posicionar los detonadores en los lugares definidos en el diseño de la tronadura y posteriormente de cargar y tapar los pozos, se procede al proceso de registro de los detonadores.

3.1.4 Registro de detonadores.

Tal como se mencionó en el Capítulo 2, el *Logger* es un dispositivo electrónico encargado de registrar los detonadores de una malla de detonación, almacenando el ID del detonador y el tiempo de retardo asignado a éste, para luego programarlos. Antes del proceso de registro se debe configurar el *Logger* en uno de sus 4 modos, los cuales principalmente determinan la forma en que se asignará el tiempo de retardo para cada detonador, estos modos de configuración se explican a continuación.

3.1.4.1 Configuración.

- **Configuración Automática:** El usuario asigna dos o tres intervalos de retardo, los cuales se asignan cíclicamente por el *Logger* a cada detonador al momento de conectarlos al cable arnés, esto se aprecia en la Figura 6.

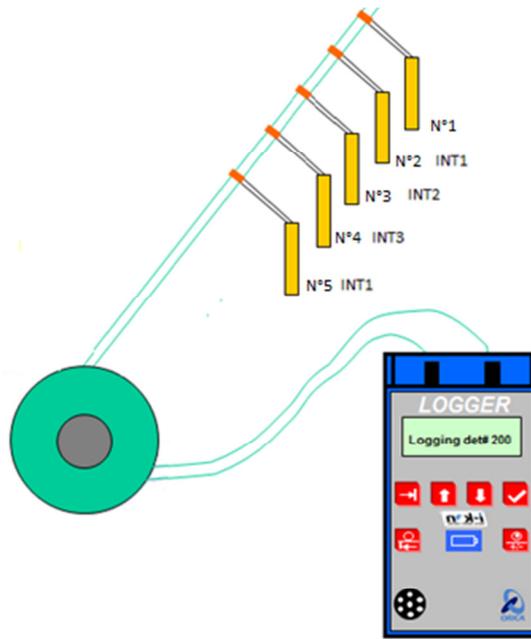


Figura 6: Configuración automática.

En esta imagen se aprecian INT1, INT2 e INT3 como los intervalos asignados por el usuario, al detonador N°1 se le asigna un tiempo de retardo igual a cero, al conectarse el segundo detonador se asigna un tiempo de retardo de INT1 con respecto al Detonador N°1. Al conectar el tercer detonador se asigna un retardo de INT2 con respecto al detonador registrado anteriormente, con el cuarto detonador se asigna su retardo igual a INT3 con respecto al tercer detonador, y luego para el resto de detonadores se vuelve a repetir el proceso. Si esto lo situamos en una línea de tiempo se vería como en la Figura 7.

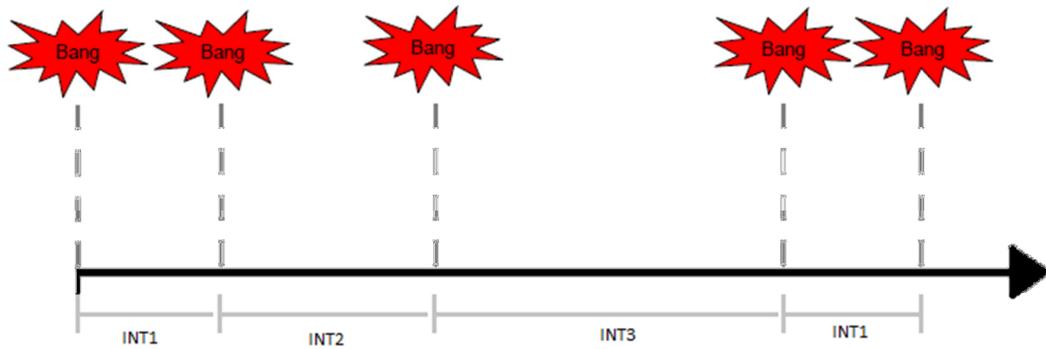


Figura 7: Línea de tiempo de configuración automática.

- Configuración Manual:** En este modo el usuario asigna manualmente el retardo de cada detonador, a diferencia del caso anterior donde el retardo era relativo al detonador anterior, este retardo es absoluto, el resultado de esta configuración en una línea de tiempo se aprecia en la Figura 8.

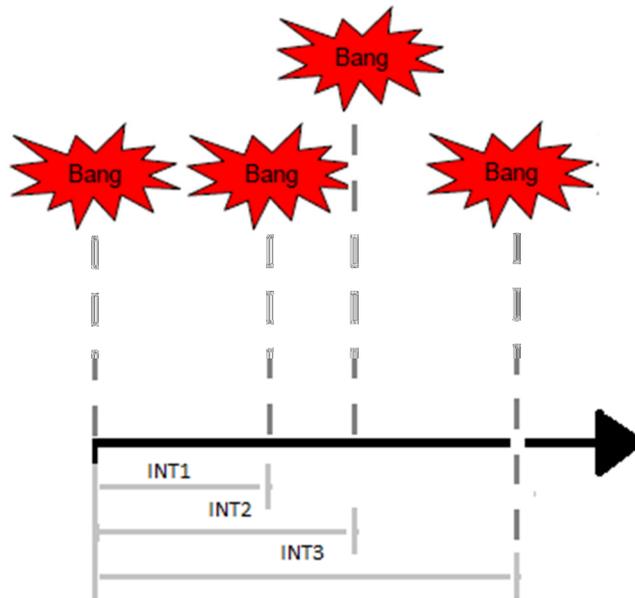


Figura 8: Línea de tiempo de Configuración Manual.

Se aprecia en la Figura 8 como a cada detonador se le asigna un tiempo de retardo con respecto al primer detonador.

- **Configuración con números de retardo:** En este modo de configuración el usuario asigna un intervalo de tiempo constante y a cada detonador registrado se le establece un retardo correspondiente a un múltiplo de ese intervalo, al igual que el caso anterior el intervalo de tiempo asignado es un tiempo absoluto.

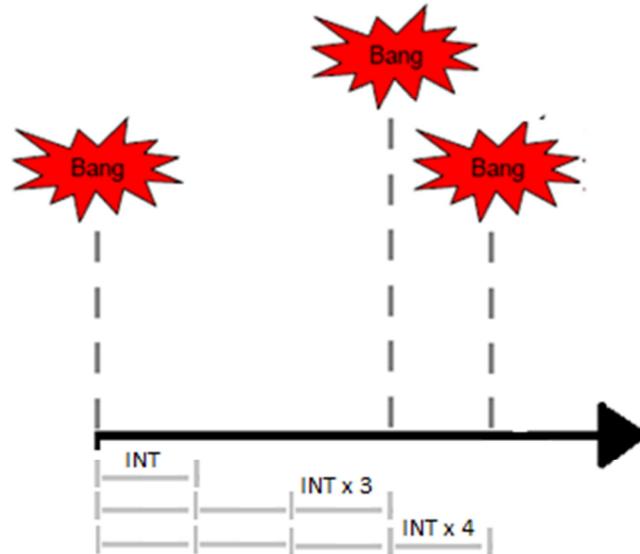


Figura 9: Línea de tiempo de Configuración con número de retardo.

- **Configuración con el diseño de tronadura SHOTPlus®-i (S):** Este modo de configuración es el más usado en la industria debido a la facilidad que presta este software para el diseño de una tronadura. *SHOTPlus®-i (S)* es un software que permite realizar un diseño de secuencia de tronadura en un computador, evaluar tronaduras y optimizarlas disminuyendo la probabilidad de presentar eventos como “*flying rocks*” o proyecciones de rocas, que son fragmentos de terreno que pueden salir eyectados, y vibraciones provocadas por las explosiones, lo cual se vuelve de gran importancia en minas que tienen zonas urbanas cercanas.

Esta opción de configuración sólo se encuentra disponible si existe un diseño de tronadura ingresado en el *Logger*. Al cargar datos en el dispositivo, basta con registrar los detonadores y el mismo *Logger* asigna los retardos correspondientes.

3.1.4.2 Registro de detonadores.

Luego de configurar el *Logger* se procede con el registro de detonadores, para esto se debe tener conocimiento del diseño de la tronadura, la cantidad de pozos perforados y los usados, el número de detonadores cargados en los pozos, el tipo de estos y el retardo asignado a cada uno. También debe asegurarse que la batería de los equipos, *Logger* y *Blaster*, estén 100% cargados y con todos los cables necesarios. Antes de registrar los detonadores se debe hacer una serie de pruebas: asociadas a revisar la continuidad a los conductores y así asegurar que no estén dañados; a los dispositivos electrónicos, *Logger* y *Blaster*, se les debe hacer un “*Auto Test*” para asegurar su correcto funcionamiento y finalmente se debe verificar que todos los *Logger* estén actualizados en su última versión.

Dado que los detonadores se accionan a un voltaje de 24 [V] no existe ningún peligro al momento del registro ya que este se realiza a 6 [V]. Para realizar el registro se conectan los detonadores en paralelo al *Logger* mediante el cable de conexión o cable arnés. El cable de conexión y el cable de los detonadores cumplen con el estándar Orica de conductores, el cual exige que la resistencia de estos sea de 130 [Ω /Km].

Cada uno de los detonadores posee un conector para la conexión con el *Logger* tal como se ve en Figura 10, este conector tiene unas láminas conductoras, las cuales al momento de cerrarlo cortan la aislación dejando el conductor del cable de conexión en contacto con el conductor del detonador. El conector debe abrirse solo al momento de la conexión y se debe procurar que el orden en que los cables del *Logger* son situados en el conector del detonador sea el mismo (como se aprecia en la figura amarillo arriba y verde abajo, o viceversa). Después de situar los conductores del cable de conexión, el conector se cierra y el *Logger* reconocerá al detonador guardando su ID y asignándole su retardo (aún sin programar), también chequea continuidad, detecta fugas de corriente, si las hubiese.

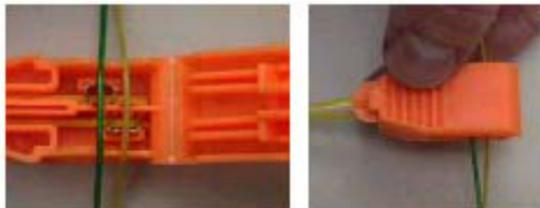


Figura 10: Conector detonador.

En la Figura 11 se aprecia el proceso de conexión de los detonadores al cable arnés y el registro de los detonadores mediante el *Logger*.



Figura 11: Conexión y registro de detonadores.

En caso de necesitar extender el cable de conexión entre el *Logger* y los detonadores, se debe seguir el siguiente procedimiento

- Cortar y pelar los cables a conectar (aproximadamente 3 [cm]) evitando cualquier rasguño en el cable, ya que esto puede resultar en pérdidas de corriente, voltaje o pérdida de continuidad si estos no son manipulados cuidadosamente.
- Juntar los extremos del conductor del mismo color y enrollarlos, luego aislar la conexión con cinta aisladora.

- Finalmente anudar el cable para que la manipulación de este no pueda provocar una rotura de la unión, perdiendo continuidad.

Para determinar que el proceso de conexión y registro de los detonadores se realizó en perfectas condiciones, se realizan una serie de pruebas, las cuales se explican a continuación.

3.1.4.3 Prueba de funcionamiento.

Este proceso se realiza inmediatamente después de registrar todos los detonadores correspondientes al *Logger* en uso. Esta prueba tiene como fin el comprobar que tanto el registro de estos, como todas sus conexiones se hayan efectuado correctamente. Además se comprueba que todos los conductores no hayan sido dañados en el proceso de “Carguío” y “Tapado de Pozos”.

Las pruebas que se realizan son: Prueba de Fuga, y Prueba de Detonadores, los cuales se explican detalladamente a continuación:

- **Prueba de Fuga (*Measure leakage*):** Esta prueba se realiza para medir las posibles fugas de corriente o cortocircuitos que puedan presentarse en el sistema. Si el *Logger* detecta pequeñas fugas de corriente, este lanzará un mensaje de advertencia para que ésta se reduzca si es posible, pero esto no provoca un retraso en el proceso debido a que la magnitud de la fuga no afecta la circulación de energía en los detonadores. En el caso de que el *Logger* detecte una fuga mayor a los 15 [mA] se debe encontrar el origen de ésta y eliminarla antes de poder continuar con el proceso. En caso de estar en presencia de un cortocircuito (fuga sobre los 80 [mA]), al igual que en el caso anterior, se debe identificar la falla y eliminarla, ya que el *Blaster* no dejará realizar la tronadura en presencia de esta falla.

Para detectar el origen de la fuga se realiza una búsqueda de la fuente, siguiendo la metodología de árbol de decisión binario, esta búsqueda consiste en dividir el cable de conexión en 2 y aplicar la prueba de fuga en ambas mitades, cuando se encuentre la porción de cable que presenta la falla se realiza el mismo procedimiento hasta encontrar la otra mitad con problemas, así sucesivamente hasta detectar completamente la causa de la fuga. Al encontrar la fuente y si esta proviene de un detonador, este debe cambiarse. Si el pozo se encuentra tapado, se debe conectar el detonador no eléctrico de respaldo, debiéndose asignar nuevamente el tiempo de retardo asignado al detonador.

- **Prueba de Detonadores (*Detonators test*):** Esta prueba se utiliza para comprobar la correcta conexión de los detonadores verificando que la cantidad de detonadores conectados sea la indicada y que el largo de la línea de conexión no exceda los 2 [Km]. Finalizando la prueba el *Logger* arroja un informe indicando si existen o no errores, a qué detonador corresponde el error y de qué tipo es éste.

Luego de que todas las pruebas de conexión, de fuga y de comunicación se han realizado de forma correcta, se puede proceder a la etapa final del proceso de detonación, la cual consiste en iniciar la secuencia de tronadura.

3.1.5 Secuencia de tronadura.

Esta etapa consiste en conectar él o los *Logger* al *Blaster* por medio de un cable de disparo, cumpliendo los siguientes protocolos de seguridad, para evitar posibles fallas en el proceso de tronadura.

- Los detonadores deben estar conectados al *Logger* por medio del cable de conexión que provee Orica.
- El *Logger* se debe ubicar en un lugar seguro, cercano a la malla de detonadores.
- En caso de utilizar detonación inalámbrica, la señal de comunicación entre el emisor y el receptor del *Blaster* debe estar en óptimas condiciones. En el caso de detonación por cable hay que verificar que la conexión entre el *Blaster* y el *Logger* esté en perfectas condiciones.
- Durante el proceso de conexión del cable de disparo el *Logger* debe estar apagado.
- Ubicar los circuitos de los *Logger* separados unos de otros, que los cables de conexión no de cada *Logger* no se crucen.

Luego de revisar que se cumplan las medidas de seguridad expuestas, la secuencia de iniciación debe comenzar, la cual consiste en que el *Blaster* revisa que todos los dispositivos utilizados estén en perfectas condiciones, para luego comenzar con la programación de los detonadores y finalmente realizar la tronadura.

3.1.5.1 Secuencia de iniciación

Como se mencionó anteriormente, antes de conectar el *Logger* con el *Blaster* mediante el cable de disparo, el *Logger* debe estar apagado. Los *Logger* se conectan en paralelo con el *Blaster*, luego de esto se da inicio a la secuencia de iniciación. La secuencia consiste primero en un auto test del *Blaster*. En caso de que no se presente ninguna falla procede a confirmar que los ID del *Logger* y la cantidad de estos coincidan con lo indicado en el *Blaster*.

Al confirmar los ID, el *Blaster* comienza a hacer una prueba de detonadores, mostrando en pantalla un resumen de los *Logger* y los detonadores conectados en la malla, pasando a una etapa final donde se muestra un resumen más detallado de los *Logger* y la cantidad de detonadores conectados a estos. Estos resúmenes se conocen como *Logger Report*.

3.1.5.2 Secuencia de programación.

La secuencia de programación se inicia al confirmar que el *Logger Report* coincide con lo que se aprecia en terreno, el tiempo aproximado que le toma al *Logger* programar todos los detonadores es de aproximadamente 4 minutos, para una malla de 4800 detonadores, en caso de presentarse fallas, éstas se presentan en un informe de errores.

Luego de la programación, cada *Logger* verifica que los detonadores hayan sido programados correctamente y si están en condiciones de ser quemados, en caso afirmativo se procede a la secuencia de quema o detonación.

3.1.5.3 Secuencia de quema.

Esta acción se lleva a cabo solo si todas las secuencias anteriores se cumplen sin errores, o estos errores pueden aislarse o eliminarse. Para la operación se utiliza el *Blaster*, el cual muestra en pantalla un mensaje de confirmación de quema y un conteo regresivo de 10 minutos, en caso de no confirmar la tronadura dentro de esos 10 minutos, el *Blaster* se apaga automáticamente. Si la tronadura se confirmase, el *Blaster* realizará el último chequeo, el cual consiste en revisar que el primer y último detonador conectado a cada *Logger* en terreno, si se aprueba esta revisión el *Blaster* envía finalmente la señal de quema, y la tronadura se realiza.

3.2 Diagrama de bloques de proceso de detonación.

Luego de realizar una descripción detallada y para dar mayor facilidad al análisis FMECA se debe dividir el proceso recién explicado en sistemas y subsistemas, esta división se realiza siguiendo el mismo orden utilizado anteriormente. Los sistemas y subsistemas que componen el diagrama de bloques se presenta a continuación.

- Sistema 1: Almacenamiento, transporte, y distribución.
 - Subsistema 1.1: Almacenamiento de detonadores.
 - Subsistema 1.2: Transporte de detonadores.
 - Subsistema 1.3: Distribución de detonadores en punto de quema
- Sistema 2: Primado, carguío y tapado de pozos.
 - Subsistema 2.1: Primado de pozos.
 - Subsistema 2.2: Carguío de explosivos.
 - Subsistema 2.3: Tapado de pozos.
- Sistema 3: Registro de detonadores.
 - Subsistema 3.1: Configuración *Logger*.
 - Subsistema 3.2: Registro de detonadores.
 - Subsistema 3.3: Prueba de funcionamiento.
- Sistema 4: Secuencia de tronadura.
 - Subsistema 4.1: Secuencia de iniciación.
 - Subsistema 4.2: Secuencia de programación.
 - Subsistema 4.3: Secuencia de quema.

3.3 Identificar modos de falla.

Una de las etapas más importantes del análisis FMECA es la identificación de los modos de falla del sistema, para esto se analizan las fallas que se podrían presentar en cada subsistema.

Para dar claridad a la explicación, primero se detallan los errores que pueden surgir en el *Logger*, luego los errores apreciados en el *Blaster*, y finalmente los errores que solo se aprecian en terreno, por medio de los mismos operadores.

3.3.1 Errores apreciados en *Logger*

Durante todo el proceso de detonación el *Logger* realiza una serie de pruebas para detectar posibles problemas que pueden presentar los detonadores, a continuación se detallan los distintos tipos de errores que se presentan en cada una de las etapas del sistema.

Registro de detonadores:

Durante esta etapa del proceso se pueden presentar los siguientes informes de errores en el *Logger*:

- ***Advertencia de fuga de corriente:*** Se advierte una fuga de corriente del sistema que sobrepasa los 5[mA].
- ***Alta fuga de corriente:*** Fuga de corriente supera los 15[mA].
- ***Sin respuesta:*** No existe comunicación entre el *Logger* y el detonador.
- ***Error lectura:*** El *Logger* no puede recibir bien el ID del detonador.
- ***Registro repetido:*** Se presenta cuando un detonador es desconectado y conectado nuevamente.
- ***Detonador defectuoso:*** El *Logger* detecta fallas en el detonador.

Pruebas de funcionamiento:

En esta etapa, tal como se dijo anteriormente, se realizan dos pruebas, la prueba de fuga de corriente, y la prueba de detonadores. La primera prueba lanza los siguientes informes de error.

- ***Advertencia de fuga de corriente:*** Existen fugas de corriente mayores a los 5 [mA] y menores a los 15[mA].
- ***Alta fuga de corriente:*** Existen altas fugas de corriente, superando los 15[mA].

Luego, se realiza la segunda prueba, la prueba de detonadores, el cual comprueba que todas las conexiones estén en buen estado, al terminar esta prueba el *Logger* lanza un informe de problemáticas indicando la cantidad de errores totales y el ID del detonador que presenta problemas, con este informe se realiza una prueba detonador por detonador (solo los defectuosos) para identificar el problema, Los mensajes de error que pueden apreciarse son los siguientes.

- **Sin respuesta:** El *Logger* no recibe respuesta del detonador
- **Error de datos:** Comunicación entre *Logger* y detonador no es confiable, produciéndose pérdidas en información.
- **Detonador defectuoso:** El *Logger* detecta una falla en el detonador.

3.3.2 Errores apreciados en *Blaster*.

El *Blaster* en las etapas que es utilizado, también realiza pruebas y muestra reportes de errores al igual que el *Logger*, a continuación se detallan los informes de errores que se aprecian en el *Blaster*, indicando en qué etapa del proceso ocurren.

Secuencia de iniciación:

Al principio del proceso de iniciación del *Blaster*, este realiza un auto test, en donde éste revisa el estado de su hardware, las posibles fallas que se podrían mostrar en pantalla son:

- **ROM.**
- **RAM.**
- **Batería.**
- **Voltaje.**
- **Hardware.**

Luego del auto test, el *Blaster* realiza una prueba de funcionamiento de los *Logger* conectados a éste, en esta etapa también se pueden dar una serie de mensajes de error que son detallados a continuación.

- **Ningún *Logger* conectado:** El *Blaster* no detecta *Logger* conectados a él.
- **ID *Logger*:** Dos o más *Logger* poseen el mismo ID.
- **Error de datos:** Comunicación entre *Logger* y *Blaster* no es clara.
- **Error de *Logger*:** Existe un problema en el hardware del *Logger*.
- **Batería baja:** La carga de la batería es menor al 10% de su capacidad.

Secuencia de programación:

Inmediatamente después de iniciar la secuencia de programación el *Blaster* solicita la última prueba de detonadores y *Logger*, para corroborar que el sistema está en óptimas condiciones.

- **Voltaje del *Logger*:** El voltaje de alimentación que el *Blaster* entrega al *Logger* es insuficiente.
- **Error de datos:** La comunicación entre el *Logger* y el *Blaster* no es confiable.
- **Fuga de corriente:** La lectura de fuga de corriente supera los 15[mA].
- **Corto circuito:** La lectura de fuga de corriente supera los 100[mA].

Luego de la última revisión se procede a la programación de los detonadores, los errores asociados a este proceso son:

- **Sin respuesta:** El detonador no responde.
- **Error de datos:** La comunicación entre el detonador y el *Logger* se ve interrumpida.
- **No programado:** Se detecta un detonador que no ha sido programado. En caso de seguir con la tronadura, este no explotará.
- **Bajo voltaje en condensador:** El condensador del detonador no está cargado, debido a pérdidas de energía.
- **Detonador defectuoso:** El detonador no se encuentra funcionando en buenas condiciones.

Secuencia de quema:

- ***Logger* desconectado:** Problemas de comunicación entre *Logger* y *Blaster*.
- **Cable Arnés:** Este mensaje aparece si falla la revisión del primero y / o ultimo detonador.
- **Fuga de corriente muy alta:** Si la corriente de fuga medida en el cable de tronadura es demasiado alta.

3.3.3 Errores apreciados en terreno.

Existen un tipo de fallas que no se pueden apreciar en el *Logger* o *Blaster*, estas fallas sólo se aprecian en terreno, ocurren principalmente en la etapa de primado, “Carguío” y “Tapado de

Pozos” provocados generalmente por el incorrecto manejo de los elementos usados. Estos errores se aprecian por los mismos operarios y en su mayoría se detectan al momento de ser provocados.

3.3.3.1 Primado de pozos.

- **Caída Booster:** El *Booster* debe depositarse cuidadosamente en el pozo, cuando esto no se cumple, el *Booster* puede caer varios metros golpeándose fuertemente.

3.3.3.2 Carguío de pozos.

- **Flotación Booster:** La manguera utilizada para descargar el explosivo al pozo, se sitúa al fondo del pozo, resultando en que el *Booster* sea impulsado hacia arriba y en vez de quedar inserto en el explosivo, queda encima de este.
- **Perdida Booster:** La manguera se sitúa a mucha distancia del fondo del pozo y la fuerza con la que cae el explosivo puede arrancar el detonador de las manos del operario y caer.
- **Atasco de manguera:** Caen piedras dentro del pozo al momento de cargar el explosivo, lo que resulta en un atasco de manguera.
- **Exceso de explosivo:** Se agrega al pozo más explosivo del requerido.

CAPITULO 4: Desarrollo de FMECA.

En el capítulo anterior se describió la base de conocimiento para realizar el estudio FMECA, En este capítulo se estudian los modos de falla del sistema, sus causas, efectos, criticidad y frecuencia, con estos datos se proponen medidas preventivas a estas fallas.

4.1 Identificación de modos de falla.

Según lo analizado anteriormente durante todo el proceso de detonación se presenta un total de 23 tipos de fallas. Debido a la gran cantidad de fallas posibles, estas se agruparon según su similitud y las causas que las desencadenaban, estos modos de falla se dividen y caracterizan entre Fallas de Comunicación, Fallas Eléctricas y Fallas de Operación.

Fallas de Comunicación.

- ***Sin respuesta:*** No se obtiene respuesta de los dispositivos.
- ***Error de datos:*** La información recibida no es apta.

Fallas Eléctricas.

- ***Fuga de corriente:*** Incluye las advertencias de fuga de corriente, los avisos de alta y los cortocircuitos.
- ***Voltaje en dispositivos:*** incluye problemas en el voltaje de alimentación de los *Logger* como el de los detonadores, también problemas en la programación de los detonadores.

Fallas de Operación.

- ***Problemas en dispositivos:*** Incluye problemas en el hardware de los dispositivos, como la RAM, la ROM, batería, o problemas en los detonadores.
- ***Registro repetido.***
- ***Cables desconectados:*** Esto incluye tanto la desconexión del cable arnés como la del cable de tronadura.
- ***Falla de operación:*** Incluye caída de *Booster* y atasco de manguera.

- **Exceso de explosivo:** El pozo se le aplica más explosivo del especificado en el diseño de tronadura.

En la Tabla 1 se muestra cada modo de falla y en qué etapa del proceso se presenta.

Tabla 1: Resumen de modos de falla y aparición.

	Sistema 1			Sistema 2			Sistema 3			Sistema 4		
	Almacenamiento	Transporte	Distribución	Primado	Carguío	Tapado	Configuración	Registro	Test de func.	Iniciación	Programación	Quema
Modo de falla	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
Fuga de corriente								X	X		X	X
Sin respuesta								X	X		X	
Error de datos								X	X		X	X
Problemas en dispositivos								X	X		X	
Registro repetido								X				
Cables desconectados										X	X	
Voltaje en dispositivos										X	X	
Falla de operación				X	X							
Exceso de explosivo					X							

4.2 Análisis de modos de falla: Causas y efectos.

En esta sección se realiza un análisis detallado de los modos de falla, especificando qué lo causa, cuáles son sus efectos y finalmente cuales son las medidas correctivas que se proponen.

4.2.1 Detalle de causas.

En adelante se explican las principales causas de los modos de falla, identificando en qué parte del proceso ocurren. Se definen 3 niveles en cada causa, dependiendo del daño que esta pueda provocar, siendo el Nivel 1 el más leve y el Nivel 3 el más crítico.

- **Desconexión de cables:** Se produce a lo largo de todo el proceso, principalmente debido a un descuido en la manipulación de los conectores.

Nivel 1: El conector de los detonadores se desconecta debido a una deficiente manipulación de éste, o la conexión del cable arnés o el de tronadura no es firme, provocándose problemas de conductividad o la desconexión de los conductores.

Nivel 2: Debido a un mal manejo el conector del detonador o del *Blaster* o *Logger*, se destruye.

- **Daño en aislación:** Ocurre principalmente durante el proceso de “Carguío” o “Tapado de Pozos”, esto debido a que, al depositar el explosivo o el material que cubre los pozos, se produce un roce entre el conductor y el material, lo cual ocasiona que el aislante de los conductores del detonador se deteriore.

Nivel 1: Leve daño en aislación, que sólo es perceptible debido a una pequeña fuga de corriente.

Nivel 2: Daño en aislaciones de 2 o más conductores, provocando fugas de corriente o pérdidas de voltajes.

Nivel 3: Daño grave en las aislaciones provocando que éstas interactúen entre ellas y se provoquen efectos capacitivos causando mayores fugas de corriente. O de otro modo daño en las aislaciones que se ven afectadas por corrientes parásitas.

- **Daño en conductor:** Se ocasiona por problemas en el manejo de los cables o, al igual que el caso anterior, por problemas en el “Carguío” o “Tapado de Pozos”, donde el material puede causar daños en el conductor, como pequeños piquetes que pueden provocar problemas en la comunicación.

Nivel 1: Pequeño daño en conductor.

Nivel 2: Daño moderado en un conductor o daño pequeño en más de un conductor provocando interacciones no deseadas entre estos.

Nivel 3: Daño severo en uno o más conductores, provocando reacciones no deseadas entre conductores y terreno.

- **Interferencia:** Es causada por fuertes radiaciones electromagnéticas externas a la malla de tronadura, esta radiación afecta la comunicación entre *Logger* y *Blaster* o entre *Logger* y detonadores. Las fuentes de radiación pueden ser antenas de comunicación (wifi, celular, comunicación de radio) o fuentes de alta tensión, como cables alimentadores de palas eléctricas o perforadoras.

Nivel 1: Interferencia leve, provocada por dispositivos que son fácilmente despejables del terreno, como teléfonos celulares o equipos de radio de las camionetas.

Nivel 2: Interferencia media, provocadas por equipos que si bien no se pueden aislar del terreno si se puede minimizar el efecto de la radiación, como por ejemplo los cables de alimentación de las maquinas presentes en el terreno.

Nivel 3: Interferencia alta, provocadas por equipos con muy alta radiación la cual difícilmente puede ser apantallada, como las antenas de comunicación que pueden estar ubicadas cerca del lugar de tronadura.

- **Daño de fábrica:** Como su nombre lo indica, el daño viene desde la fábrica, el nivel de esta falla a diferencia de los casos anteriores depende de cuando se detecta y que tan fácil es reemplazar el dispositivo defectuoso.

Nivel 1: Contempla todas las fallas que se presentan antes del montaje de los elementos en la tronadura, o cuando los dispositivos que presentan el problema son fácilmente reemplazables.

Nivel 2: Contempla las fallas que se presentan durante el montaje de la tronadura, y el reemplazo de los dispositivos no se puede realizar directamente.

Nivel 3: Fallas que ocurren tanto antes o durante el montaje de la tronadura, pero los dispositivos con problemas, en específico *Logger* y *Blaster*, no pueden ser reemplazados.

- **Daño de operación:** Se refiere a los problemas ocasionados meramente por manipulación y por no seguir el estándar de operación de la empresa. Uno de estos problemas es el ocasionado al no revisar los elementos eléctricos antes de salir a terreno, por lo que una batería puede estar descargada o un dispositivo en mal estado, al igual que en el caso anterior esta causa se clasifica en niveles dependiendo del momento en que aparece el problema o la facilidad de reparar el daño.

Nivel 1: Falla que se presenta antes del montaje de la tronadura, y el reemplazo del elemento dañado es simple

Nivel 2: Se presenta en el momento del montaje de la tronadura, con un reemplazo del elemento dañado que toma más tiempo que en el caso anterior.

Nivel 3: Esta falla ocurre en cualquier momento de la operación, pero los dispositivos dañados no cuentan con elementos para reemplazarlos.

4.2.2 Detalle de modos de falla.

A continuación se desarrolla cada modo de falla, especificando sus causas, efectos, y las medidas usadas actualmente por Orica para componer la falla.

Fallas de Comunicación:

4.2.2.1 Modo de falla: Sin respuesta.

- Detonador desconectado
- Daños en conductor

Esta falla se presenta en distintas partes del proceso y se debe principalmente a una desconexión de los cables o un daño severo en los conductores que impide la comunicación entre detonador y *Logger* o entre *Blaster* y *Logger*. Si la falla es causada por una desconexión de Nivel 1, los efectos son leves, debido a que solo basta con reconectar el cable que causa problemas, lo cual

toma poco tiempo. Si la desconexión es de Nivel 2, implica que la conexión de los detonadores está destruida, entonces se procede a cambiar el detonador electrónico por uno pirotécnico.

Para el caso de un daño en el conductor de Nivel 1, 2 o 3, este modo de falla no se hará presente, ya que no existirá una pérdida en la comunicación. En la Tabla 2 se resume las medidas de mitigación para este modo de falla.

Tabla 2: Resumen de medidas correctivas para Modo de falla “Sin Respuesta”.

		Sin Respuesta		
		Registro	Test de func	Programación
Causa 1 Desconexión de cables	Nivel 1	1	1	1
	Nivel 2	2	2	2
Causa 3	Nivel 1	-	-	-
	Nivel 2	-	-	-
Daño conductor	Nivel 3	2	2	2

Dónde los numerales 1y 2 significan:

Reconexión.

1. Reemplazo detonador electrónico a pirotécnico.

4.2.2.2 Modo de falla: Error de datos:

- Daños en conductor.
- Daños en aislación.
- Interferencia.

Este error se produce usualmente cuando existe conexión entre los equipos pero la comunicación entre ellos no es fidedigna. Esto se debe a: interferencias de señales electromagnéticas, a interacciones entre distintos daños en la aislación o en el conductor con el terreno, el cual puede provocar efectos capacitivos en el sistema, formando una suerte de filtro pasa

bajos, el cual debido a la naturaleza digital de la señal, ésta se degenera obteniéndose el efecto que se muestra en la Figura 12.

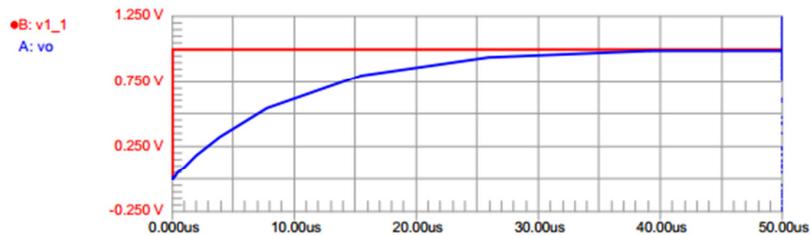


Figura 12: Respuesta al escalón de un filtro pasa bajos.

En la Figura 12 se aprecia la respuesta al escalón de un filtro pasa bajos, este efecto muestra lo que puede suceder en la señal que va hacia los detonadores, la línea roja muestra la señal original, la cual es una onda cuadrada, y la línea azul muestra la onda modificada al estar en presencia de un filtro pasa bajos.

El efecto recién explicado sólo se presenta para daños en la aislación o en el conductor de Nivel 3, o para interferencia de cualquier nivel. Si la falla es causada por un daño en la aislación o en el conductor en la etapa de registro entonces, se debe reemplazar inmediatamente el detonador electrónico por uno pirotécnico, ahora si ocurre en el “Prueba de Funcionamiento”, en la “Programación” o en la “Quema”, la falla es más crítica debido a que en estos procesos la alimentación del circuito aumenta de 4 a 24 [V], en este caso se debe realizar una búsqueda binaria de los detonadores que podrían estar causando en mayor parte este efecto y reemplazarlos por los detonadores pirotécnicos.

Otra razón importante para que se presente esta falla es la interferencia que pueden causar distintas fuentes de energía alrededor de la tronadura, como por ejemplo los cables de alimentación de las maquinarias usadas en la mina, o torres de alta tensión, o fuentes de señal de comunicación. Si la interferencia es de Nivel 1 bastaría con despejar la fuente, por ejemplo, apagar las maquinarias. Si la interferencia está presente durante la “Programación” o el “Proceso de Quema” los efectos pueden ser mayores debido a que la quema se hace a voltajes más altos, entonces, se debe minimizar el efecto de la interferencia, por ejemplo situando el cable de alta tensión de forma que quede perpendicular a la dirección de los cables afectados pertenecientes al circuito de quema.

Al igual que en el caso anterior si la falla es causada por una interferencia de Nivel 2 o 3, primero se debe intentar despejar la fuente, y si esto no es posible, se deben minimizar los efectos reorientando los cables que se ven afectados, si la falla persiste en el “Proceso de Quema” se pueden producir errores aleatorios debido a que la interferencia es media o alta y el voltaje de operación es más alto, en este caso la tronadura debe suspenderse.

Tabla 3: Resumen de medidas correctivas para Modo de falla “Error de Datos”.

		Error de datos			
		Registro	Test de func	Programación	Quema
Causa 2 Daño aislación	Nivel 1	-	-	-	-
	Nivel 2	-	-	-	-
	Nivel 3	1	2	2	2
Causa 3 Daño conductor	Nivel 1	-	-	-	-
	Nivel 2	-	-	-	-
	Nivel 3	1	2	2	2
Causa 4 Interferencia	Nivel 1	-	3	3	4
	Nivel 2	-	3,4	3,4	5
	Nivel 3	-	3,4	3,4	5

Dónde los numerales 1, 2, 3, 4 y 5 significan:

1. Reemplazo detonador electrónico a pirotécnico.
2. Búsqueda binaria de fuente de falla y reemplazo del detonador por uno pirotécnico.
3. Despeje de la fuente de interferencia.
4. Minimizar efectos de interferencia.
5. Suspensión de tronadura.

Fallas Eléctricas:

4.2.2.3 Modo de falla: Fuga de corriente.

- Daños en conductor
- Daños en aislación

Ambas causas afectan tanto a los cables de los detonadores, al cable de conexión o al cable arnés, siendo la más usual y la más crítica la que afecta a los cables de los detonadores. Esta falla puede ser más o menos crítica dependiendo del nivel que presente cada causa, a mayor nivel los efectos pueden ser mayores, debido a que los daños pueden interactuar entre si provocando flujo de corriente de un conductor a otro, o provocando efectos capacitivos entre el detonador y el terreno.

Si la falla ocurre en la etapa de “Registro de Detonadores” sus efectos dependerán del nivel de la causa que la provoque, si el daño en conductor o aislación es de Nivel 1, en pantalla solo aparecerá una advertencia de fuga de corriente, este mensaje no interrumpe en ninguna medida el proceso. Si la causa de la falla, cualquiera que esta sea, es de Nivel 2 implica una fuga mayor de corriente, que ya no puede pasarse por alto, en este caso y debido a que el pozo ya fue cargado y tapado, se debe intentar minimizar la fuga, para esto sólo se puede cambiar la polaridad del detonador. Si las causas son de Nivel 3, implica que la fuga de corriente es mayor y no es posible despejarla ni minimizarla, por lo que es necesario cambiar el detonador electrónico por el pirotécnico, lo cual provoca un aumento en las vibraciones en el terreno, lo que podría afectar a otras tronaduras o a localidades urbanas cercanas.

Si ahora la falla se presenta después del “Registro de Detonadores”, en el “Prueba de Funcionamiento” o en la “Programación”, los efectos suelen ser más elevados debido a que todos los detonadores están conectados al *Logger*. Si la falla es ocasionada por un daño de conductor de Nivel 1, y no hay daño en la aislación, entonces ésta solo se reflejará en una advertencia de fuga de corriente en los dispositivos, lo cual, como se vio anteriormente, no afecta en gran medida a la tronadura. Si la falla es a causa de un problema en la aislación de Nivel 1 o problemas en el conductor de Nivel 2, se presenta en pantalla un mensaje de fuga de corriente, por lo que se debe realizar una búsqueda binaria de él o los detonadores que presenten problemas y cambiar la polaridad del más crítico. Si la falla ocurre por un daño en la aislación de Nivel 2, entonces, se debe realizar búsqueda binaria de él o los detonadores con falla, si la falla se presenta en 1 detonador, a

este se le conecta un *Logger* exclusivo, en cambio si la falla se produce en más detonadores, la malla se divide en las partes que sea necesaria y a cada fracción se le asigna un *Logger* de tal forma que las fugas de corrientes también sean fraccionadas y éstas no afecten las nuevas submallas. Si la falla se produce por un daño en la aislación y/o en el conductor es de Nivel 3, implica que la fuga de corriente es tan alta que se debe buscar la fuente de éstas y reemplazar el detonador electrónico por uno pirotécnico.

Si las fallas aparecen en la “Etapa de Quema”, los efectos y las acciones para suprimir el problema son más severos, debido a que aparecen porque no se pudieron despejar en la etapa anterior. Si la causa de la falla es por un daño en el conductor de Nivel 1, entonces se procede a dividir la malla para que la fuga de corriente no sean prohibitivas de realizar la tronadura, si la falla se presenta en un detonador, o sea, los efectos no se pueden disminuir dividiendo la malla, se asigna un *Logger* exclusivo a ese detonador. Si la falla es provocada por un daño en el conductor Nivel 2 entonces el detonador que presenta más problemas se reemplaza por un detonador pirotécnico. Si la falla es causada por un daño en el conductor o en la aislación de Nivel 3, se debe suspender la tronadura.

A continuación se muestra una tabla resumen de los métodos de mitigación de las fallas, especificando el momento en que ésta ocurre y qué la causa.

Tabla 4: Resumen de medidas correctivas para Fuga de Corriente.

		Fuga de Corriente			
		Registro	Test de func	Programación	Quema
Causa 2 Daño aislación	Nivel 1	1	4	4	5
	Nivel 2	2	5	5	6
	Nivel 3	3	6	6	7
Causa 3 Daño conductor	Nivel 1	1	1	1	1
	Nivel 2	2	4	4	4
	Nivel 3	3	6	6	7

Dónde los numerales 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 significan:

1. Advertencia fuga corriente.
2. Invertir polaridad de detonador.
3. Reemplazo detonador electrónico a pirotécnico.
4. Búsqueda binaria de fuente de falla e invertir polaridad de esta
5. Búsqueda binaria de fuente de falla y división de la malla o asignación de un *Logger* único a fuente de falla.
6. Búsqueda binaria de fuente de falla y reemplazo del detonador por uno pirotécnico.
7. Suspensión de tronadura.

4.2.2.4 Modo de falla: Voltaje en dispositivos.

- Daños en conductor
- Daños en aislación
- Interferencia

Estas causas ocasionan pérdidas de voltaje en los conductores debido a los efectos capacitivos que se forman entre los conductores dañados y el terreno, o por aumento de la resistividad del cable, provocando que no se alcance el voltaje necesario para el funcionamiento de los dispositivos.

Si la falla ocurre en el proceso de iniciación y ésta es provocada por un daño en la aislación Nivel 2, es porque el voltaje en el detonador es insuficiente, por esto se deben ajustar las conexiones entre el *Logger* y los detonadores. En cambio, si la causa es un daño en aislación o conductor de Nivel 3, entonces se debe cambiar el cable de conexión del *Logger* o *Blaster*, según corresponda. Si la falla ocurre en el “Proceso de Programación” y ésta es causada por un daño en la aislación de Nivel 2 se debe realizar búsqueda binaria de el o los detonadores que presentan falla e invertir polaridad de estos, si esto no funciona se debe dividir la malla por la mitad y en el centro conectar el *Logger* a las dos submallas. Si la falla es por daño en el conductor o en la aislación y ésta es de Nivel 3, los efectos capacitivos con el terreno son más evidentes por lo que se debe realizar una búsqueda binaria de los detonadores que causan el problema y reemplazarlos por un detonador pirotécnico.

Otra causa de esta falla es la interferencia, que a pesar de que no reduce el voltaje en los dispositivos, si afecta el voltaje de la señal por el ruido que la interferencia electromagnética añade a la señal. Si la interferencia es de Nivel 2 y el problema se presenta en la etapa de iniciación, entonces se debe despejar la fuente de interferencia, si el problema se sigue haciendo presente en el “Proceso de Programación”, entonces se debe intentar minimizar los efectos de la interferencia. Si la interferencia es de Nivel 3 y el problema se presenta en la etapa de iniciación entonces se debe intentar minimizar los efectos, si esto persiste en la “Etapa de Programación” entonces, se debe suspender la tronadura. En la Tabla 5 se muestra un resumen de lo comentado.

Tabla 5: Resumen de medidas correctivas para Modo de falla “Voltaje en Dispositivos”.

		Voltaje en Dispositivos	
		Iniciación	Programación
Causa 2 Daño aislación	Nivel 1	-	-
	Nivel 2	1	3
	Nivel 3	2	4
Causa 3 Daño conductor	Nivel 1	-	-
	Nivel 2	-	-
	Nivel 3	2	4
Causa 4 Interferencia	Nivel 1	-	-
	Nivel 2	5	6
	Nivel 3	6	7

Dónde los numerales 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 significan:

1. Ajustar conexiones de *Logger* o *Blaster*.
2. Reemplazo cable de conexión.
3. Búsqueda binaria de fuente de falla e invertir polaridad de esta o división de malla.
4. Búsqueda binaria de fuente de falla y reemplazar el detonador causante por uno pirotécnico.
5. Despejar fuente de interferencia.
6. Minimizar efectos de interferencia.
7. Suspensión de tronadura.

Fallas de operación:

4.2.2.5 Modo de falla: Problemas en dispositivos:

- Falla de fábrica
- Mal manejo

Esta falla se puede dar tanto por problema de fábrica como por un daño provocado en la operación. El *Logger*, *Blaster* y los detonadores son los dispositivos que se ven afectados por estos problemas, en el caso de que la falla se presente en el “Registro de Detonadores” es por problemas relacionados directamente con estos, en la etapa de “Test” o “Programación” la falla afecta a *Logger* y/o *Blaster*.

Si la falla ocurre en el proceso de “Registro de Detonadores” ya sea por problema desde fábrica o por falla de operación, se debe reemplazar el detonador electrónico por uno pirotécnico. Si ahora la falla se produce en el “Prueba de Funcionamiento” o en el “Proceso de programación” y ésta se debe a un problema de fábrica o daño durante la operación, se debe reemplazar el dispositivo y se puede continuar con el proceso. Si no existe repuesto para cambiar los dispositivos, se debe suspender la tronadura hasta que se tenga acceso a dispositivos funcionales. En la Tabla 6 se muestra un resumen de todo lo detallado anteriormente.

Tabla 6: Resumen medidas correctivas para Modo de falla: “Problemas en Dispositivos”.

		Problemas en dispositivos		
		Registro	Test de func	Programación
Causa 5 Daño fábrica	Nivel 1	-	-	-
	Nivel 2	1	2	2
	Nivel 3	-	3	3
Causa 6 Daño operación	Nivel 1	-	-	-
	Nivel 2	1	2	2
	Nivel 3	-	3	3

Dónde los numerales 1, 2 y 3 significan:

1. Reemplazo detonador electrónico a detonador pirotécnico.
2. Reemplazo de dispositivos electrónicos.
3. Suspensión tronadura.

4.2.2.6 Modo de falla: Registro repetido:

- Desconexión de cables.

Esta falla se produce cuando se conecta y desconecta un detonador en la etapa de “Registro de Detonadores”, esto puede ser causado por una conexión insegura (Nivel 1) y sólo basta volver a conectar el detonador y continuar con la operación. Si la causa de la falla es de Nivel 2 implica que el conector está malo o destruido por lo que se debe reemplazar el detonador por uno pirotécnico.

Tabla 7: Resumen medidas correctivas para Modo de falla “Registro Repetido”.

		Registro repetido
		Registro
Causa 1 Desconexión de cables	Nivel 1	1
	Nivel 2	2

Dónde los numerales 1 y 2 significan:

1. Reconexión.
2. Reemplazo detonador electrónico por pirotécnico.

4.2.2.7 Modo de falla: Cables desconectados.

- Desconexión de cables

Al igual que en el caso anterior esta falla se debe a una conexión mal hecha o a un conector o conductor destruido. El problema se presenta en la conexión entre *Logger* y *Blaster*. Si el nivel de la causa es 1, entonces basta con realizar nuevamente la conexión, si la causa es de Nivel 2 entonces el cable arnés o el de tronadura se deben reemplazar. En la Tabla 8 se aprecia lo mencionado anteriormente.

Tabla 8: Resumen medidas correctivas para Modo de falla “Sin Conexión”.

		Sin conexión	
		Registro	Programación
Causa 1 Desconexión de cables	Nivel 1	1	1
	Nivel 2	2	2

Dónde los numerales 1 y 2 significan:

1. Reconectar
2. Reemplazar detonador electrónico por pirotécnico.

4.2.2.8 Modo de falla: Falla de operación.

- Daño de operación.

Esta falla se da por un problema en la manipulación de los dispositivos y las consecuencias, en este caso, dependen de si existen o no elementos para el reemplazo de los dañados. Si la falla ocurre en el “Primado”, es por una caída del Booster o por un golpe severo del Booster con el fondo del pozo, si existen elementos extras en tronadura se debe volver a primar el pozo, en caso de no existir reemplazo, se debe reemplazar el detonador electrónico por uno pirotécnico. Si la falla ocurre en la etapa de “Carguío”, se debe a un atasco de las mangueras que se utilizan para depositar

el explosivo en el pozo, si existe la posibilidad de desatascarla o de reemplazar la manguera dañada, se debe realizar, si no existe la posibilidad de un reemplazo, entonces se debe suspender la tronadura. En la Tabla 9 se muestra un resumen de las medidas de mitigación del error.

Tabla 9: Resumen de medidas correctivas para Modo de falla “Caída de Booster” y “Atasco de Mangueras”.

		Caída Booster y atasco mangueras	
		Primado	Carguío
Causa 6 Daño operación	Nivel 1	-	-
	Nivel 2	1	2
	Nivel 3	3	4

Dónde los numerales 1, 2, 3 y 4 significan:

1. Reemplazo de Booster.
2. Desatascar manguera
3. Reemplazar detonador electrónico por pirotécnico.
4. Suspender tronadura.

4.2.2.9 Modo de falla: Exceso de explosivo

- Daño en operación.

Debido a que las mangueras no pueden retirar explosivo desde el pozo, no existe medida para solucionar esta falla, lo único que se puede hacer es extremar las medidas de seguridad debido a que este tipo de fallas pueden resultar en un efecto cañón en la explosión, lanzando piedras al aire que pueden llegar a un operario, además de que se generan más vibraciones de las esperadas, más ruido y más material en suspensión.

En la Tabla 10 se muestra un resumen completo de los modos de falla y sus medidas de mitigación de las fallas, esto servirá para realizar el estudio de criticidad

Tabla 10: Resumen de medidas correctivas para el proceso de detonación.

		Causa 1 Desconexión de cables			Causa 2 Daño aislación			Causa 3 Daño conductor			Causa 4 Interferencia			Causa 5 Daño fabrica			Causa 6 Daño operación		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Fuga de corriente	Registro				1	2	3	1	2	3									
	Test de func				4	5	6	1	4	6									
	Programación				4	5	6	1	4	6									
	Quema				5	6	7	1	4	7									
Sin respuesta	Registro	8	3							3									
	Test de func	8	3							3									
	Programación	8	3							3									
Error de datos	Registro						1			1									
	Test de func						6			6	9	9, 10	9, 10						
	Programación						6			6	9	9, 10	9, 10						
	Quema						6			6	10	7	7						
Problemas en dispositivos	Registro													3				3	
	Test de func													11	7		11	7	
	Programación													11	7		11	7	
Registro repetido	Registro	8	3																
Cables desconectados	Iniciación	8	3																
	quema	8	3																
Voltaje en dispositivos	Iniciación					8	12			12		9	10						
	quema					4	6			6		10	7						
Falla de operación	Primado																13	3	
	Carguío																14	7	
Exceso de explosivo	Carguío																		

Dónde:

1. Advertencia de fuga de corriente.
2. Invertir polaridad de detonador.
3. Reemplazo detonador electrónico a pirotécnico.
4. Búsqueda binaria de fuente de falla e invertir polaridad de ésta.
5. Búsqueda binaria de fuente de falla y división de la malla o asignación de un *Logger* único a fuente de falla.

6. Búsqueda binaria de fuente de falla y reemplazo del detonador electrónico por uno pirotécnico.
7. Suspensión de tronadura.
8. Reconexión.
9. Despeje de la fuente de interferencia.
10. Minimizar efectos de interferencia.
11. Reemplazo de dispositivos electrónicos.
12. Reemplazo cable de conexión.
13. Reemplazo Booster.
14. Desatascar manguera.

4.3 Análisis de efectos y severidad de las fallas.

Para esta etapa del proceso se debe analizar el efecto de la falla y su severidad en el proceso. Los efectos en el proceso de detonación se clasifican en: Insignificante, Leve, Medio, Alto y Extremo. La clasificación de la severidad o criticidad de las fallas se hace en relación al atraso que provoca en la faena o que tan peligroso para los operarios puede ser, a continuación se especifica el criterio de clasificación:

- **Insignificante:** Pequeña demora al momento de tronar
- **Leve:** Demora de 10 [min] al momento de tronar.
- **Medio:** Demora de 30 [min] al momento de tronar.
- **Alto:** Inseguridad media en faena.
- **Extremo:** Inseguridad alta en faena, o suspensión de tronadura

En el proceso de tronadura los efectos que los modos de falla provoquen en la tronadura, dependen de donde ocurre, debido a que ocurren, y qué medidas se pueden realizar para resolverlo, es por esto y que de acuerdo a la Tabla 10 Se definirá el efecto de cada modo de falla y sus causas.

- **Advertencia de fuga de corriente:** Como se mencionó anteriormente este mensaje en pantalla no provoca un gran atraso en la tronadura, por lo que se cataloga como un efecto insignificante para la tronadura, y no resulta en ningún problema en la seguridad de los operarios.

- **Invertir polaridad:** Como esto se da en el “Registro de Detonadores”, se tiene identificado el detonador al cual se le debe invertir la polaridad, lo cual toma poco tiempo y no influye en la seguridad de los operarios, por lo que se cataloga como un efecto insignificante.
- **Reemplazo detonador electrónico a pirotécnico:** De la misma forma que el efecto anterior, éste se da en la etapa de “Registro”, por lo que el detonador con falla está identificado, y debido a que el Booster posee un detonador electrónico y uno pirotécnico en él, el cambio es rápido, y no tiene efectos en la seguridad del personal, por esta razón el efecto es considerado como un efecto insignificante.
- **Búsqueda binaria e invertir polaridad:** En este caso la falla no se sabe en qué lugar está, por lo que se debe realizar una búsqueda binaria de las fuentes de la falla más importantes e invertir su polaridad, lo cual puede tomar mucho más tiempo, aún sin afectar la seguridad del personal, es por esto que se cataloga este efecto como un efecto medio.
- **Búsqueda binaria y división de malla o asignación de un *Logger* único a la falla:** Al igual que en el caso anterior no se sabe en qué lugar se encuentra la falla, pero la solución es más rápida y no compromete la seguridad de las personas, debido a que se divide la malla si cada mitad se puede tronar por separado, o si es necesario conectar un *Logger* exclusivo a un detonador, es porque sólo un detonador presenta falla, por estas razones el efecto se cataloga como leve.
- **Búsqueda binaria y reemplazo de detonadores electrónicos por pirotécnicos:** Corresponde al mismo caso anterior, la falla se encuentra en un solo detonador y es tan grande que no puede arreglarse conectando un *Logger* exclusivo al detonador, por lo que debe cambiarse el detonador electrónico por uno pirotécnico, lo cual no toma más tiempo que en el caso anterior, y tampoco afecta la seguridad de los operadores, por esto se cataloga como un efecto leve.
- **Suspensión de tronadura:** Como su nombre lo dice, la falla es tan grande que se debe suspender la tronadura, hasta que las condiciones sean favorables o hasta que se deban cambiar todos los detonadores electrónicos a pirotécnicos, esta consecuencia es catalogada como extrema, ya que las pérdidas para la compañía por un retraso de 1 o más días son millonarias; además de que representa un gran riesgo para las personas tener pozos cargados ya que las tronaduras cercanas podrían provocar explosiones no deseadas.
- **Reconexión:** Ya sea reconexión de detonadores o reconexión de cable arnés o cable de tronadura, se sabe exactamente donde está la falla, por lo que se cataloga como un efecto

insignificante, debido a que toma muy poco tiempo repararlo y no constituye ningún peligro para los operarios.

- **Despeje de la fuente de interferencia:** Este efecto es catalogado como leve, debido a que esta falla es provocada por una interferencia fácil de despejar y no afecta la seguridad de las personas en la faena.
- **Minimizar interferencia:** La interferencia es muy difícil de despejar, por lo que se debe minimizar, en muchos casos esto se provoca por las maquinarias eléctricas usadas en la mina. Esta operación puede tomar más tiempo ya que se deben orientar los conductores de tal forma que la interferencia sea mínima, a pesar de esto la seguridad de los operarios no se ve disminuida, es por esto que los efectos la falla es clasificada de nivel medio.
- **Reemplazo de dispositivos eléctricos:** A pesar de que el reemplazo de los dispositivos es simple, no es usual que se lleven repuestos de estos a la tronadura, por lo que ir a buscarlos a los polvorines puede tomar tiempo, por esto se cataloga como efecto de nivel medio.
- **Reemplazo cable:** Si el cable que une los detonadores con el *Logger* es el que debe ser cambiado, esta tarea puede tomar bastante tiempo, debido a que hay que reconectar todos los detonadores de la malla, por lo tanto la falla sería de nivel medio.
- **Reemplazo de Booster:** El efecto de esta medida correctiva no se relaciona con el tiempo que retrasa la tronadura, debido a que toma muy poco tiempo agregar un nuevo Booster en el pozo, pero esto puede resultar en que el Booster caído puede no explotar lo cual es sumamente peligroso, debido a que puede dañar a los operadores al momento de retirar el material fragmentado. Por estas razones el efecto es de nivel alto.
- **Desatascar manguera:** Consecuencias de nivel medio debido a lo complicado que puede ser realizar esta operación.
- **Exceso de explosivo y flotación de Booster:** Ambos tienen el mismo efecto, *flying rocks*, lo cual es sumamente peligroso si no se toman las medidas adecuadas, como alejar al personal o a los dispositivos electrónicos, esta falla tiene efectos catalogados como extremo. Si bien para el caso de exceso de explosivo o flotación del Booster no existen medidas correctivas, si tienen grandes consecuencias en la faena.

En la Tabla 11 se muestra un resumen de la criticidad de cada modo de falla en función del nivel de la causa que lo provoca y del momento en que se presenta. La criticidad se presenta en colores para hacer más fácil la comprensión, los colores están definidos a continuación.

- Insignificante: 
- Leve: 
- Medio: 
- Alto: 
- Extremo: 

Tabla 11: Resumen de grado de criticidad de modos de falla.

		Causa 1 Desconexión de cables			Causa 2 Daño aislación			Causa 3 Daño conductor			Causa 4 Interferenci a			Causa 5 Daño fabrica			Causa 6 Daño operación		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Fuga de corriente	Registro																		
	Test de func																		
	Programación																		
	Quema																		
Sin respuesta	Registro																		
	Test de func																		
	Programación																		
Error de datos	Registro																		
	Test de func																		
	Programación																		
	Quema																		
Problemas en dispositivos	Registro																		
	Test de func																		
	Programación																		
Registro repetido	Registro																		
Cables desconectados	Iniciación																		
	quema																		
Voltaje en dispositivos	Iniciación																		
	quema																		
Falla de operación	Primado																		
	Carguío																		
Exceso de explosivo	Carguío																		

4.4 Análisis de frecuencia de ocurrencia de falla.

Finalmente para el estudio FMECA se debe realizar un *ranking* de cada modo de falla con su probabilidad de ocurrencia en el proceso, debido a que este FMECA es cualitativo las probabilidades se clasifican en: muy frecuente, frecuente, ocasional, remoto e improbable.

La información se obtuvo por medio de una serie de encuestas realizadas a operadores de distintas faenas, en particular operadores de Collahuasi.

En la Tabla 12 se muestra un resumen de la frecuencia de ocurrencia de los modos de falla en función del nivel de la causa que los provoca y del momento en que aparece en el proceso. Para la comprensión de esta tabla se le asignó una letra A, B, C, D y E a cada frecuencia, como se muestra a continuación.

- A: Muy frecuente.
- B: Frecuente.
- C: Ocasional.
- D: Remoto.
- E: Improbable.

Tabla 12: Resumen de frecuencia de ocurrencia de falla.

		Causa 1 Desconexión de cables			Causa 2 Daño aislación			Causa 3 Daño conductor			Causa 4 Interferenci a			Causa 5 Daño fabrica			Causa 6 Daño operación		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Fuga de corriente	Registro				A	B	B	A	B	B									
	Test de func				A	B	B	A	B	B									
	Programación				D	C	C	D	C	C									
	Quema				D	C	C	D	C	C									
Sin respuesta	Registro	B	B							B									
	Test de func	B	B							B									
	Programación	A	A							A									
Error de datos	Registro						A			A									
	Test de func						A			A	A	A	B						
	Programación						B			B	B	B	C						
	Quema						B			B	B	B	C						
Problemas en dispositivos	Registro													D				C	
	Test de func													D	D			B	B
	Programación													D	D			B	B
Registro repetido	Registro	A	A																
Cables desconectados	Iniciación	B	B																
	quema	B	B																
Voltaje en dispositivos	Iniciación					B	B			B		B	B						
	quema					B	B			B		B	B						
Falla de operación	Primado																	D	D
	Carguío																	B	B
Exceso de explosivo	Carguío																	C	C

4.5 Análisis de resultados.

Para realizar el estudio FMECA se necesita analizar los resultados de la criticidad de cada modo de falla en conjunto con la frecuencia de ocurrencia de éstas. A continuación en la Tabla 13

se muestra un resumen conjunto de la frecuencia de ocurrencia de los modos de falla y la criticidad de estos.

Tabla 13: Resumen de grado de criticidad y frecuencia de ocurrencia de falla.

		Causa 1 Desconexión de cables			Causa 2 Daño aislación			Causa 3 Daño conductor			Causa 4 Interferen cia			Causa 5 Daño fabrica			Causa 6 Daño operación		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		Fuga de corriente	Registro				A	B	B	A	B	B							
Test de func					A	B	B	A	B	B									
Programación					D	C	C	D	C	C									
Quema					D	C	C	D	C	C									
Sin respuesta	Registro	B	B							B									
	Test de func	B	B							B									
	Programación	A	A							A									
Error de datos	Registro						A			A									
	Test de func						A			A	A	A	B						
	Programación						B			B	B	B	C						
	Quema						B			B	B	B	C						
Problemas en dispositivos	Registro													D				C	
	Test de func													D	D			B	B
	Programación													D	D			B	B
Registro repetido	Registro	A	A																
Cables desconectados	Iniciación	B	B																
	Quema	B	B																
Voltaje en dispositivos	Iniciación				B	B				B		B	B						
	Quema				B	B				B		B	B						
Falla de operación	Primado																D	D	
	Carguío																B	B	
Exceso de explosivo	Carguío																C	C	C

Para hacer más claro el análisis se dividieron las fallas por su causa, y se graficó cada una en función del nivel de la causa, de la criticidad y la frecuencia de ocurrencia de la falla. Cada punto

representa una falla ocurrida en un momento del proceso, el color de cada punto representa que nivel de la causa la provocó, el color verde representa una causa de Nivel 1, el color amarillo representa una causa de Nivel 2 y por último, el color rojo representa al Nivel 3, la abscisa X representa el grado de criticidad de la falla, y la ordenada Y representa la frecuencia de ocurrencia de la falla

En el Figura 13 se muestran las fallas causadas por una desconexión de cables, en función del nivel de la desconexión, de la frecuencia de ocurrencia de cada falla y de la criticidad de estas.

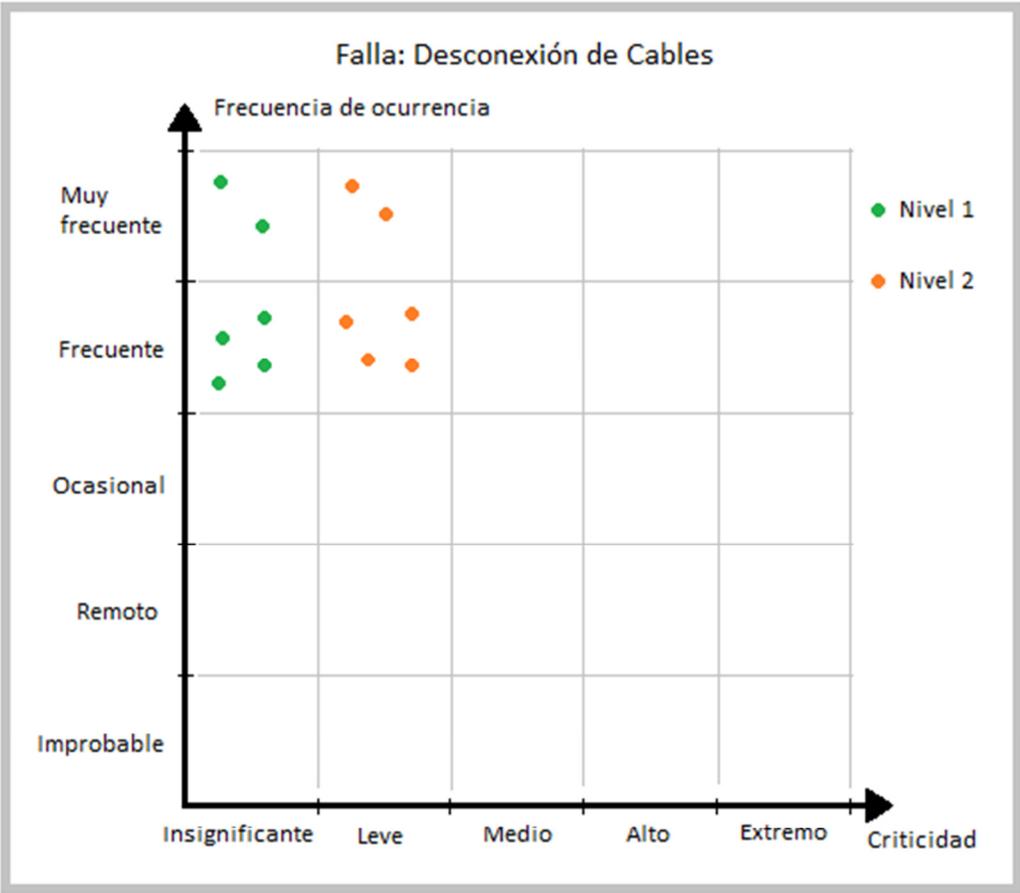


Figura 13: Gráfico frecuencia de ocurrencia v/s Criticidad, de fallas causadas por Desconexión de cables.

La desconexión de cables a pesar de provocar poca cantidad de fallas, éstas son muy frecuentes, pero insignificantes o leves.

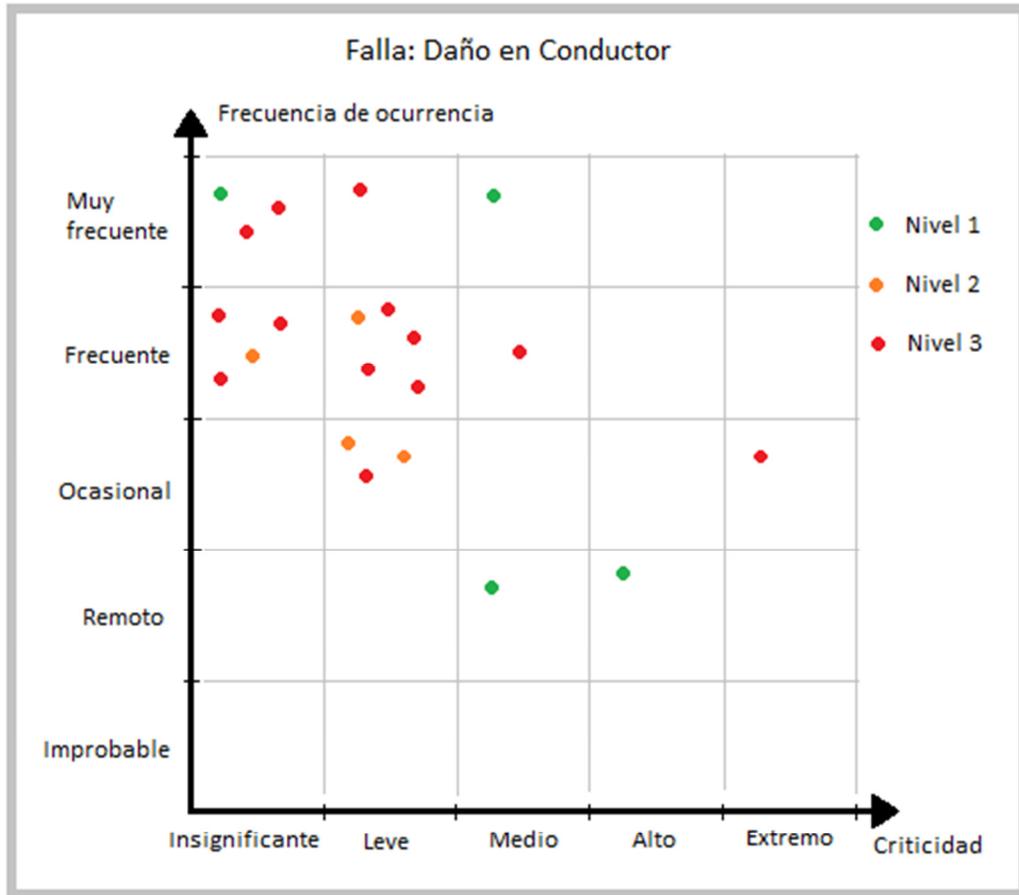


Figura 15: Gráfico frecuencia de ocurrencia v/s Criticidad, de fallas causadas por Daño en el conductor.

Al igual que el caso anterior el daño en el conductor provoca una gran cantidad de fallas, las cuales en su mayoría son frecuentes. Estos problemas se provocan en el momento de cargar y tapar el pozo.

En el Figura 16 se muestran todas las fallas causadas por interferencias en distintas partes del proceso, en función de la criticidad de la falla, la frecuencia de ocurrencia de esta y el nivel de interferencia que la causa.

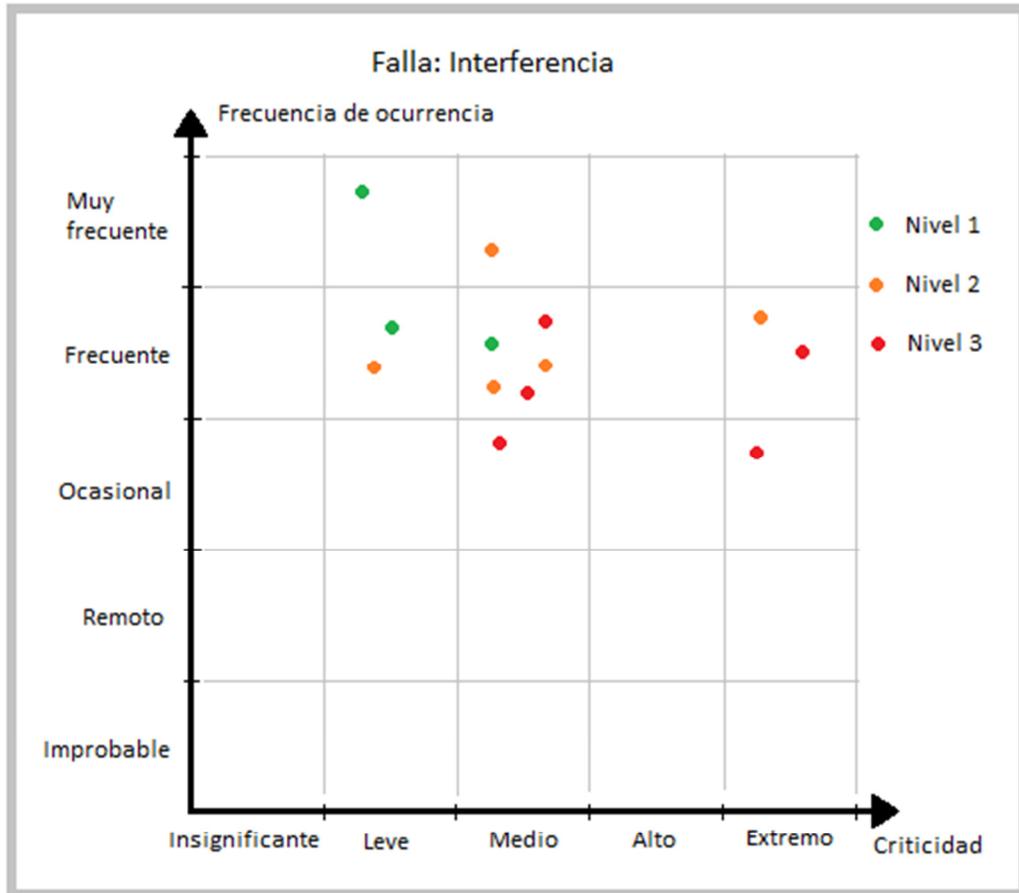


Figura 16: Gráfico frecuencia de ocurrencia v/s Criticidad, de fallas causadas por interferencia.

Si bien la interferencia causa menos cantidad de fallas, éstas son frecuentes y todas tienen efectos leves a extremos. Estas fallas no se desencadenan por una mala operación en la faena, pero claramente los efectos se pueden ver agravados por una mala manipulación de los equipos, por ejemplo un descuido en la planificación, no se toman las medidas adecuadas antes de comenzar el “Registro”. La interferencia también puede afectar más al circuito si en la etapa de “Carguío” y “Tapado de Pozos” se daña la aislación de los cables o el conductor mismo.

En el Figura 17 se aprecian los puntos que representan a las fallas causadas por daño de fábrica, los puntos se sitúan en función de la criticidad de la falla, la frecuencia de ocurrencia de ésta y el nivel de la causa que los provoca.

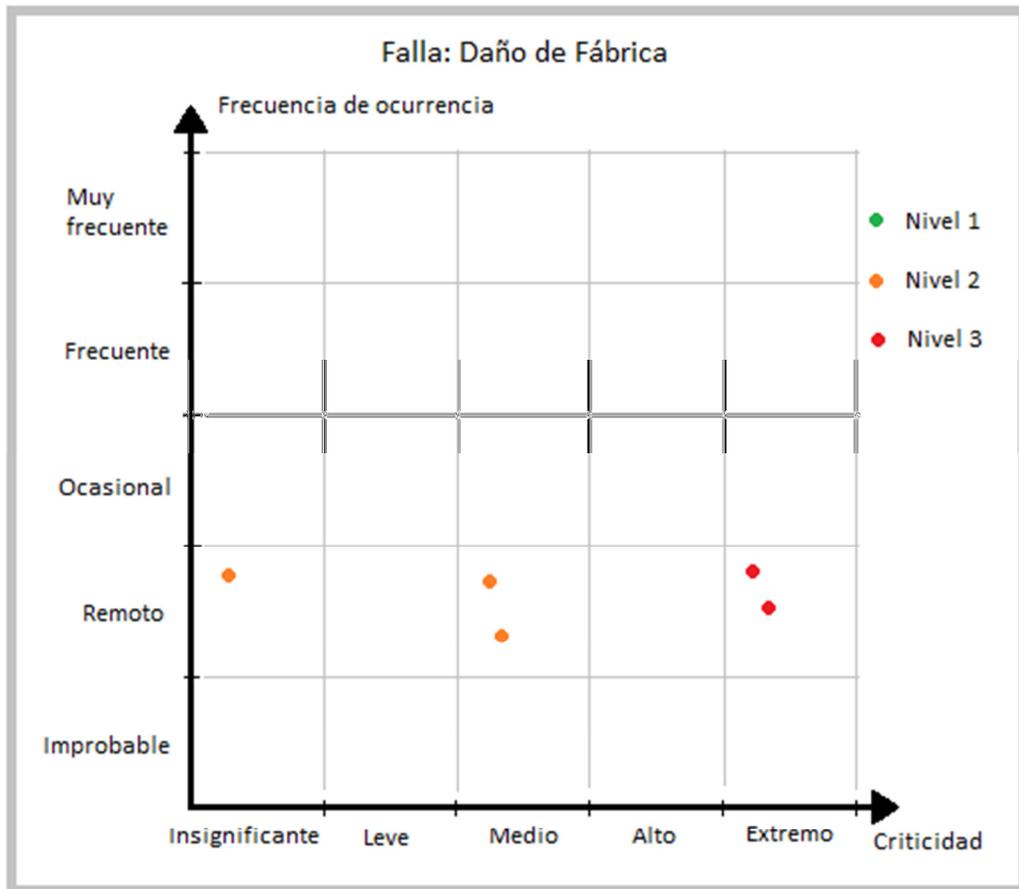


Figura 17: Gráfico frecuencia de ocurrencia v/s Criticidad, de fallas causadas por Daño de fábrica.

En este gráfico se nota que las fallas provocadas por un problema de fábrica son mínimas y poco frecuentes, si bien este tipo de fallas no son provocadas por los operadores, al igual que el caso anterior, los efectos se vuelven críticos si no se tiene una buena planificación, los dos casos críticos en este gráfico se deben a que no existen en la mina dispositivos electrónicos de repuesto.

Finalmente en el Figura 18 se muestran las fallas ocasionadas por un daño en la operación y se grafican en función de la frecuencia con la que aparecen en el proceso, la criticidad de cada una y el nivel del daño que sufren.

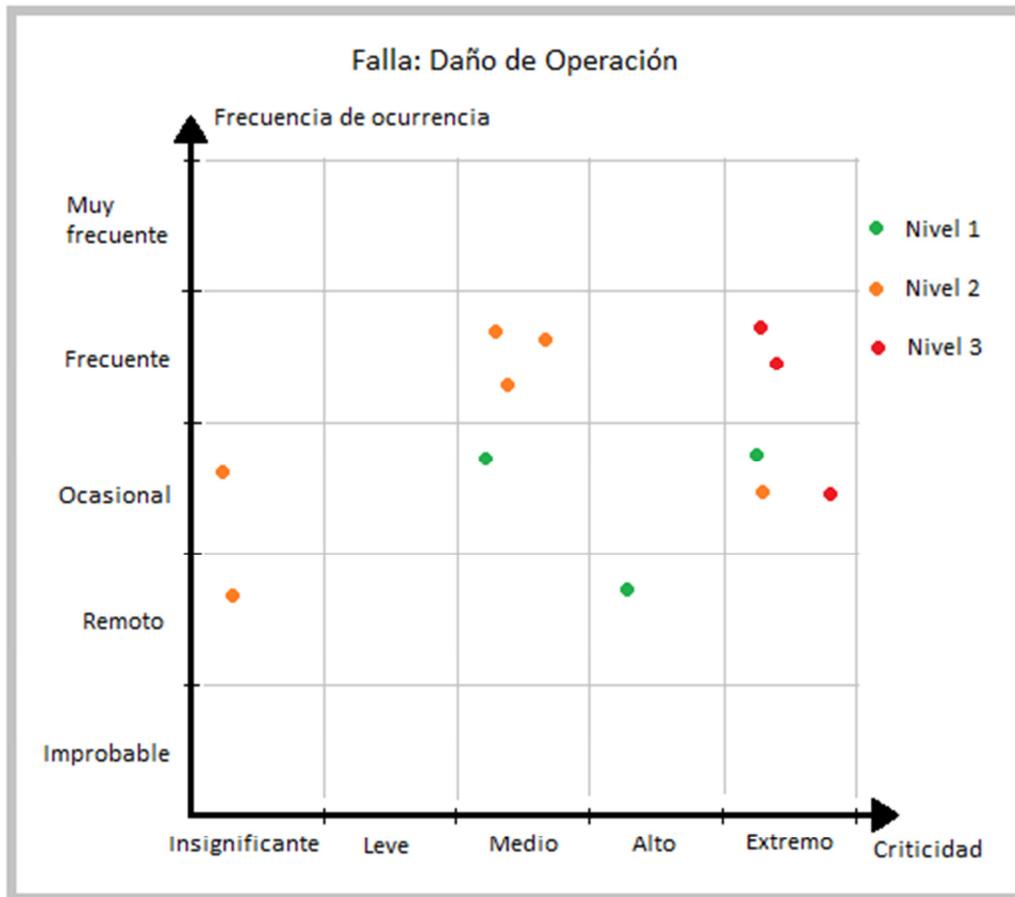


Figura 18: Gráfico frecuencia de ocurrencia v/s Criticidad, de fallas causadas por daño en operación.

El gráfico muestra una importante cantidad de fallas provocadas por un daño en la operación, las cuales son descuido de los mismos operadores en el proceso de detonación. Como se aprecia, la gran mayoría de éstas tiene un efecto medio a extremo y poseen una frecuencia de aparición alta.

Los 6 gráficos muestran todas las fallas que se pueden presentar en el sistema agrupadas por su causa, de todas éstas, las que provocan menos fallas y con menos frecuencia, son las causadas por un daño de fábrica. En primera instancia se podrían descartar estas fallas del estudio, pero su criticidad las hacen dignas de incluirlas, si se analiza cada falla que presenta un grado crítico, las cuales corresponden a problemas en dispositivos que se presentan en el “Prueba de Funcionamiento” y en la “Programación”, causados por un daño de fábrica del *Logger* o *Blaster*, respectivamente y de los cuales no hay elementos para reemplazarlos, por lo que se debe suspender

la tronadura. Se puede concluir que estas alcanzan ese nivel de criticidad por un descuido en la planificación de la mina, debido a que no se tienen equipos de respaldo en caso de problemas, y se debe suspender la tronadura hasta que se tenga acceso a *Logger* o *Blaster* en buenas condiciones.

Como se dijo, el Figura 17 no corresponde a una falla provocada por un problema en la operación, pero al igual que en el caso de la interferencia, los efectos se agravan por una mala operación. Durante todo el Trabajo de Memoria se estudió cada causa por separado y por simplicidad no se realizaron estudios de causas combinadas.

El Figura 14 y el Figura 15 representan a las causas que provocan más fallas en el sistema y ambas se desencadenan por un descuido del operador en la etapa de “Carguío” y “Tapado de Pozos”, las cuales, en su mayoría no son críticas pero si muy frecuentes.

El Figura 13 si bien muestra pocas fallas éstas son muy frecuentes, y se deben a un descuido de los operadores al momento de realizar las conexiones del sistema.

El Figura 16 se puede ver todas las fallas provocadas por interferencia de señales electromagnéticas. Esta interferencia logra una gran cantidad de fallas durante el proceso de detonación, y todas presentan un grado de criticidad sobre el medio.

Con todos estos datos se pueden detectar las fallas más frecuentes en el sistema y que las causa, para así poder dar directivas en el sistema para disminuirlas y lograr que el proceso sea cada vez más eficiente.

En los gráficos se puede notar que de las 6 causas de falla solo 2 de ellas no son provocadas por un mal manejo en la operación, estas son: daño de fábrica e interferencia. Si bien no se pueden dar indicaciones para que no se produzcan fallas por daño de fábrica, si se puede exigir que en la faena exista mínimo, un equipo de repuesto para ser utilizado en caso de emergencia.

Para el caso de la interferencia es difícil proponer una solución para evitar las fallas provocadas por ésta, debido a que muchos factores pueden estar en juego, en la guía de seguridad “*Safety Guide: RF Safety Distance for Electric and Electronic Detonators*” (12) da una guía de la distancia de seguridad para el uso de detonadores eléctricos al estar en un ambiente con un campo electromagnético, esta distancia depende de la potencia de la fuente emisora, y la frecuencia de la onda. Esta guía es sólo una referencia ya que muchos factores pueden afectar al circuito, por

ejemplo, un valor específico de radiación electromagnética, la guía puede sugerir una distancia de seguridad para prevenir problemas, en algunos casos se puede estar a una distancia menor de la especificada pero no tener ningún efecto en el circuito debido a que ningún conductor ni aislación se vio dañada en el proceso de “Carguío” y “Tapado de pozos”. Los factores que pueden favorecer problemas de interferencia son los daños al conductor y/o aislación, la conductividad del terreno, la humedad del ambiente y como se dijo anteriormente, la fuente de la onda electromagnética y la frecuencia de la onda emisora.

Debido a la complejidad del problema se sugiere implementar un medidor de campo eléctrico y un sistema de medición de la conductividad del terreno junto con un medidor de humedad y buscar una correlación entre estos valores y la aparición de las fallas provocadas por la interferencia. Mientras se sugiere que se implemente un medidor de campo electromagnético y así detectar la presencia de éste, frente a interferencia de Nivel 1 se despeja el área de las fuentes emisoras, para el caso de interferencias de Nivel 2 que provienen en su mayoría de cables de alimentación de alta tensión de las maquinarias presentes en la mina, se debe evitar a toda costa que estos cables estén paralelos a los cables de conexión y a los cables de tronadura.

El resto de las cuatro causas se deben a un mal manejo en la operación. El daño en el conductor y el daño en la aislación son las más críticas y provocan mayor cantidad de fallas y las más frecuentes. Éstas se provocan principalmente en la etapa de “Carguío” y “Tapado de Pozos”. Para mitigar o eliminar estos problemas se sugiere que al momento de insertar el material al pozo se utilice una especie de barrera, la cual puede ser un metal cóncavo que evite que las piedras puedan rasgar el aislante o dañar el conductor. Como se dijo antes estas causas también pueden provocar que las fallas causadas por interferencia se agraven, por esto, si se detecta un campo electromagnético alto en el ambiente, estas medidas de seguridad se deben extremar.

Otra falla provocada por un descuido de los operarios es la causada por desconexión de cables, aunque estas fallas son frecuentes, no son numerosas ni críticas por lo que sólo se puede sugerir que se tenga más cuidado en la conexión de cables.

Finalmente quedan las fallas de operación, donde se agrupa caída de Booster, atasco de mangueras y exceso de explosivo. La caída de Booster al igual que el atasco de mangueras provoca fallas remotas o frecuentes las cuales tienen un grado de criticidad entre insignificante y medio. La única medida que se puede sugerir es prestar más atención y extremar los protocolos de operación

para evitar caídas de *Booster* y atascos de manguera. En el caso de exceso de explosivo, el cual se produce ocasionalmente pero con consecuencias extremas, se sugiere realizar una revisión más exhaustiva del diseño de tronadura, para evitar posibles fallas que puedan resultar en peligro a los operadores.

CAPITULO 5: Conclusiones.

El trabajo desarrollado en esta Memoria de Título, consistió en un estudio FMECA del proceso de detonación minero. Para lograrlo se estudió detalladamente el proceso, siguiendo los protocolos de operación señalados por la compañía Orica Mining Services en su manual de operación. Se realizó una identificación de los modos de falla del sistema y se innovó en la forma de ver las fallas, que anteriormente solo se veían las posibles fallas y cómo despejarlas para continuar con la operación, en cambio, en este trabajo se estudió cada modo de falla identificando el momento en que se aprecia por los operadores y qué lo causa, dividiendo estas causas en tres niveles de severidad, para así identificar claramente cada modo de falla. Las causas identificadas son seis: desconexión de cables, daño en la aislación, daño en el conductor, interferencia, problemas de fábrica, y daño en la operación, cuatro de estas causas son provocadas por una mala operación en la faena, y las otras dos, si bien no son provocadas por los operarios, sus efectos se pueden ver agravados por estos.

Otro cambio al común análisis de falla de la compañía es que se asignaron las antiguas medidas para eliminar la falla como consecuencia de la falla o efectos de ésta, ya que lo que causa más problemas para las compañías mineras a las que se les presta servicio es el atraso en la extracción del mineral, lo que se traduce que una pérdida de dinero.

Luego de identificar las fallas, el momento de aparición, la causa y sus efectos, se realizó un *ranking* de cada modo de falla, su frecuencia de aparición y su criticidad. Debido a que la compañía no cuenta con un sistema registro de las fallas no se puede saber a ciencia cierta cuál es la frecuencia de aparición o la criticidad de éstas, por lo que se decide a realizar un FMECA cualitativo, donde cada grado de frecuencia y criticidad está dado por valores aproximados y discretos. Para recopilar la información necesaria para culminar el estudio FMECA se realizó una serie de encuestas a los operadores para determinar frecuencia y criticidad de fallas, estas encuestas fueron realizadas principalmente a operarios de las minas Collahuasi y Spence, los operarios fueron escogidos por técnico encargado de los procesos de detonación de dichas minas.

Finalmente, con los datos de las encuestas, se pudo relacionar a cada modo de falla con su frecuencia de aparición y su criticidad, luego se agrupó cada modo de falla por causa, y en función de la criticidad, la frecuencia y el nivel de la causa que la provoca, se pudo notar, mediante el uso

de gráficos, que las causadas por una desconexión de cables son frecuentes pero bastante poco críticas y fácilmente corregibles. Para evitar estas fallas, se sugiere instruir de mejor manera a los operarios para que realicen esta tarea con menos probabilidad de error.

Las fallas causadas por daño en la aislación y en el conductor son las más comunes, con mayor aparición durante todo el proceso y con criticidad variable dependiendo del momento en que ocurre y que nivel de causa la provoca. Para evitarlas se sugiere implementar un nuevo sistema de “Carguío” y “Tapado de Pozos”, el cual consiste en introducir una especie de armadura al conductor al momento de cargar y tapar los pozos, para que los conductores no se vean dañados por el roce del material.

Las fallas causadas por interferencia, son altamente probables de aparecer en el sistema, y su criticidad va de media a extrema. Para evitar estas fallas causadas por interferencia se requiere de un estudio más exhaustivo, como se mencionó, se deben medir las variables y encontrar la correlación entre ellas y la frecuencia de la falla y su criticidad, para poder encontrar buenas medidas de mitigación de estas. En el intertanto se sugiere contar con un medidor de campo eléctrico y cuando este muestre un valor dentro de los márgenes de la guía de seguridad de Orica se debe intentar despejar la fuente o hacer que los que provocan esta interferencia, estén lo más perpendicularmente posible de los cables de la malla de tronadura.

Las fallas causadas por un daño de fábrica se presentan en mucha menor cantidad y solo son críticas si los operarios no mantienen elementos de repuesto para suplir los dispositivos dañados. Para evitar los efectos críticos, se sugiere contar con uno o dos equipos de respaldo en cada faena minera.

Finalmente las fallas en la operación, las cuales representan a las fallas que se dan en la operación, pero no son detectadas por ningún medio electrónico. Estas fallas presentan una criticidad de alta a extrema y su probabilidad de ocurrencia va de ocasional a frecuente. Para evitar caídas de Booster se sugiere instruir a los operadores en la importancia del buen manejo de los equipos y las consecuencias que pueden traer a la compañía si estos son descuidados, lo mismo se sugiere para el caso de un atasco de manguera y exceso de explosivo.

Con todo este análisis fue posible detectar que la mayoría de las fallas en el sistema son causada por los operadores, por la falta de medidas para evitar problemas, por falta de capacitación a los operadores, por esto según cada modo de falla se proponen directivas a seguir en la compañía, para así lograr una mejoría en el proceso, y hacerlo más eficiente.

Con estos resultados se espera dar directrices a la compañía para mejorar su productividad y disminuir la cantidad de eventos en el proceso de detonación.

5.1.1 Trabajo futuro.

En este trabajo se propone una serie de posibles trabajos futuros para validar o complementar el estudio realizado. Para validar el estudio y las sugerencias realizadas se propone:

- Realizar un estudio de factibilidad de utilizar armaduras protectoras para evitar fallas causadas por daño en el conductor y daño en la aislación.
- Realizar un estudio de factibilidad de utilizar un medidor de campo eléctrico.
- Incorporar las sugerencias hechas en este Trabajo de Memoria a los medios de capacitación de la compañía

Para complementar el estudio y mejorar la prevención de la ocurrencia de fallas se propone:

- Realizar un estudio que correlacione el campo eléctrico en la malla de detonación, con la humedad del terreno, su conductividad, y la aparición de fallas por interferencia.
- Realizar la implementación de un registro de fallas, obteniendo datos de momento de aparición de falla, causa, medidas utilizadas para continuar con el proceso y efectos de la falla.

CAPITULO 6: **Glosario.**

- **Bancos superiores:** Módulo o escalón superior comprendido entre dos niveles del yacimiento.
- **Blaster:** Dispositivo electrónico encargado del proceso final de tronadura.
- **Booster:** Cartucho de plástico el cual contiene una carga primaria de explosivo, un detonador pirotécnico, y un detonador electrónico.
- **Cable arnés:** Cable de conexión entre Logger y los detonadores.
- **Carguío:** Proceso minero encargado de ingresar el explosivo en el pozo.
- **Cátodos de cobre:** Uno de los productos de la minería chilena.
- **Chancadores:** Maquinarias mineras que permiten disminuir el tamaño de las rocas obtenidas en el proceso de tronadura.
- **Concentrado de cobre:** Producto de la minería chilena.
- **Correas transportadoras:** Sistema de transporte del mineral.
- **Detonadores pirotécnicos:** Dispositivos que basan su detonación en procesos químicos.
- **Línea de detonación:** Sinónimo de Malla de Detonación.
- **Logger:** Dispositivo electrónico encargado de registrar los detonadores electrónicos.
- **Malla de detonación:** Lugar donde se realiza la detonación con los detonadores insertos en los pozos y conectados al Logger.
- **Molienda:** Proceso minero que permite disminuir el tamaño del material que sale de los chancadores.
- **Polvorín:** Bodegas para almacenar detonadores.
- **Polvorinero:** Persona encargada de la administración del polvorín.
- **Pozo:** Agujeros situados en la malla de detonación para introducir el Booster y realizar la detonación.
- **Primado:** Proceso minero donde se introduce el Booster al pozo.

- **Punto de quema:** Sinónimo de Malla de Detonación.
- **Quema:** Proceso minero donde se realiza la iniciación de la tronadura.
- **Tapado de pozos:** Proceso minero encargado de cubrir el pozo luego del “Carguío” con explosivos.

CAPITULO 7: Bibliografía

1. **Ministerio de minería.** Historia de la minería en Chile. [En línea] 2010. <http://www.minmineria.gob.cl/la-mineria-en-chile/historia-de-la-mineria-en-chile/>.
2. **Minería Chilena.** El impacto de los detonadores electrónicos en el proceso minero. [En línea] 2004. <http://www.editec.cl/mchilena/mayo2004/Articulo/relevancia.htm>.
3. *Plan de Acción, Reunion 21 de Marzo.* **Orica Mining Services.** Collahuasi site : s.n., 2012.
4. **Orica Mining Services.** *Orica Explosivos, Seguridad de los detonadores Electronicos.*
5. **Orica Mining Services.** *I-Kon Logger Manual Version 3.10.* 2006.
6. —. *I-Kon Blaster 2400 S Version 3.10.* 2006.
7. *The new SAE FMECA Standar.* **Bowles, John B.** Columbia : s.n., 1998. PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium.
8. *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA).* **Center, DoD Information Analysis.** 1993, Reliability Analysis Center.
9. **FMEA-FMECA.** *How to do a FMEA Analysis.* [En línea] 2012. <http://www.fmea-fmece.com/how-is-fmea-done.html>.
10. **Orica Mining Services.** *La Mejor Practica.* 2010.
11. —. *Control de Pérdidas, Procedimiento Detonadores Electronicos.* 2011.
12. **Orica Group of Companies.** *Safety Guide: RF Safety Distance for Electric and Electronic Detonators.* Orica Chile S.A. 2008.
13. *Failure Mode Effects and Criticality Analysis for System/Safety Assessment.* **K., Greene.** 1970, págs. 206-208.
14. *FMECA, The Right Way.* **Barry T. Mckinney.** 1991, PROCEEDINGS Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium.
15. *Application of Fuzzy FMECA in Gas Network Safety Assessment.* **YOU Qiuju, ZHU Wei, XING Tao, CHEN Zhifen.** 2010. Second WRI World Congress on Software Engineering.

16. *Safety Managment for Electromechanical System of Railway Vehicles.* **Zdenek Vintr, Michal Vintr.** 2008.

CAPITULO 8: **Anexo.**

ENCUESTA:
APARICION DE FALLAS EN SISTEMA I-KON.

1. *Introducción.*

La Siguiete encuesta se realiza en el contexto de un estudio de modos de fallas del sistema de detonación electrónico I-Kon, realizado para el área de “Electric Blasting Desing” de OricaChile S.A.

El objetivo principal de esta encuesta es obtener datos sobre la frecuencia de aparición de las fallas más importantes del sistema de detonación I-Kon.

2. *Información de contacto.*

Memorista: Paola Lepileo.

Correo electrónico: paola.lepileo@gmail.com

Teléfono de contacto: 75784113

Persona a cargo: Fredy Rucal.

Correo electrónico: fredy.rucal@orica.com

3. *Información de encuestado.*

Nombre:

Área a la que pertenece:

Correo electrónico:

Teléfono de contacto:

4. Encuesta

A continuación se presentan una lista de fallas que pueden aparecer en Logger, Blaster, o en terreno, se le pide clasificar cada una por la frecuencia de aparición que tienen estas en las operaciones de la mina, la clasificación se presenta a continuación.

- *Muy frecuente: De 10 tronaduras, la falla se presenta en 8 o más ocasiones.*
 - *Frecuente: De 10 tronaduras, la falla se presenta en 6 o 7 ocasiones.*
 - *Ocasional: De 10 tronaduras, la falla se presenta en la mitad de ellas*
 - *Remoto: De 10 tronaduras, la falla se presenta en 3 o 4 ocasiones.*
 - *Improbable: De 10 tronaduras, la falla se presenta en 2 o menos ocasiones.*
-

Fallas apreciadas en Logger:

- *Advertencia de Fuga de Corriente:*
 - *Fuga muy alta:*
 - *Sin Respuesta:*
 - *Error de Lectura:*
 - *Registro Repetido:*
 - *Detonador Defectuoso:*
-

Fallas apreciadas en Blaster:

- *Logger no Conectado*
- *Error de Datos*

- *Batería Baja:*
- *Voltaje en Logger:*
- *Bajo voltaje en Capacitor:*
- *Corriente muy Alta:*

Fallas apreciadas en terreno.

-
- *Caída de Booster*
 - *Atasque de Manguera*
 - *Exceso de Explosivo*
 - *Flotación de Booster*

A continuación se presentan una lista de fallas que pueden aparecer en Logger, Blaster, o en terreno, se le pide clasificar cada una por la el efecto de estas en las operaciones de la mina, la clasificación se presenta a continuación.

-
- *Insignificante: Pequeña demora al momento de tronar.*
 - *Leve: Demora de aproximadamente 10 minutos al momento de tronar.*
 - *Medio: Demora de aproximadamente 30 minutos al momento de tronar.*
 - *Alto: Inseguridad media en la faena.*
 - *Extremo: Inseguridad alta en la faena, o suspensión de tronadura.*

Fallas apreciadas en Logger:

- *Advertencia de Fuga de Corriente:*
 - *Fuga muy alta:*
 - *Sin Respuesta:*
 - *Error de Lectura:*
 - *Registro Repetido:*
 - *Detonador Defectuoso:*
-

Fallas apreciadas en Blaster:

- *Logger no Conectado*
 - *Error de Datos*
 - *Batería Baja:*
 - *Voltaje en Logger:*
 - *Bajo voltaje en Capacitor:*
 - *Corriente muy Alta:*
-

Fallas apreciadas en terreno.

- *Caída de Booster*
- *Atasque de Manguera*
- *Exceso de Explosivo*
- *Flotación de Booster*

CLIENTE			
FAENA		CHA FE	24 de abril de 2012
RESPONSABLES	Luis Juárez		
	Claudio Araya		
	Fredy Rucal		
FECHA ENTREGA	DE	Marzo 2012	