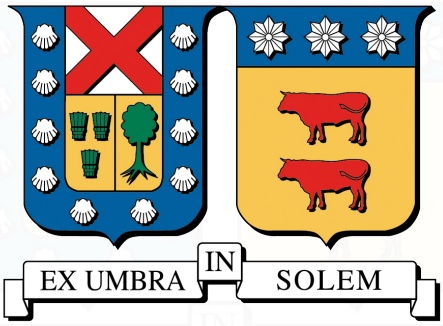
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



DIAGNÓSTICO Y MEJORA DEL DESARROLLO HORIZONTAL EN LA MINA SUBTERRÁNEA CANDELARIA NORTE

FRANCISCO FABIÁN MONTES MALDONADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA : SRA. SOLEDAD MAASS VENEGAS

MARZO 2019

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber…

[Albert Einstein (1879-1955)]

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos al término de este trabajo son muchos. Dando por finalizada una etapa de mi carrera profesional, quiero expresar mis afectos principalmente a mis padres por el apoyo incondicional, por ser parte en mi formación como persona y profesional. Con dedicación especial a mi madre, por su cariño, paciencia y por instruirme con los valores de un buen profesional. A mi padre, por el apoyo constante y a mi hermano menor, Diego, quien siempre estaba disponible para brindar una palabra de apoyo.

A mi polola, por la constante paciencia y apoyo ante los complejos turnos mineros. También por el amor incondicional para poder llevar a cabo los variados desafíos durante el desarrollo de la carrera.

A mis amigos del colegio y del trabajo, por brindar tantas alegrías en cosas tan sencillas como jugar fútbol, salir a carretear, la buena compañía o por distraernos de todas las presiones y el estrés de la universidad. Desde hace ya varios años hemos tomado cada uno caminos profesionales distintos, pero no ha sido excusa para distanciarnos y siempre ser un apoyo en momentos difíciles.

A mis amigos de la Universidad, por el apoyo mutuo, el trabajo en equipo, las buenas experiencias compartidas y la excelente compañía. Logramos como equipo avanzar conjuntamente en nuestra carrera y terminar con éxito gran parte este proceso.

También, a mi profesora guía, Soledad Maass, por sus orientaciones y consejos en el desarrollo de mi memoria, dirigiendo las líneas de investigación, aportando ideas, reflexiones y centrándome en los objetivos óptimos para el caso en estudio.

A la empresa Züblin Minera Candelaria Norte, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi memoria. Al grupo de trabajo del Departamento de Planificación e Ingeniería, por la buena disposición y paciencia ante todos los requerimientos solicitados. En especial a mi tutor, don Roberto Martínez, quien fue de gran ayuda profesional, brindándome los conocimientos y los consejos necesarios para poder desarrollar la memoria de manera exitosa. Y al equipo de trabajo al interior de la mina, don Esteban Tobar, por la paciencia, la buena disposición y ayuda constante para el desarrollo de la memoria, al igual que a don Raúl Miranda y a todos los mineros en general del grupo 3.

Finalmente termino por agradecer a la Universidad Técnica Federico Santa María y a los profesores que fueron parte de mi formación. Mención especial a mi Jefe de Carrera, Víctor Encina, por la gran disponibilidad, la cooperación y ayuda constante ante consultas. Al igual que al profesor Jorge Ipinza, quien siempre tenía la disposición de colaborar ante cualquier tipo de duda. Por último, agradecer a la universidad por entregarme los conocimientos y herramientas necesarias para desenvolverme en el ámbito académico y laboral.

RESUMEN EJECUTIVO

La mina subterránea Candelaria Norte, se encuentra realizando mejoras continuas en las operaciones mineras: el objetivo principal de este estudio es aumentar la productividad y ser eficientes en la ejecución de los trabajos. Para ello, una de sus empresas contratistas, Züblin, se propuso cumplir con dicho objetivo en los trabajos de desarrollo horizontal.

La siguiente investigación presenta un diagnóstico del desarrollo horizontal (ciclo de minado) de la mina subterránea Candelaria Norte, las actividades realizadas durante un turno de trabajo con sus respectivos tiempos y el análisis de la metodología de trabajo implementada en dicha faena. Registrando información técnica y operacional en el desarrollo del trabajo.

El objetivo principal de la investigación es diagnosticar, evaluar y proponer mejoras que puedan aumentar la productividad de la operación de desarrollo horizontal. Para cumplir con dichos objetivos, se determina cual es la metodología de trabajo utilizada, identificando la secuencia establecida para la asignación de operaciones unitarias y se plantea una nueva metodología de asignación de recursos, mediante una simulación en MATLAB. Dentro del desarrollo se registraron las restricciones para la simulación y las actividades consideradas como interferencias, durante la realización normal de un turno.

Como resultado, se obtiene un modelo determinístico para mejorar la asignación de recursos, con respecto a una nueva metodología de trabajo, definiendo dos escenarios a simular: El primero se basa en trabajar con la metodología de multi-frentes y estableciendo una disponibilidad de 2 frentes de trabajo por cuadrilla, con lo que se logra obtener un aumento del 33,3 % de avance en metros lineales con respecto a la metodología actual. Por otra parte, para la segunda propuesta se tiene una disponibilidad de 3 frentes de trabajo por cuadrilla y se obtiene como resultado un aumento del 51,3 % de avance en metros lineales con respecto a la metodología utilizada en la actualidad, eliminando los cuellos de botella. En ambos escenarios se mantiene la cantidad de recursos utilizados para los trabajos.

La implementación de la metodología propuesta entrega beneficios a corto plazo y se obtienen rendimientos auspiciosos, cumpliendo con el objetivo de aumentar la efectividad de las operaciones y de incrementar el tiempo efectivo de trabajo, evitando las esperas en postura para la habilitación de labores por cada operación.

Palabras claves: Desarrollo horizontal - Diagnóstico - Simulación - Asignación

ABSTRACT

The underground mine Candelaria Norte is making continuous improvements in mining operations: being its main objective to increase productivity and be efficient in the execution of work. Thus, Züblin (one of Candelaria's contractors) established the goal of meeting Candelaria's objetives in the horizontal development work.

The following work presents a diagnosis of the horizontal development (mine cycle) of Candelaria Norte underground mine, the activities carried out during a work shift with their respective times, and the analysis of the work methodology implemented in such work, registering technical and operational information in work developments.

The main objective of the research is to diagnose, evaluate and propose improvements that can increase the productivity of the horizontal development operation. In order to meet these objectives, a work methodology is established, identifying the sequence established for the assignment of unit operations and proposing a new allocation methodology through a MATLAB simulation. Within the development, the restrictions for the simulation and the activities considered as interference during the normal development of a shift were registered.

As a result, there is a deterministic model to improve the allocation of unit operations with respect to a new work methodology, establishing two scenarios to be simulated: The first proposal establishes to work with the multi-front methodology with an availability of 2 work fronts per crew, obtaining an advance increase of 33.3 % in linear meters with respect to the current methodology. On the other hand, for the second proposal there is an availability of 3 work fronts per crew, resulting in an increase of 51.3 % with respect to the methodology currently used, eliminating the bottlenecks, but with the restriction of maintaining the amount of resources in equipment used for the works.

The implementation of the proposed methodology provides short-term benefits where auspicious returns are obtained, fulfilling the objective of increasing the effectiveness of the operations and increasing the effective work time avoiding the time wasted when waiting for the next available work for each operation.

Keywords: Horizontal development - Diagnosis - Simulation - Assignment

Índice de Contenidos

1. Introducción **11**
1.1. Descripción del tema . . . 11
1.2. Motivación . . . 11
1.3. Objetivos . . . 12
1.3.1. Objetivo General . . . 12
1.3.2. Objetivos Específicos . . . 12
1.4. Alcances . . . 12

2. Antecedentes Generales **14**
2.1. Antecedentes de la Empresa . . . 14
2.1.1. Constitución de la Sociedad . . . 14
2.2. Método de Explotación Mina Candelaria Norte . . . 17
2.3. Condiciones Geológicas Mina Candelaria . . . 19
2.3.1. Geología Distrital . . . 20
2.4. Desarrollo Horizontal . . . 22
2.4.1. Operación de Acuñadura . . . 23
2.4.2. Operación de Fortificación . . . 25
2.4.2.1. Clasificación de la Fortificación . . . 26
2.4.3. Operación de Perforación . . . 38
2.4.3.1. Perforación de Avance de Galerías y Túneles . . . 39
2.4.4. Operación de Carguío de Explosivos . . . 41
2.4.5. Operación de Limpieza de Frente . . . 45
2.4.6. Operaciones de Carguío y Transporte . . . 45
2.5. Sistema de Trabajo en Candelaria Norte . . . 46
2.5.1. Metodología del ciclo de P&T . . . 46
2.6. Índices Operacionales . . . 47
2.7. Compilación Bibliográfica . . . 50

3. Metodología **55**
3.1. Etapa de Registro y Recopilación de Información . . . 55
3.2. Etapa de Desarrollo y Diagnóstico . . . 56
3.3. Etapa de Simulación . . . 56

4. Desarrollo de la Metodología **57**
4.1. Etapa de Registro y Recopilación de Información en CN 57
4.2. Etapa de Desarrollo y Diagnóstico en Candelaria Norte 61
4.3. Etapa de Simulación en CN 70
4.3.1. Escenario por simular 70
4.3.2. Parámetros iniciales 72
4.3.3. Restricciones 75
4.3.4. Diagrama del proceso 77
4.3.5. Simulación del proceso 79

5. Conclusión y Recomendaciones **83**

Bibliografía **86**

A. Anexos **88**

Índice de Tablas

2.1. Métodos principales para la clasificación del macizo rocoso. 27
2.2. Longitud mínima y espaciamiento máximo para el refuerzo de roca. 29
2.3. Características de los pernos Split Set utilizados en la mina Candelaria Norte. 31
2.4. Datos técnicos de los componentes A y B que conforman la resina. 34
2.5. Características de los pernos helicoidales utilizados en la mina Candelaria Norte. 35
2.6. Supuestos de criterio de daño según el modelo de Holmberg & Persson. 44
2.7. Metodología de trabajo actual de la mina CN, con 2 frentes simultáneas y los trabajos realizados durante el turno A y el turno B. 47

4.1. Mediciones en minutos para la ejecución según el tipo de actividad, registrados en terreno. . 59
4.2. Mediciones en minutos para la ejecución según el tipo de actividad, registrados en terreno. . 60
4.3. Valores estadísticos y prueba de normalidad realizadas a las actividades, desde la N°1 hasta la N°9. 62
4.4. Valores estadísticos y prueba de normalidad realizadas a las actividades, desde la N°10 hasta la N°18. 62
4.5. Valores estadísticos y prueba de normalidad realizadas a las actividades, desde la N°19 hasta la N°20. 63
4.6. Distribución de tiempos en actividades de desarrollo horizontal, mina CN. 64
4.7. Reagrupación de las actividades ejecutadas en el desarrollo horizontal. 65
4.8. Observaciones detectadas en terreno, mientras se realizaba el registro de información. 67
4.9. Variables definidas previamente al inicio del código de programación. 74
4.10. Resultados de las primeras 20 simulaciones con dos frentes disponibles. 79
4.11. Comparación entre la metodología actual y la propuesta N°1 para 30 días de trabajo. 80
4.12. Resultados de las primeras 20 simulaciones con tres frentes disponibles. 81
4.13. Comparación entre la metodología actual y la propuesta N°2 para 30 días de trabajo. 82

A.1. Sigla de las clases de hora que se utilizan y su respectiva descripción de tiempo. 99
A.2. Sigla de las clases de hora con su respectivo porcentaje de horas de uso. 100
A.3. Clasificación de las actividades consideradas como interferencia. 100
A.4. Cumplimiento del programa operativo mensual para los meses de junio y julio. 102
A.5. Detalle de la distribución de horas establecidas en los reportes entregados por los operadores, con respecto a las actividades realizadas y las clases de horas. 103

Índice de Figuras

2.1. Ubicación geográfica de la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC). 15
2.2. Rutas de acceso para la CCMC. 16
2.3. Disposición espacial de la mina subterránea Candelaria Norte, con respecto a la mina a rajo abierto. 17
2.4. Método convencional de Sublevel Stoping y con su variante LBH, según el orden respectivo de las imágenes. 18
2.5. Diseño de los diagramas de perforación para el caserón Amanda 5, utilizado en la mina Candelaria Norte. 19
2.6. Marco geológico de la mina Candelaria. 20
2.7. Distrito del depósito tipo IOCG de Candelaria, con su respectiva geología y con los planos de la mina subterránea CN. 21
2.8. Perfil de la geología del distrito Punta del Cobre, con la ubicación de la mina Candelaria y CN. 21
2.9. Ciclo de avance en túnel con el método convencional de perforación y tronadura. 22
2.10. Diagrama de flujo de la operación de desarrollo (disparo de avance), utilizado en la mina CN. 23
2.11. Esquema del acuñador manual, con sus respectivas partes de uso. 24
2.12. Flujograma de la operación de acuñadura de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin. 25
2.13. Funcionalidad de los pernos Split Set. 31
2.14. Forma de instalación de los pernos de anclaje. 32
2.15. Equipo neumático de alta presión con doble pistón para la inyección de resina líquida. 34
2.16. Modalidades de fortificación con malla, implementada en la mina CN. 36
2.17. Operación de fortificación, realizando una instalación de malla con una grúa modelo JCB. . 36
2.18. Fortificación con Shotcrete complementario al uso de mallas. 37
2.19. Flujograma de la operación de fortificación de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin. 38
2.20. Perforación de frente con jumbo Boomer 282 y procedimiento de cambio de bit, en el orden mencionado. 40
2.21. Flujograma de la operación de perforación de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin. 41
2.22. Diagrama de disparo utilizado en al interior de la mina CN. 42

2.23. Flujograma de la operación de carguío de explosivos de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin. 44
2.24. Parámetros de los usos de tiempos. 49

4.1. Diagrama de flujo de la operación de desarrollo (disparo de avance), utilizado en terreno por la mina CN. 58
4.2. Distribución de tiempos, con respecto a las actividades en el desarrollo horizontal. 66
4.3. Esquema de asignación de recursos por cuadrilla de trabajo, para el desarrollo horizontal. . . 68
4.4. Esquema de trabajo para la simulación, con las frentes disponibles y sus recursos. 71
4.5. Diagrama de flujo básico de las sentencias de control, utilizadas para la simulación. 78

A.1. Geología del distrito Punta del Cobre, correspondiente a la mina Candelaria. 88
A.2. Metodología de trabajo con dos frentes simultáneas, realizada durante el turno A. 89
A.3. Metodología de trabajo con dos frentes simultáneas, realizada por el turno B. 89
A.4. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°1, 2 y 3. 92
A.5. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°4, 5 y 6. 93
A.6. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°7, 8 y 9. 94
A.7. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°10, 11 y 12. 95
A.8. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°13, 14 y 15. 96
A.9. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°16, 17 y 18. 97
A.10. Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°19 y 20. 98
A.11. Diagrama de Pareto de las HMTNP de los equipos jumbos del mes de junio y julio. 101
A.12. Resultados de la simulación para las dos propuestas de 2 y 3 frentes disponibles. 104

1 | Introducción

1.1. Descripción del tema

Dentro de las variadas labores en la minería subterránea, la preparación de túneles mineros corresponde a una actividad crítica para el inicio, continuidad y entramado de un proyecto minero. Por lo tanto, es fundamental que las distintas operaciones unitarias se ejecuten de manera sistematizada, optimizando los tiempos requeridos de trabajo. Y así, permitir la continuidad de las labores de producción, en cumplimiento con los programas operativos establecidos como objetivos.

El desarrollo de labores horizontales considera distintas operaciones unitarias, involucradas en un ciclo de minado, lo que implica un aumento en la posibilidad de falla en alguna de ellas, por ende, un quiebre considerable en el tiempo total de trabajo. Por lo tanto, optimizar cada proceso realizando una producción sincronizada, eliminar los cuellos de botella y planificar y programar los trabajos en coordinación con los demás procesos, nos permitirá tener una ventaja operacional, aumentando el tiempo efectivo de trabajo y ser contingentes en las situaciones adversas presentes durante la operación.

Esta investigación se enfoca en el diagnóstico y mejora del ciclo de desarrollo horizontal en la mina subterránea Candelaria Norte, ubicada en la Región de Atacama. Se analizará un nuevo método de distribución de actividades -no utilizado en la mina subterránea Candelaria Norte- en entornos complejos, en donde las condiciones de las operaciones son cambiantes y pocos definidas, con la finalidad de conocer las variables involucradas en el ciclo de desarrollo y aquellas interferencias propias de la mina.

Una vez definidas las variables, restricciones y condicionantes propias de la mina, se puede modelar una metodología de asignación de operaciones unitarias, obteniendo una forma de trabajo más productiva y eficiente que la utilizada actualmente, con la misma cantidad de recursos humanos y en equipos.

1.2. Motivación

El siguiente estudio nace de la dificultad que enfrenta el departamento de operaciones, cada término de mes, para cumplir con el programa de metros de avance mensuales, exigidos por la empresa mandante Lundin Mining. Producto de problemas operacionales, no siempre se llega a la cantidad de metros planificados, lo cual conlleva retrasos en la ejecución e inicios de los proyectos.

Considerando que la visión de la empresa contratista Züblin International GmbH Chile SpA, del grupo STRABAG, es realizar mejoras continuas en la ejecución de los trabajos, esta investigación tiene como propósito aumentar la cantidad de metros de avances mensuales dentro de las labores de desarrollo horizontal, y mejorar la metodología de trabajo, para suplir las distintas dificultades técnicas, operacionales y organizacionales que se presentan al interior de mina subterránea Candelaria Norte.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- El objetivo general de la presente investigación es plantear una estrategia de mejora, para el ciclo de desarrollo horizontal de la mina subterránea Candelaria Norte, que permita aumentar el rendimiento de metros de avance por mes.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Aumentar las horas efectivas de trabajo para las distintas operaciones unitarias involucradas en el ciclo de desarrollo horizontal.
- Mitigar el efecto de las interferencias involucradas en el desarrollo horizontal y que afectan la continuidad de las labores.

1.4. Alcances

- Se prescinde de los valores de tiempo para la operación de ventilación, carguío y extracción de marina, debido a las normas y restricciones de seguridad establecidas por la empresa mandante Lundin Mining. Además, cabe mencionar que no es determinante para el análisis y la metodología establecida en la investigación[1].
- El valor de los tiempos mostrados en el desarrollo de esta investigación no considera pérdidas operacionales, producto de fallas en los equipos y condiciones del macizo rocoso adversas, que pueden impedir la continuidad de los trabajos. Por lo tanto, los tiempos registrados consideran una operación ideal, sin contratiempos.
- El valor de tiempo obtenido en la operación de fortificación dependerá del tipo de recomendación geomecánica requerida y los valores pueden variar considerablemente, con respecto al tipo de fortificación. Por lo tanto, para el desarrollo de este trabajo se consideró una fortificación base, con dos corridas de

[1] Los cambios en la metodología y desarrollo de análisis se ajustan a las distintas políticas de seguridad y restricciones impuestas por la empresa mandante.

pernos Split Set de 2,4 [m] desde la línea gradiente hasta la línea gradiente[2] y un espaciamiento entre corrida de 1,5 [m].

[2]La línea gradiente corresponde a aquella línea que se marca en la sección de trabajo por los topógrafos, se ubica a una altura de 1,5 [m] con respecto al piso y su función es guiar el paralelismo de los brazos de los jumbos.

2 | Antecedentes Generales

Este capítulo tiene como finalidad contextualizar el trabajo de investigación, enfocándose en las actividades mineras desarrolladas por la empresa Candelaria y su relación de mandante con la empresa contratista Züblin. Se revisan las actividades que se ejecutan en el desarrollo de ciclo horizontal, se presenta la revisión bibliográfica y estado del arte que sustenta esta investigación, directamente relacionado con los objetivos del presente estudio, el cual consiste en el diagnóstico, análisis y mejoras para los trabajos de desarrollo horizontal.

2.1. Antecedentes de la Empresa

2.1.1. Constitución de la Sociedad

La sociedad se constituyó como Compañía Contractual Minera Ojos del Salado, según escritura pública de fecha 31 de enero de 1978, posteriormente ésta se transformó en una sociedad anónima cerrada.

Con fecha 1 de diciembre de 1991, los accionistas dividieron la sociedad, transfiriendo los activos, pasivos y patrimonio no relacionados al Proyecto Minero Candelaria a una nueva sociedad. La continuadora legal, Compañía Minera Ojos del Salado S.A. una vez realizada la división, cambió su nombre por Compañía Minera Candelaria S.A.

Con fecha 20 de mayo de 1992, los accionistas transformaron la Sociedad en una compañía contractual minera, modificando su nombre por el actual Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC).

Hasta septiembre de 1994, las actividades de la Compañía se centraron exclusivamente en la construcción y en el desarrollo del Proyecto Minero Candelaria; finalmente, las operaciones comerciales comenzaron en octubre de 1994.

Hasta octubre del año 2014 la CCMC tenía como accionista mayoritario a la estadounidense Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc. con un 80 % y el consorcio japonés Sumitomo Corp. con un 20 % de participación. Actualmente el total de la participación de Freeport fue adquirido por Lundin Mining Corporation (80 %) y Sumitomo Corp. (20 %). A través de su filial LMC Candelaria SpA, Lundin Mining Corporation es el accionista controlador y operador.



Figura 2.1: Ubicación geográfica de la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC).
(Fuente: Visor de mapas de la infraestructura de datos geoespaciales (IDE), http://www.geoportal.cl/Visor/)

El acceso a la mina Candelaria es por dos vías: la primera opción se encuentra a 15,3 [km] al sur de Copiapó, ingresando a la Carretera Panamericana Norte, ruta 5, que intercepta con la ruta C-397 al este y con una distancia de 13,1 [km] hasta la faena, desde la unión de las dos rutas. La segunda opción es desde la ciudad de Copiapó, ingresando por Copayapu hacia Tierra Amarilla, luego tomar la salida en dirección a Costanera C-35 y desde ahí tomar la ruta C-397, dirección suroeste, que recorre una distancia de 8,7 [km] aproximadamente hasta el ingreso de la mina. En la Figura 2.2 se muestran, en el orden respectivo, las rutas descritas.

La CCMC es una mina a cielo abierto y explotaciones subterráneas. En la actualidad, la CCMC es propiedad de la empresa minera canadiense Lundin Mining Corporation, dueña de la mina a rajo abierto Candelaria y las minas subterráneas Candelaria Norte, Candelaria Sur, Santos y Alcaparrosa.

Las operaciones de la mina Candelaria produjeron, el año 2017, alrededor de 270.000 tpd de mineral extraído[3] y aproximadamente 64.800 tpd de mineral enviado a la planta procesadora, la cual tiene una capacidad de 75.000 toneladas por día. En esta planta se realizan los procesos de molienda y flotación, obteniendo como producto final un concentrado de cobre del orden de un 31 %. Posteriormente, se envía el concentrado de cobre a la instalación portuaria ubicada en Punta Padrones, en la comuna de Caldera, desde donde se embarca al cliente.

El proyecto mina Candelaria inició sus operaciones el año 1993, el método de explotación utilizado es a cielo abierto. La mineralización del yacimiento consta de calcopirita, magnetita, pirita y pirrotina, en diferentes proporciones. Hasta octubre del año 2014 la compañía tenía como accionista mayoritario a la estadounidense Freeport McMoRan Copper & Gold, con un 80 % y al consorcio japonés Sumitomo, con un 20 %, pero cuya participación fue adquirida por la empresa Lundin Mining en noviembre del año 2014.

[3]Corresponde al total de mineral extraído, de la mina a cielo abierto y de las minas subterráneas, correspondientes al proyecto Candelaria.



Figura 2.2: Rutas de acceso para la CCMC.
(Fuente: Información sobre rutas en Google Maps, https://www.google.cl/maps/@-27.5303609,-70.3069658,15z)

El año 2003 comienza el desarrollo del proyecto minero subterránea Candelaria Norte (CN), cuya finalidad es explotar reservas de mineral, subyacentes al rajo original, con leyes promedio mayores al 1 % de Cu. En la actualidad el proyecto se explota por la empresa contratista Züblin International GmbH Chile SpA, que renovó el contrato de explotación hasta el año 2022.

Los trabajos que ejecuta la empresa contratista Züblin-STRABAG al interior de la mina CN corresponden a desarrollo, producción, extracción y servicios, entre otros. Por último, cabe mencionar que la tasa de extracción promedio de la mina CN fue de, aproximadamente, 7.000 tpd de mineral el 2017, y aumentando a 10.000 tpd para el 2019, con leyes que fluctúan entre 0,67 % a 1,76 % de Cu.

A continuación, se puede apreciar, en la Figura 2.3, la disposición de la mina subterránea Candelaria Norte con respecto a la disposición del rajo de Candelaria.

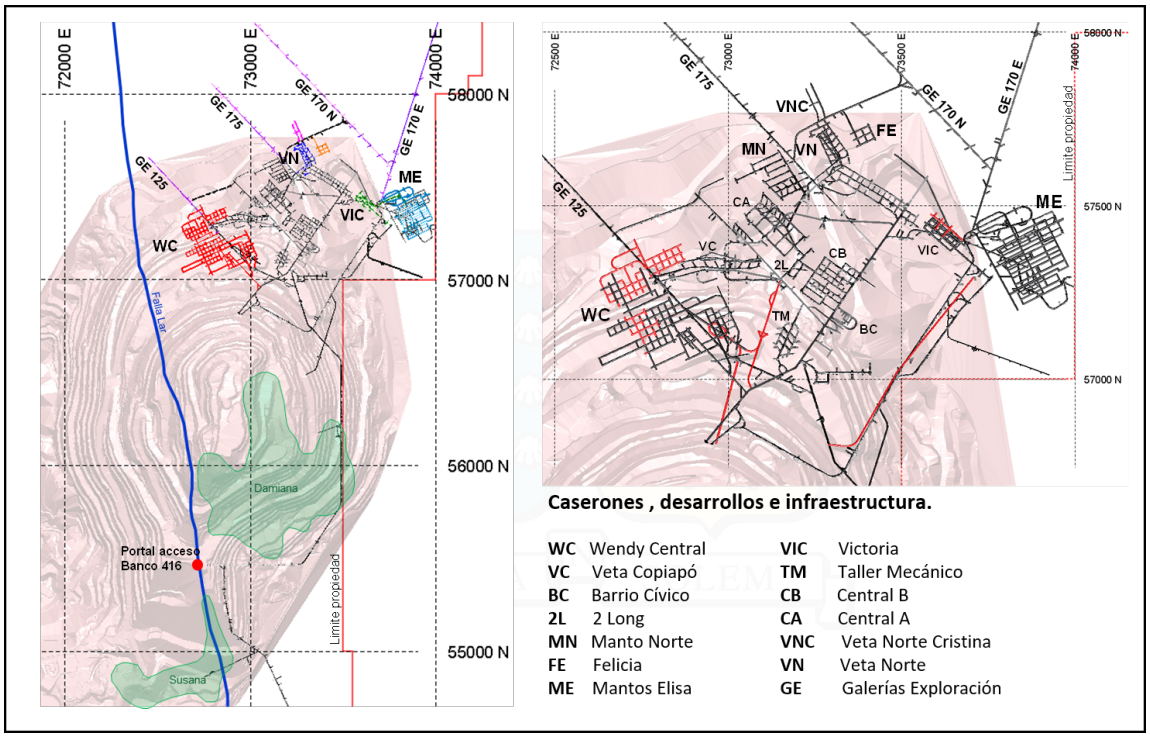


Figura 2.3: Disposición espacial de la mina subterránea Candelaria Norte, con respecto a la mina a rajo abierto.
(Fuente: Compañía minera Lundin Mining, 2014.)

2.2. Método de Explotación Mina Candelaria Norte

El método utilizado para explotar la mina Candelaria Norte es el Sublevel Stoping, con la variante Long Blast Hole (LBH). Por lo tanto, se realizan los trabajos desde un nivel de producción inferior con una galería undercut (GU), en donde se produce el colapso del caserón y que, además, se conecta con los cruzados de extracción (CX), que permiten la recolección de mineral. En paralelo se encuentran las galerías de transporte (GT), que se conectan con la galería undercut (GU), por medio de los cruzados (CX) o estocadas de carguío -como ya se mencionaba-, con ángulos de 60° respecto a la galería de transporte, que permiten un fácil acceso de los cargadores frontales a los puntos de extracción. También, una galería de perforación (GP) en el nivel de perforación superior al caserón, acorde a la configuración y geometría del cuerpo mineralizado (Hamrin, 2001). Ambos métodos se pueden visualizar en la Figura 2.4.

El arranque del mineral se realiza de la forma convencional, perforando tiros radiales (abanico) desde los niveles de producción, con una longitud aproximada de 17 metros con equipos Simba M4 C-ITH y S7 D, cuyo diámetro de perforación utilizado es de 63,5 [mm] y las perforaciones de banqueo desde el nivel de perforación, ubicado en el techo del caserón, con una longitud aproximada de 20 - 60 metros con equipos DTH, cuyo diámetro común es 114,3 [mm]. Para la variante Long Blast Hole se realizan perforaciones de tiros, con un diámetro mayor hasta los 165,1 [mm] y de mayor longitud, pero solo se utiliza en casos especiales. Además, se debe dejar entre caserones, como mínimo, un pilar de 20 - 25 metros por motivos de estabilidad y seguridad. Esta metodología de trabajo se va replicando en los demás caserones, pero dependerá de la disposición geométrica del depósito y del tamaño de este, por lo tanto, las configuraciones de ángulo

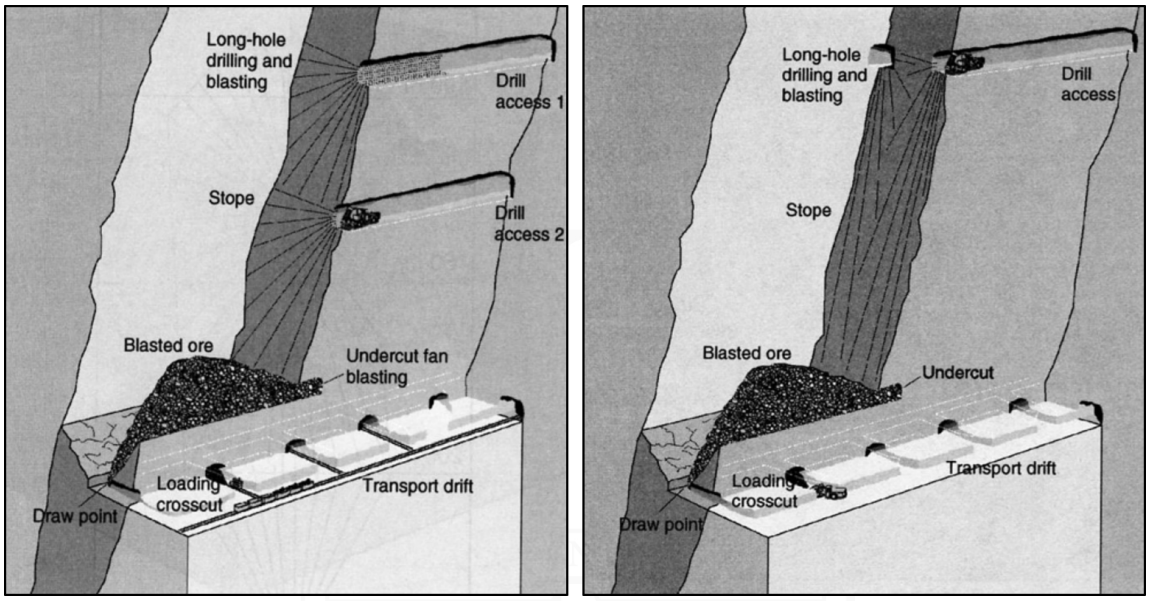


Figura 2.4: Método convencional de Sublevel Stoping y con su variante LBH, según el orden respectivo de las imágenes.
(Fuente: Libro underground mining methods and applications, H Hamrim (2001).)

de inclinación, longitud del pozo y el ángulo de abatimiento van cambiando con respecto al depósito de mineral. En la Figura 2.5 se puede visualizar un ejemplo de los diagramas de perforación utilizados en la mina Candelaria Norte.

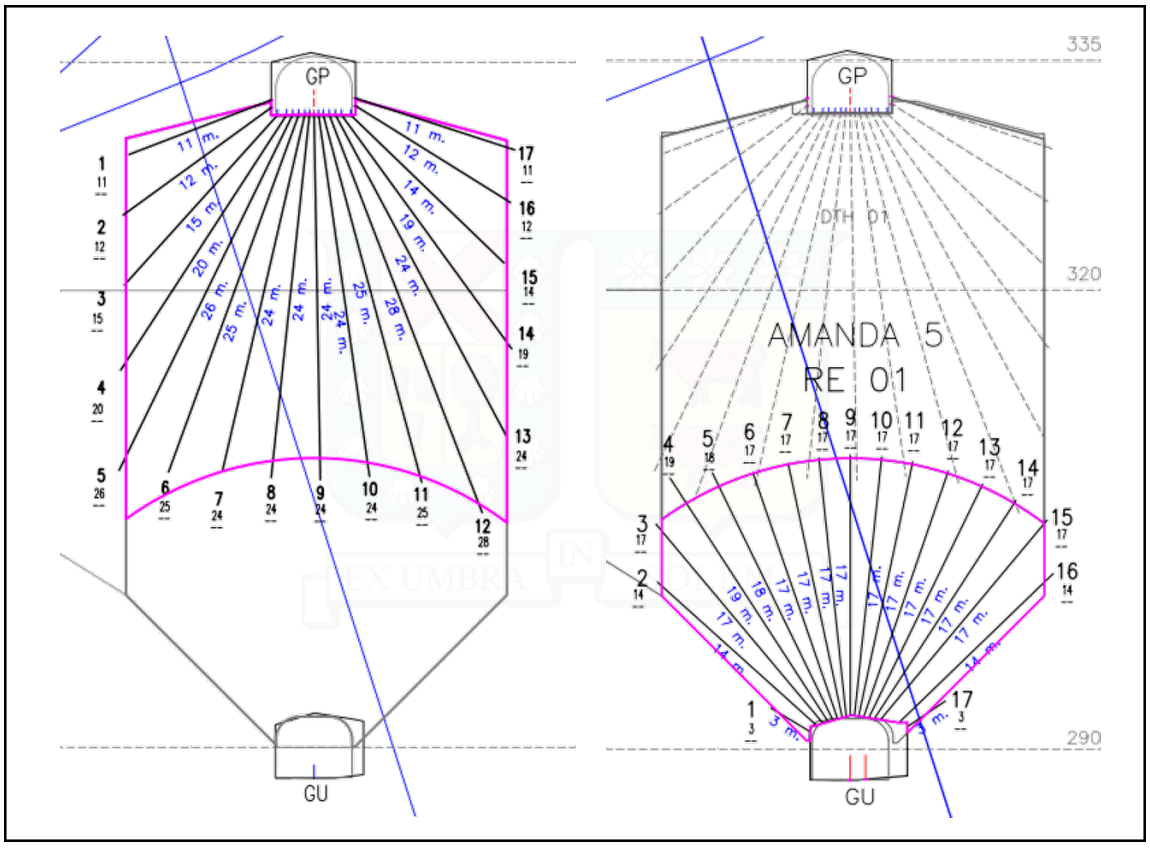


Figura 2.5: Diseño de los diagramas de perforación para el caserón Amanda 5, utilizado en la mina Candelaria Norte.
(Fuente: Información entregada por la empresa contratista Züblin.)

2.3. Condiciones Geológicas Mina Candelaria

Los cuerpos mineralizados del depósito minero Candelaria, son del jurásico superior a cretácico inferior, como se puede apreciar en la Figura 2.6, con una extensión aproximada de 2.000 [m] en sentido N-S, con un ancho de 600 [m] y una potencia acumulada de 650 [m]. Dichos cuerpos mineralizados corresponden a mantiformes o lenticulares hospedados por los niveles inferiores de tobas y andesitas de la formación Punta del Cobre (Rieger y Marschik, 2010).

La mineralización principal consiste en magnetita, calcopirita y pirita subordinada (con una proporción de calcopirita/pirita de 5/1), en la parte superior de depósito se presenta pirrotita. El oro se presenta en grano, con un tamaño de pocos micrones en la estructura interna de la calcopirita y en menor medida en la pirita; los minerales de mena se presentan en venillas, rellenos de brecha y diseminación de rocas volcánicas, intensamente alteradas de la formación punta de cobre.

Las rocas volcánicas huésped de la mineralización de Candelaria fueron afectadas por una alteración potásica temprana, que se caracterizó por una biotización pervasiva con introducción menor de feldespato-K y con depósito de magnetita y apatito en las rocas; una etapa posterior de alteración sódico-cálcica, caracterizada por la asociación actinolita, escapolita y albita, más la formación de hornblenda y hedenbergita e introducción

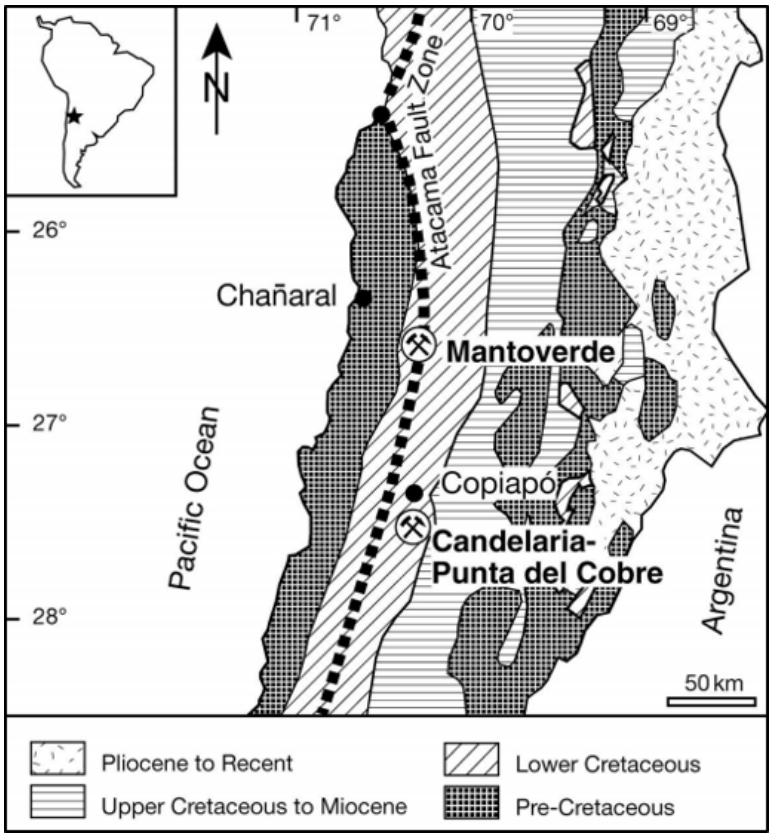


Figura 2.6: Marco geológico de la mina Candelaria.
(Fuente: The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the mantoverde district, northern Chile)

principalmente de calcopirita y otros sulfuros.

Los niveles sobreyacentes al yacimiento Candelaria corresponden a rocas sedimentarias carbonatadas neocomianas del Grupo Chañarcillo, que presentan alteración del tipo skarn de andratita-diópsido (Novikova, 2004).

2.3.1. Geología Distrital

La mina Candelaria corresponde a un yacimiento de Iron Oxide Copper Gold (IOCG), hospedado en rocas volcánicas y volcanoclásticas de la formación Punta del Cobre del Neocomiano. Las rocas de caja del distrito de Punta del Cobre han sido agrupadas en tres grandes unidades estratigráficas pertenecientes a la Fm. Dichas unidades corresponden de techo a piso, Meta-volcanoclásticos Superior, Meta-tobas y Meta-andesitas inferior. Sobreyacen a esta formación, una secuencia de calizas skarnificadas con intercalaciones menores de rocas córneas, pertenecientes al Grupo Chañarcillo, ver Figura A.1 y Figura 2.7.

Por otro lado, el depósito Candelaria Norte se ubica en el extremo nororiental del cuerpo Candelaria, como se puede apreciar en la Figura 2.8, constituyendo un borde de gran dimensión. Con respecto a la geología, esta se encuentra emplazada entre metatobas y las metandesitas inferiores, preferentemente tobas, lo cual constituye cuerpos mantiformes alongados en el sentido noroeste. Estas unidades de tobas se encuentran

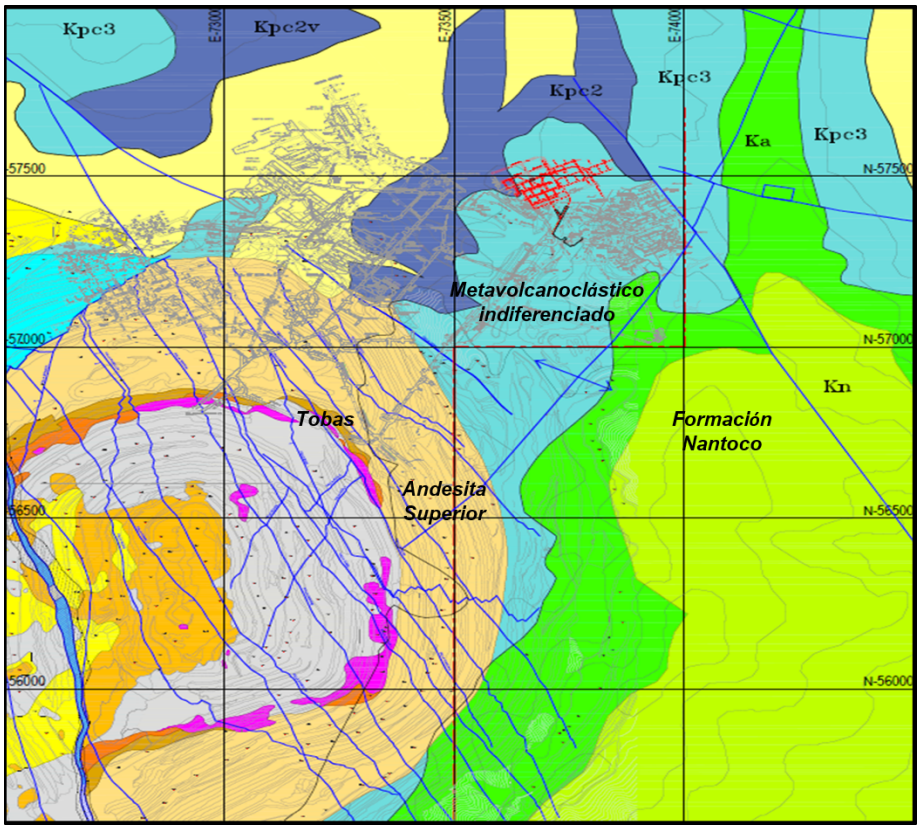


Figura 2.7: Distrito del depósito tipo IOCG de Candelaria, con su respectiva geología y con los planos de la mina subterránea CN.
(Fuente: Compañía minera Lundin Mining, 2014.)

afectadas por una biotización fina, que varía de intensidad de moderada a fuerte. En general, el cuerpo mineralizado se constituye de varios mantos, en sentido noroeste, con espesores variables entre 10 - 70 metros y cuya mineralización corresponde a delgadas y cortas vetillas de calcopirita, que también se encuentran en stockwork.

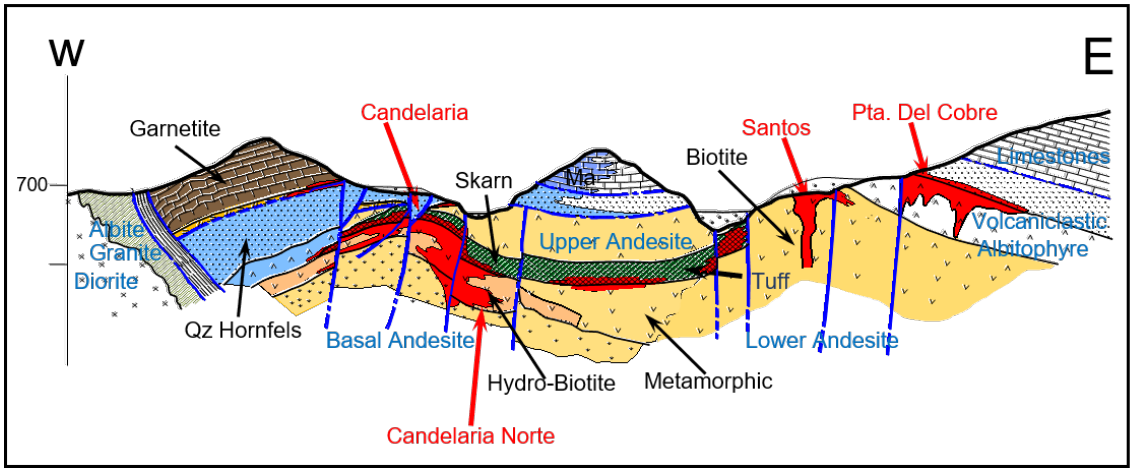


Figura 2.8: Perfil de la geología del distrito Punta del Cobre, con la ubicación de la mina Candelaria y CN.
(Fuente: Compañía minera Lundin Mining, 2014.)

Las brechas hidrotermales corresponden al nivel que contiene la mineralización de mejor ley y son las brechas de fragmentos formadas sobre albitófiro y andesita. Así, la matriz se encuentra formada principalmente por calcopirita y/o magnetita.

2.4. Desarrollo Horizontal

Desde el punto de vista técnico, las labores de desarrollo son excavaciones de roca al interior de la mina, que tienen como objetivo ejecutar labores mineras de acceso para extraer el mineral económico de los depósitos. El método de avance que se utiliza debe tener como soporte los resultados de los análisis multicriterio, tomando en cuenta aspectos como el tipo de terreno, dimensiones, geometría, longitud, volumen total a ser excavado, condiciones geológicas, restricciones de vibraciones, trazado del túnel, disposición de fallas, entre otros factores (Matti, 1999). Dentro de las variadas operaciones en el proceso de construcción de túneles y siguiendo la lógica del método convencional, el cual es un proceso cíclico e interdependiente, las operaciones involucradas se pueden apreciar en la Figura 2.9.

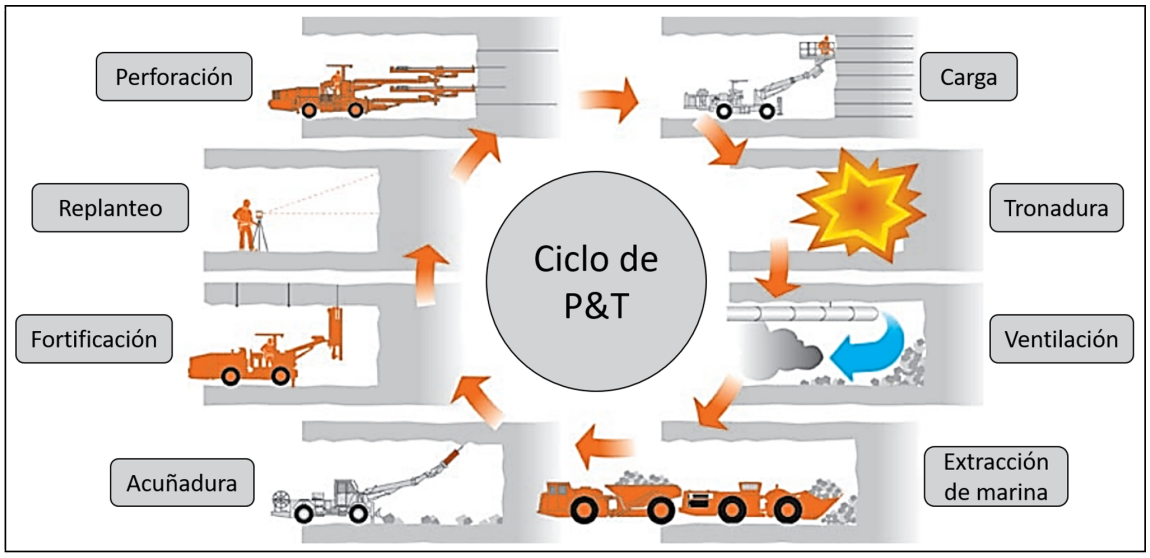


Figura 2.9: Ciclo de avance en túnel con el método convencional de perforación y tronadura.
(Fuente: Libro "Rock excavation handbook - Tunneling".)

Para el caso particular de la mina subterránea Candelaria Norte, se estandarizó el ciclo de desarrollo horizontal en un flujograma que se puede apreciar en la Figura 2.10. En donde, se establece el orden de ejecución de las actividades involucradas en el ciclo de desarrollo y establecidas por el Departamento de Ingeniería y Planificación de la empresa Züblin.

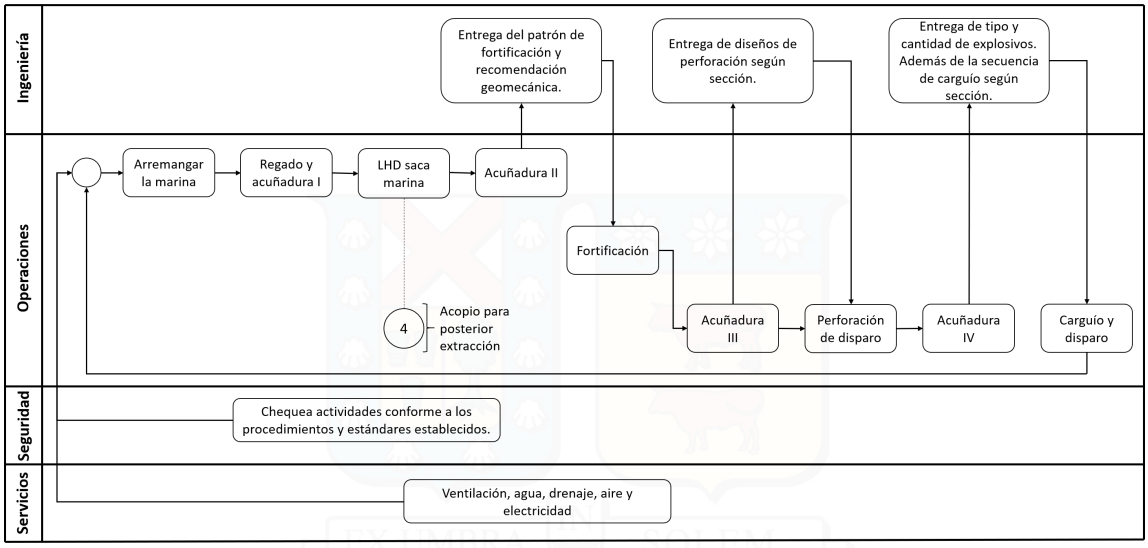


Figura 2.10: Diagrama de flujo de la operación de desarrollo (disparo de avance), utilizado en la mina CN.
(Fuente: Elaboración propia por medio del software PowerPoint.)

A continuación, se realizará una descripción de las operaciones unitarias, involucradas en el proceso de desarrollo al interior de la mina subterránea CN y con sus respectivos procedimientos establecidos por la empresa Züblin.

2.4.1. Operación de Acuñadura

Dentro de la actividad minera subterránea, uno de los riesgos más latentes corresponde a la caída de roca desde el techo de las galerías o desde sus cajas, producto de la extracción de masa rocosa que va provocando cambios en las condiciones naturales de equilibrio, sometiendo al macizo a concentraciones de esfuerzos, pudiendo generar el desprendimiento de rocas sueltas. Dicho desprendimiento puede provocarse por condiciones del entorno como (SERNAGEOMIN, 2014):

- Presencia de agua.
- Dimensiones y forma de la sección excavada.
- Método de explotación.
- Debilitamiento provocado por las tronaduras cercanas.
- Características y condiciones determinadas del macizo rocoso.

El proceso de acuñadura es la técnica que permite detectar y eliminar, de forma manual o mecanizada, las rocas sueltas del techo, cajas y frentes de galerías subterráneas, evitando que caigan de forma imprevista y puedan causar lesiones a los trabajadores, como también daños materiales. El proceso de acuñadura se debe realizar las veces que sea necesario para el saneamiento de la labor y esto dependerá netamente de las condiciones del terreno y de las distintas operaciones que allí se realicen. Por lo tanto, el equipo de trabajo

debe estar atento a las condiciones de seguridad del terreno, inspeccionándolo periódicamente para evaluar sus condiciones de estabilidad.

Para la acuñadura manual, se utilizan herramientas estandarizadas para este trabajo, como la barretilla de material liviano (tubo de fierro o aluminio), firme y rígido, con distintos largos que tienen relación directa con el tamaño de sección de la galería. En la mina subterránea CN el largo varía de 1,2 metros hasta 3,6 metros. Estas herramientas se pueden utilizar con sus dos extremos, uno denominado punta y el otro paleta. Además, debe tener un anillo desviador de piedras, que puede ser de goma o metálico, como se puede apreciar en la Figura 2.11.



Figura 2.11: Esquema del acuñador manual, con sus respectivas partes de uso.
(Fuente: Empresa Mecalux.)

Las posibles rocas sueltas en la galería se pueden detectar a través del sonido, golpeándolas con el acuñador (sonido apagado y con poca vibración). En cambio, la roca dura y firma produce un sonido metálico y una fuerte vibración.

Por otro lado, en la actualidad se utiliza con mayor frecuencia la acuñadura mecanizada, cuando las condiciones geomecánicas son de gran complejidad, el tamaño de la sección es mayor o para mejorar la eficiencia de la operación de acuñadura. La finalidad de estos equipos es llegar a lugares de mayor riesgo, y a sectores, donde la acuñadura manual no puede cumplir su función.

Por último, la Figura 2.12 muestra un flujograma de los procedimientos establecidos para la ejecución de la operación de acuñadura de desarrollo.

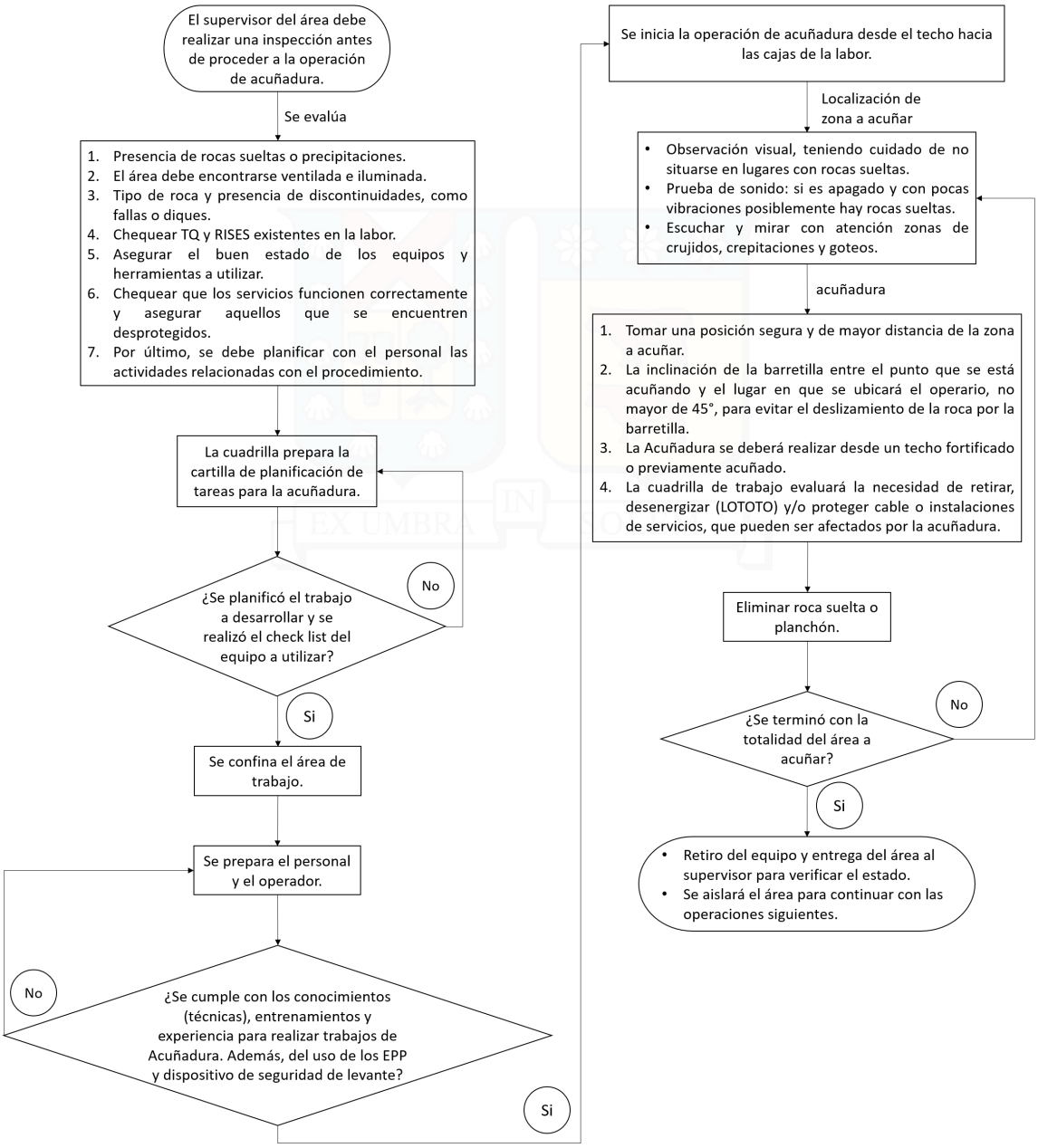


Figura 2.12: Flujograma de la operación de acuñadura de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin.
(Fuente: Elaboración propia, desarrollado con el procedimiento de acuñadura de la empresa Züblin.)

2.4.2. Operación de Fortificación

El proceso de fortificación se define como el sostenimiento de las labores mineras subterráneas, utilizando diversas técnicas y elementos que permiten asegurar una zona libre de caída de roca, manteniendo las condiciones de seguridad y estabilidad en las galerías. En síntesis, el objetivo principal es auto soportar el macizo rocoso.

En los diseños de fortificación se debe considerar la interacción de los fenómenos de carga y deforma-

ción, tanto del macizo rocoso como también del sistema de soporte. Es por esta razón, que los levantamientos geotécnicos y aspectos técnicos de la excavación son de gran importancia para determinar la resistencia y asimilar las cargas que actúan sobre el macizo. Un criterio por considerar corresponde a la duración o temporalidad que se le dará a la sección, lo cual será determinante para la recomendación de fortificación.

Para lograr identificar los sectores que requieren fortificación, hay diferentes formas de detectar el aumento de presión en las labores, tales como (SERNAGEOMIN, 2014):

- La deformación o quiebre de pernos, soportes, el pandeamiento de las mallas que tienen rocas soportando sobre ella, ruidos extraños, fuertes y repetitivos, o el goteo del cerro.
- Desplazamiento de cuñas, fracturas, fallas y quiebres que se encuentran en terreno.
- Detección de rocas nuevas en el piso de la labor.
- El desvio de pisos o cajas de las galerías, así como o la forma ovalada que toman las perforaciones normales.

2.4.2.1. Clasificación de la Fortificación

Fortificación Activa

Tiene como finalidad restablecer el equilibrio original de los diferentes esfuerzos y modificar estructuralmente la roca, para hacerla auto soportable. Los métodos más empleados corresponden generalmente a elementos de fortificación como pernos, cables u otros, introducidos directamente al macizo rocoso para mejorar sus propiedades de resistencia, los cuales pueden ser puntuales o repartidos sistemáticamente. También, se considera activa la proyección neumática de hormigón (shotcrete) o mortero.

Fortificación Pasiva

Por otro lado, el sistema llamado “pasivo” corresponde a aquel en que, por razones operacionales y de seguridad, no se aplica ninguna carga externa al momento de realizar su instalación y sólo trabaja cuando el macizo rocoso experimenta alguna deformación. Estos elementos son instalados en la periferia de la excavación con el objetivo de sostener la deformación y fallamiento progresivo del material rocoso que se encuentra en torno a la excavación. Los métodos más comunes empleados son los marcos metálicos (rígidos, deslizantes o articulados), el hormigón armado (vigas – marco de concreto, mampostería), shotcrete y malla.

Dentro de los análisis realizados, tenemos el uso de métodos empíricos de diseño, los cuales se basan en relaciones entre los sistemas de clasificación del macizo rocoso, casos históricos y experiencias dentro de la industria minera. Por lo cual, es fundamental entender la mecánica de rocas para determinar parámetros de estabilidad de una excavación sometida a distintas condiciones geológicas y obtener una caracterización del macizo rocoso (Laubscher, 1990). En la actualidad, los métodos de clasificación de macizos rocosos más utilizados se pueden apreciar en la Tabla 2.1.

Clasificación	Definición	Autor
Rock Tunneling Quality (Q)	$Q = (\frac{RQD}{J_n})(\frac{J_r}{J_a})(\frac{J_w}{SRF})$	Barton, 1993
Rock Mass Rating (RMR)	Índice de calidad del macizo rocoso	Bieniaswaky, 1989
Modified Rock Mass Rating (MRMR)	Valor ajustado por la presencia de infraestrucutra minera	Laubscher y Jakubec, 1984
Geological Strength Index (GSI)	Estima la reducción de la resistencia del macizo rocoso, debido a las condiciones geológicas en la roca.	Brady & Brady Brown, 2004
Rock Quality Designation Index (RQD)	Se define como el porcentaje de trozos intactos mayores a 10 cm en el largo total de un sondaje.	Deere, 1967

Tabla 2.1: Métodos principales para la clasificación del macizo rocoso.

Las metodologías anteriores, demuestran si existe una condición de auto soporte, para la presencia de presiones que se mantienen debajo de los limites críticos, que la roca natural tiene como capacidad de soportar (Singh y Goel, 1999). En el caso contrario, se requerirá fortificación; también se determina bajo las variables y graficas asociadas al uso y temporalidad. Por lo tanto, es fundamental realizar los correspondientes levantamientos geotécnicos para determinar las distintas continuidades como diaclasas, fallas, fracturas, planos estratificados, entre otros.

Diseño del soporte con pernos

Para el diseño de la instalación del soporte con pernos hay varios factores que se deben considerar, para encontrar el adecuado diseño en la fortificación, entre ellos:

- Densidad de pernos.
- Propiedades del material de anclaje.
- Longitud del perno.
- Diámetro del perno y de la perforación.
- Orientación del perno.

Densidad de pernos

Este parámetro corresponde al número de pernos instalados por área de superficie; se puede calcular utilizando el peso de roca que se desea sostener y la resistencia de los pernos, como se puede apreciar en la Ecuación 2.1.

$$\delta_p = \frac{P_t \times FS}{R_d \times A} \tag{2.1}$$

En donde:
δ_p : densidad de pernos.
P_t : peso de la roca del techo a soportar.
R_d : resistencia del deslizamiento de los pernos.
A : zona del techo a fortificar.
FS : factor de seguridad establecido.

Obtener la densidad de pernos utilizados tiene como finalidad entrelazar discontinuidades y soportar las cargas derivadas de la gravedad.

Propiedades del material del perno

Dentro de las propiedades del material de anclaje, la gran mayoría de lo pernos se encuentran fabricados de acero, ya sea acero normal, galvanizado o inoxidable, con la finalidad de minimizar los efectos de corrosión o maximizar las propiedades de resistencia al deslizamiento y el alargamiento. También, se encuentran los sistemas de anclaje flexibles, fabricados con cables de acero con formas de filamentos trenzados, los que se utilizan dependiendo de la geometría de la zona que se desea fortificar y en donde no cumple las propiedades el perno rígido.

Longitud del perno

La finalidad de establecer la longitud de perno es cumplir con el requerimiento de fortificación, ya sea para rocas estratificadas sub-horizontales, rocas no estratificadas con un sistema de fracturas dominantes sub-horizontales, cuñas, columnas verticales, entre otras, en donde se pueden utilizar pernos rígidos individuales, acoplados o flexibles. Generalmente la longitud del perno se determina utilizando relaciones empíricas, obtenidas por la calidad del macizo rocoso, la geometría y dimensiones de la zona a fortificar. A partir de variados casos históricos y con la base de investigación geotécnica, se pueden establecer algunas reglas previas al diseño para obtener una longitud mínima (Forrest T. Gay, 1980), las que se pueden apreciar en la Tabla 2.2.

<table>
<tr><th>Parámetro</th><th colspan="2">Regla empírica</th></tr>
<tr><td rowspan="7">Mínima longitud</td><td colspan="2">La mayor de</td></tr>
<tr><td colspan="2">a. Dos veces la separación entre anclajes.</td></tr>
<tr><td colspan="2">b. Tres veces el ancho de los bloques de roca críticos potencialmente inestables.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">c. Por sobre la base de los arcos</td><td>Para luces menores que 6 [m], 1/2 de la luz.</td></tr>
<tr><td>Para luces entre 18 [m] y 30 [m], 1/4 de la luz.</td></tr>
<tr><td>Para luces entre 6 [m] y 18 [m], se interpola linealmente entre 3 y 4,5 [m] respectivamente.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">d. Bajo la base de los arcos</td><td>Para aberturas con alturas menores que 18 [m] longitudes como las determinadas en c.</td></tr>
<tr><td>Para aberturas con alturas mayores que 18 [m] longitudes de 1/5 de la altura.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Máximo espaciamiento</td><td colspan="2">El menor de</td></tr>
<tr><td colspan="2">a. 1/2 la longitud de los anclajes.</td></tr>
<tr><td colspan="2">b. 1 1/2 al ancho de los bloques de roca críticos potencialmente inestables.</td></tr>
<tr><td>c. 1,8 [m]</td><td>Espaciamientos mayores que 1,8 [m] requieren agregar tratamientos superficiales como mallas, gunita, etc.</td></tr>
<tr><td>Mínimo espaciamiento</td><td colspan="2">0,9 [m] a 1,2 [m]</td></tr>
</table>

Tabla 2.2: Longitud mínima y espaciamiento máximo para el refuerzo de roca.

Para poder calcular la longitud, según Littlejohn, se evalúa la resistencia de la roca intacta a partir de su cohesión c (Hudson, 1993), como aparece en la Ecuación 2.2.

$$D = \left[\frac{FS \times F}{c\pi}\right]^{1/2} \tag{2.2}$$

En donde:

D : es la profundidad requerida de anclaje.

FS : factor de seguridad establecido.

c : la intercepción de la cohesión masiva de roca.

F : la fuerza del ancla requerida para la estabilidad.

Cuando la roca es competente, la profundidad de anclaje para una sola hilera de pernos instalados y espaciados a una distancia “s”, se puede calcular de la siguiente manera: Ecuación 2.3.

$$D = \frac{FS \times F}{cs} \tag{2.3}$$

En donde:
F : es la fuerza de anclaje en cada perno.
s : distancia de espaciamiento.
FS : factor de seguridad establecido.

Las ecuaciones anteriores tienen aplicabilidad para roturas dentro del macizo rocoso, pero para roturas del terreno, producto del corte por falla a lo largo de la superficie, se debe usar el criterio de rotura de Mohr. Es decir, la tensión tangencial en rotura, será igual a la cohesión más la tensión normal multiplicada por el coeficiente de rozamiento.

Diámetro del perno y de la perforación

La diferencia entre ambos diámetros dependerá del tipo de confinamiento requerido para el tipo de fortificación utilizada. A modo de ejemplo, tenemos los pernos Split Set, que necesitan un diámetro de perforación menor al diámetro del perno para cumplir con su función de fricción y esta diferencia de diámetro dependerá de las propiedades del acero del perno y su diámetro externo. Por otro lado, para pernos de anclaje por adherencia, la perforación debe ser mayor al diámetro del perno, para permitir ser rellenada la perforación con su respectivo componente. La diferencia del diámetro dependerá de la cantidad y tipo de relleno para permitir el correcto anclaje. Por último, se puede desprender que si aumenta el diámetro del perno mayor será la carga de soporte resultante.

Orientación del perno

Para que un perno cumpla con su función de soporte, su orientación con respecto a la estructura que se desea soportar debe ser perpendicular, con la finalidad de soportar el máximo efecto de refuerzo en entornos de alta tensión. Para secciones circulares, se recomienda de forma radial o en abanico, pero que dependerá de las condiciones geotécnicas existentes en terreno.

Tipo de fortificación

Dependiendo del propósito asociado a la sección se tendrá un tipo de fortificación. Al interior de la mina CN el método de fortificación a implementar depende de la recomendación geomecánica y del patrón de fortificación, pero corresponde a un sistema activo el cual puede variar su grado de intensidad, teniendo una fortificación base con pernos Split Set, fortificación con pernos helicoidales lechados, implementación de malla tipo biscocho y fortificación con shotcrete.

Pernos de fricción - Split Set

La fortificación con pernos Split Set se considera dentro de las fortificaciones temporales y su durabilidad dependerá netamente de las condiciones existentes en terreno, ya que se ve afectado directamente

por la corrosión. La metodología de trabajo consiste en la elaboración de una perforación con un diámetro menor al del perno utilizado, para luego instalar el perno Split Set mediante percusión, ejerciendo una presión radial contra la roca. Se trabaja por fricción provocando una resistencia al deslizamiento a lo largo de la longitud total del perno, como se puede apreciar en la Figura 2.13.

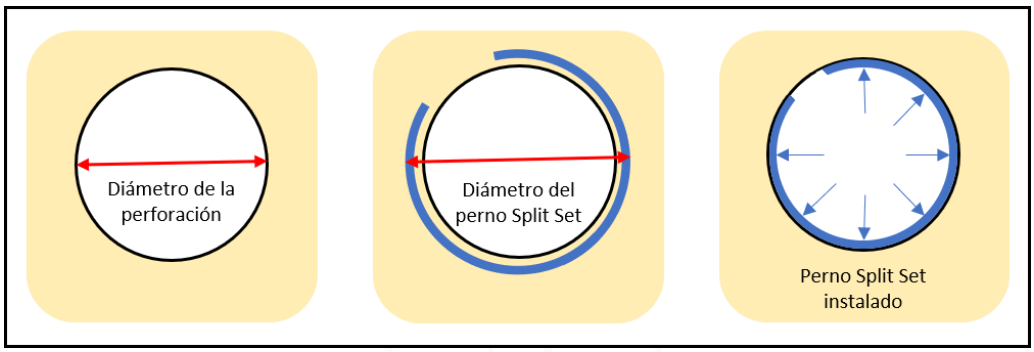


Figura 2.13: Funcionalidad de los pernos Split Set.
(Fuente: Elaboración propia por medio del software PowerPoint.)

Las características de los pernos Split Set, utilizados al interior de la mina Candelaria Norte, se pueden ver en la Tabla 2.3. Con respecto al diámetro de 47 [mm] puede soportar entre 8 y 11 toneladas.

Tipo de perno	Longitud [m]	Diámetro [mm]	Tipo de acero
Split Set	0,6	47	Grado 60 Norma ASTM a 607
	1,8	47	
	2,4	47	
	3,2	47	

Tabla 2.3: Características de los pernos Split Set utilizados en la mina Candelaria Norte.

La longitud del perno dependerá netamente de la funcionalidad de este. Los pernos de 1,8 [m] y 2,4 [m] son los utilizados como elemento de fortificación y soporte. En la instalación se incluye la utilización de la planchuela cuadrada acampanada[4] y el perno de 0,6 [m] corresponde a aquel, cuya función es el adose de malla, el cual se inserta al interior del perno Split Set, ya instalado previamente con su respetiva planchuela.

Dentro de las ventajas y desventajas se desprenden las siguientes:

- **Ventajas**
  - Bajo costo económico en comparación con otros pernos.
  - Se puede ingresar inmediatamente después de su instalación.
  - Rapidez y facilidad en su instalación, solo se necesita un equipo de perforación.
  - Se mueve junto a la deformación del macizo rocoso.

[4]Las dimensiones de las planchuelas utilizadas corresponden a 200 x 200 x 5 [mm].

- **Desventajas**
  - Afectado por la corrosión.
  - Fortificación temporal (menor a 2 años por lo general).
  - Baja capacidad de carga en comparación a los otros pernos.
  - Funcionalidad sensible al diámetro de la perforación.

Pernos de anclaje por adherencia

La fortificación con pernos helicoidal[5] corresponde a los llamados pernos de anclaje por adherencia y son un refuerzo permanente, cuya función es fortalecer la roca y aumentar la resistencia inherente del macizo rocoso, para lograr soportarse a sí misma. Su forma de trabajo consiste en el contacto entre el perno y la perforación, rellenando las partes vacías con cemento o resina, que son los elementos más utilizados, como se puede apreciar en la Figura 2.14. Para rocas levemente fracturadas o masiva, el objetivo de la instalación de pernos es el control de la estabilidad de los bloques y cuñas inestables, confiriendo nuevas propiedades a la roca que rodea la excavación.

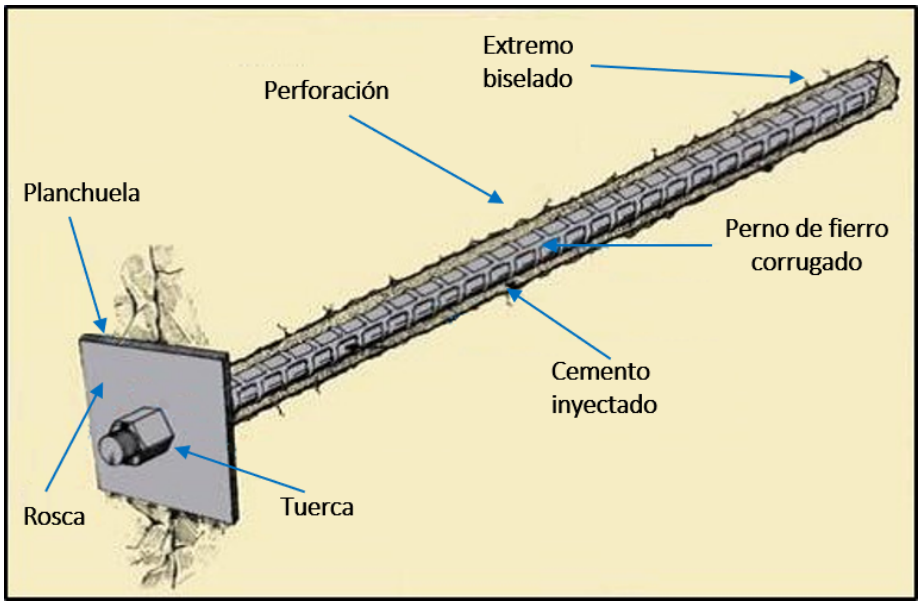


Figura 2.14: Forma de instalación de los pernos de anclaje.
(Fuente: Revista de seguridad minera, características de los pernos de roca.)

La longitud del perno helicoidal dependerá de la condición y estructuras geológicas presentes en la labor de desarrollo. Con respecto al tipo de confinamiento, cuando se utiliza cemento se requieren varios días de secado antes de que el perno pueda trabajar con carga completa y habitualmente corresponde al sistema de fortificación más barato, en comparación a otros elementos de adherencia. La característica principal del cemento, con respecto al perno, es su alta resistencia, durabilidad y gran protección a la corrosión. En

[5]El perno helicoidal corresponde a una barra de acero corrugado helicoidal, su sección transversal es ovalada y con un hilo helicoidal que permite la fijación de una placa de acero y tuerca nodular.

Candelaria Norte la instalación de pernos con cemento se realiza mediante un bombeo de la lechada al interior de la perforación, con un equipo mezclador. Una vez finalizado el fraguado del cemento, 28 días minimo, se tiene una resistencia a la compresión de 100 [Kg/cm^2].

Dentro de las ventajas y desventajas de la adherencia con cemento se desprenden las siguientes:

- **Ventajas**
  - Bajo costo en comparación a otros elementos de adherencia.
  - Baja corrosión y alta durabilidad.
  - Alta capacidad de carga por perno entre 12 a 18 toneladas.
- **Desventajas**
  - Alto control de la preparación del cemento con respecto a la razón agua/cemento.
  - Alto tiempo de fraguado, lo que impide la continuidad de los trabajos.

Para la adhesión de pernos con resina hay dos métodos comunes: por medio de cartuchos o inyectable. De ellos solo se describirá el método de resina inyectable, conveniente a la investigación del informe.

A diferencia del cemento, la resina proporciona un fragüe mucho más rápido, que puede oscilar de minutos hasta segundos. La resina utilizada en Candelaria Norte es proporcionada por la empresa Normet (una resina de poliuretano de silicato hixotrópico TamPur RBG-HTR; resina inyectable de dos componentes (A y B) en base a silicato modificado). La metodología de trabajo es igual al proceso de lechado con cemento, salvo que se utiliza una bomba de inyección de resina, como se puede apreciar en la Figura 2.15, con la inyección de ambos componentes por separado en razón 1:1 en volumen, hasta una línea final de mezclado de componentes, formando resina.

El equipo de inyección de resina corresponde a una bomba neumática de acero inoxidable de alta presión y con doble pistón. Su función es impulsar los componentes, a través de mangueras separadas, las cuales se unen en una conexión “T” y se conectan a un mezclador de 50 [cm] con un tornillo sin fin, homogeneizando la mezcla de los componentes, obteniendo como producto la resina. Las características técnicas de los componentes mencionados, se pueden apreciar en la Tabla 2.4.



Figura 2.15: Equipo neumático de alta presión con doble pistón para la inyección de resina líquida.
(Fuente: Propia de los equipos utilizados en la mina CN.)

TamPur RBG-HTR		
Descripción	Componente A	Componente B
Color	Claro	Café
Densidad a 25° C [g/cm^3]	1,45 -1,59	1,15 - 1,25
Viscosidad a 25° C [mPa.s]	900 - 2200	1200 - 2500
Datos de Reacción - A:B 1:1 Volumen		
Temperatura y tiempo de reacción	25° C	230 [s]
	35° C	180 [s]
	40° C	150 [s]

Tabla 2.4: Datos técnicos de los componentes A y B que conforman la resina.

Dentro de las ventajas y desventajas de la adherencia con resina se desprenden las siguientes:

- **Ventajas**
  - Fácil instalación y fijación de los pernos de fortificación.
  - Encapsulamiento completo de los pernos, inclusive en terrenos fracturados.

- Buena protección a la corrosión.
- Buena adherencia contra sustratos húmedos y mojados.
- Rápida reacción inclusive bajo agua, menor cantidad de tiempo de fragüe.
- Resistencia al fuego.
- Alta capacidad de carga.

▪ **Desventajas**

- Endurecimiento de los componentes en presencia de agua o humedad.
- Riesgos a la salud producto de una mala manipulación o ingesta de los componentes.
- Alto costo de insumos.

Dentro de la mina Candelaria Norte, para la operación de fortificación se utilizan pernos helicoidales con las características tabuladas en la Tabla 2.5 y el componente de adherencia a la roca es lechada de cemento. También, se utiliza una planchuela cuadrada acampanada, con su respectiva tuerca, que permite soportar la colocación de la malla de acero.

Tipo de perno	Longitud [m]	Diámetro [mm]	Tipo de acero
Helicoidal	2,4	22	Grado 60 Norma ASTM a 615
	3,2	22	
	4,0	22	

Tabla 2.5: Características de los pernos helicoidales utilizados en la mina Candelaria Norte.

Sistema de Mallas

Cuando los sectores de trabajo tienen un alto fracturamiento superficial, la fortificación con pernos que se haya utilizado, debe complementarse con el adose de una malla tejida, desde el techo de la labor o inclusive en las cajas, para así, prevenir accidentes por caídas de rocas, pudiendo afectar a los trabajadores o equipos.

Para el caso de la mina CN, una vez instalados los pernos helicoidales o Split Set se procede a la instalación de malla tipo bizcocho 10006 sobre el techo de la sección, pero el ancho a cubrir dependerá de la minuta de fortificación, siendo de 3 formas distintas, como se puede apreciar en la Figura 2.16.

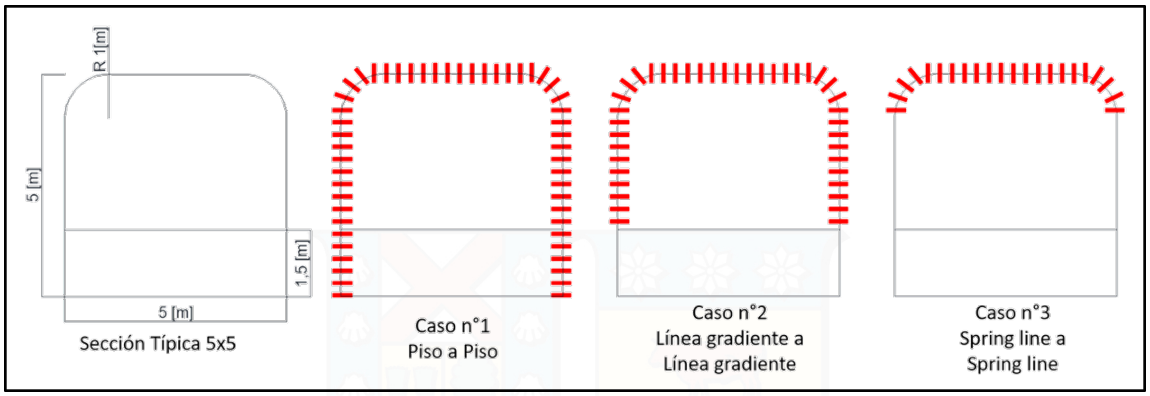


Figura 2.16: Modalidades de fortificación con malla, implementada en la mina CN.
(Fuente: Elaboración propia de acuerdo con los esquemas entregados por Candelaria Norte.)

En la Figura 2.17 se puede apreciar la operación de fortificación, con la cantidad de recursos humanos y el equipo utilizado, para cumplir con la operación de instalación de malla.



Figura 2.17: Operación de fortificación, realizando una instalación de malla con una grúa modelo JCB.
(Fuente: Propia de las labores al interior de la mina CN.)

Shotcrete

El hormigón proyectado o según su denominación en inglés Shotcrete, corresponde a una mezcla de cemento de alta resistencia, áridos (tamaño máximo a 10 [mm]), agua y aditivos, transportado por mangueras y proyectados neumáticamente, a alta velocidad, contra la superficie.

La teoría de sostenimiento por Shotcrete se basa en que todo macizo rocoso tiene una tensión interna estable, la que se ve alterada cuando, por efectos de la construcción de túneles, se realiza una perforación en él. El Shotcrete puede ser usado de las siguientes maneras:

- **Primario:** utilizado como elemento de sostenimiento primario, siendo el Shotcrete el encargado principal de mantener la estabilidad de la excavación.
- **Complementario:** utilizado como complemento de un sistema de fortificación primario, siendo el Shotcrete usado como sistema de fortificación secundario.
- **Reparador:** utilizado para reparación de un sistema de fortificación previamente instalado, que presenta deterioros o fallas, o que requiera de un aumento en sus niveles de fortificación.

Las funciones principales de la fortificación con Shotcrete son las siguientes:

1. **Generar un anillo en el túnel:** generar una resistencia que trabaje de forma similar a la de un marco, la que soporta las cargas de la roca al deformarse. También, este anillo es capaz de resistir las cargas puntuales ejercidas por pequeñas cuñas o bloques, que quedan descansando sobre la capa de Shotcrete.
2. **Sellar las superficies de la roca:** se rellenan las juntas y grietas existentes en la roca, evitando la caída de bloques pequeños y la alteración de la roca, de esta manera las labores subterráneas pueden mantener su capacidad de estabilidad por un período de tiempo más largo.

Para el caso de la mina CN, se utiliza el Shotcrete solo en sectores en que las condiciones geomecánicas ameriten el uso de este. Y, generalmente es usado como fortificación complementaria, previo a la instalación de pernos helicoidales y malla bizcocho 10006, como se puede ver en la Figura 2.18.



Figura 2.18: Fortificación con Shotcrete complementario al uso de mallas.
(Fuente: bestsupportunderground.com/page/6/.)

A continuación, en la Figura 2.19 se muestra el flujograma de los procedimientos establecidos para la ejecución de la operación de fortificación de desarrollo.

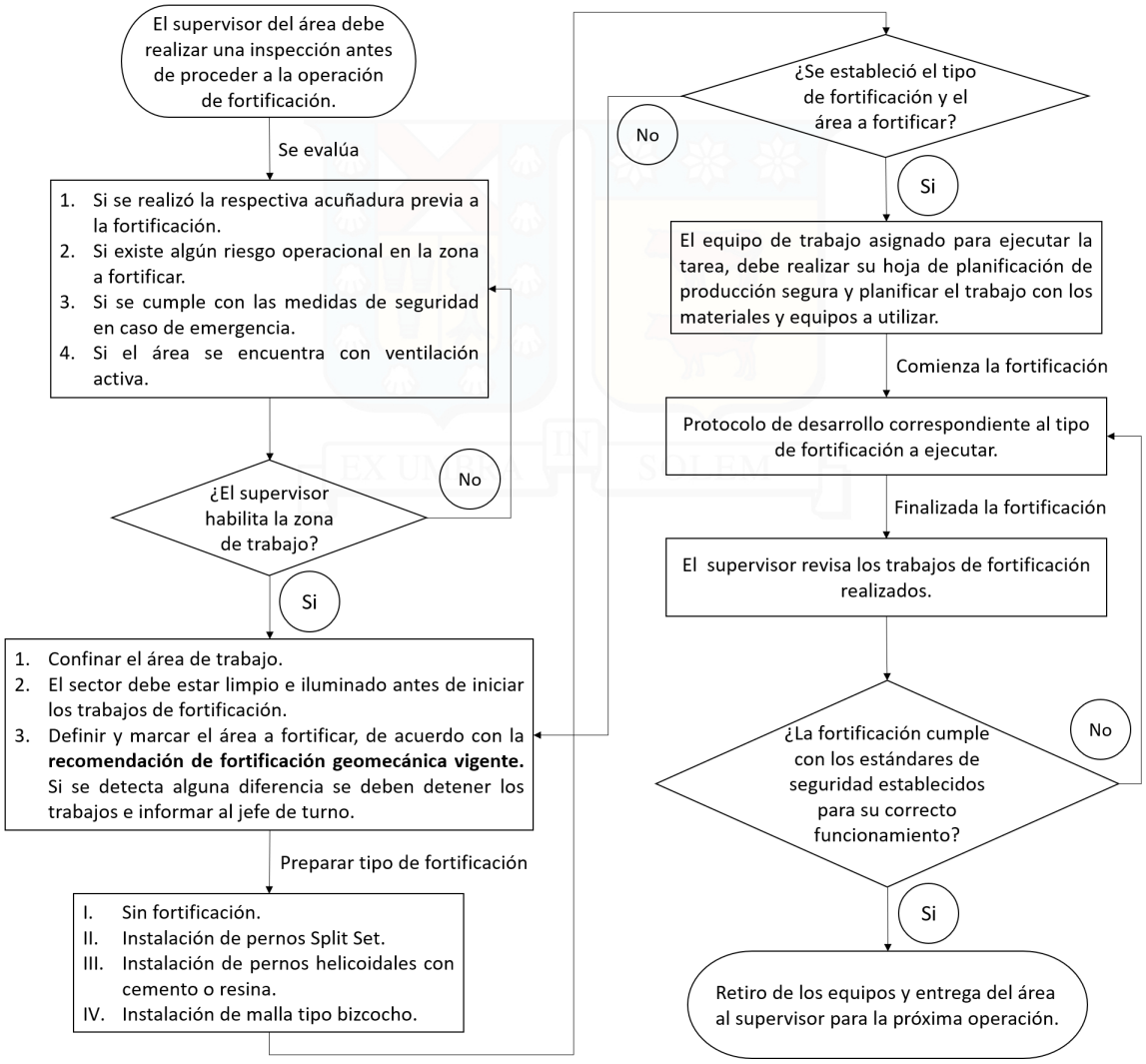


Figura 2.19: Flujograma de la operación de fortificación de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin.
(Fuente: Elaboración propia, desarrollado con el procedimiento de fortificación de la empresa Züblin.)

2.4.3. Operación de Perforación

La técnica de perforación tiene como finalidad realizar perforaciones en la roca, con la distribución y geometría adecuada dentro del macizo, donde se colocarán los explosivos o se implementará el sistema de fortificación requerido. Se basa generalmente en principios de percusión, rotación y rotopercusión, transfiriendo la energía por medio de las barras hacia la roca, efectuando el golpe y fricción que produce la trituración y astillamiento de la roca, y el fluido de barrido que efectúa la limpieza y retiro del detritus producido (Jimeno et al., 2003).

La perforación en roca puede ser manual o mecanizada dependiendo del equipo utilizado, pero en la

actualidad ha ido evolucionando considerablemente la forma de trabajo con la implementación de nuevas tecnologías de automatización, lo que permite una mayor eficiencia y exactitud en el trabajo realizado, logrando una máxima penetración con un menor costo.

Por otro lado, la operación de perforación se puede clasificar por el tipo de trabajo desarrollado, los cuales pueden ser:

A. **Perforación de banqueo:** método utilizado para la fragmentación de una gran cantidad de roca, la cual debe disponer de una frente o cara libre para la salida y proyección del material.

B. **Perforación de avance de galerías y túneles:** método utilizado para el desarrollo de galerías; debe contar con tiros huecos, utilizados como caras libres, y las demás perforaciones para el ingreso de las cargas de explosivos.

C. **Perforación de producción:** este término se utiliza generalmente para las explotaciones mineras subterráneas, en donde se procede con la extracción de mineral.

D. **Perforación de chimeneas:** corresponde a aquellas perforaciones verticales para abrir chimeneas, pero en la actualidad existe una tendencia a la aplicación del método Raise Boring.

E. **Perforación para el sostenimiento de roca:** corresponde a aquella perforación utilizada para la fortificación y la implementación de los variados elementos de fortificación, generalmente utilizado para la minería subterránea.

2.4.3.1. Perforación de Avance de Galerías y Túneles

En la actualidad, la operación de perforación se ha ido automatizando y desarrollando con equipos mecanizados “jumbos” electrohidráulicos, que tienen como mínimo entre 1 a 4 brazos, y cuyo sistema de potencia proviene de motores eléctricos, que permiten funcionar las bombas hidráulicas, accionando las perforadoras y alcanzando potencias que varían de 30 [Kw] a 70 [Kw]. La operación de perforación se realiza en húmedo o semi húmedo, producto de la calidad del aire y así minimizar el riesgo de enfermedades profesionales. También, la adición de agua permite la refrigeración de las barras y bit, un barrido de material molido y el sellado de las paredes del tiro, evitando el atascamiento de barras.

Dentro de las distintas características geomecánicas de la roca, que influyen en su perforabilidad, el parámetro más utilizado corresponde a la resistencia de compresión, ya que es decisivo para determinar el grado de facilidad de la roca a ser perforada. También, se considera la abrasividad de la roca, ya que es un parámetro que influye en el desgaste de la broca, por lo tanto, varia el resultado del diámetro final de la perforación. Para obtener un trabajo adecuado y óptimo del equipo se deben tomar las siguientes consideraciones:

- **Selección de aceros:** lo cual dependerá netamente del diámetro de la perforación, tipo de roca, tipo de perforadora y la rectitud de la perforación. Piezas claves para la perforación son: el culatín, barras, coplas, bit y corona escareadora.

- **Parámetros operacionales:** dentro de los parámetros a considerar mientras se realiza la perforación, tenemos el empuje, el cual debe ser el óptimo para sobrepasar la resistencia a la compresión que opone la roca, pero tampoco debe ser excesivo, ya que puede causar fallas en el sistema de perforación y también un desgaste más elevado de los bits. Otro parámetro importante a considerar son las revoluciones por minuto, puesto que debe ser el adecuado para no provocar un mayor desgaste de los elementos de perforación y mantener una buena relación con el empuje y la evacuación del detrito.
- **Fuentes de energía:** los equipos de perforación utilizados, que se disponen al interior de la mina CN, utilizan como fuente de alimentación un tablero eléctrico de jumbo (TEJ) con capacidad de 225 a 400 amperes, el cual suministra la energía para la operación de perforación, al igual que una red de agua para el correcto funcionamiento del equipo.

En la operación de perforación de avance realizada en la mina CN, los equipos operativos de perforación son los modelos Boomer 282, 282 S y M2C, son equipos electrohidráulicos autopropulsados con Diesel y con martillo de cabeza hidráulica, los que trabajan con aceite hidráulico entre 100 – 250 [bar] de presión. Su función es realizar las perforaciones establecidas previamente en el diagrama de disparo o diagramas de fortificación.



Figura 2.20: Perforación de frente con jumbo Boomer 282 y procedimiento de cambio de bit, en el orden mencionado.
(Fuente: Propia de las labores al interior de la mina Candelaria Norte.)

A continuación, en la Figura 2.21 se muestra el flujograma de los procedimientos establecidos para la ejecución de la operación de perforación de desarrollo.

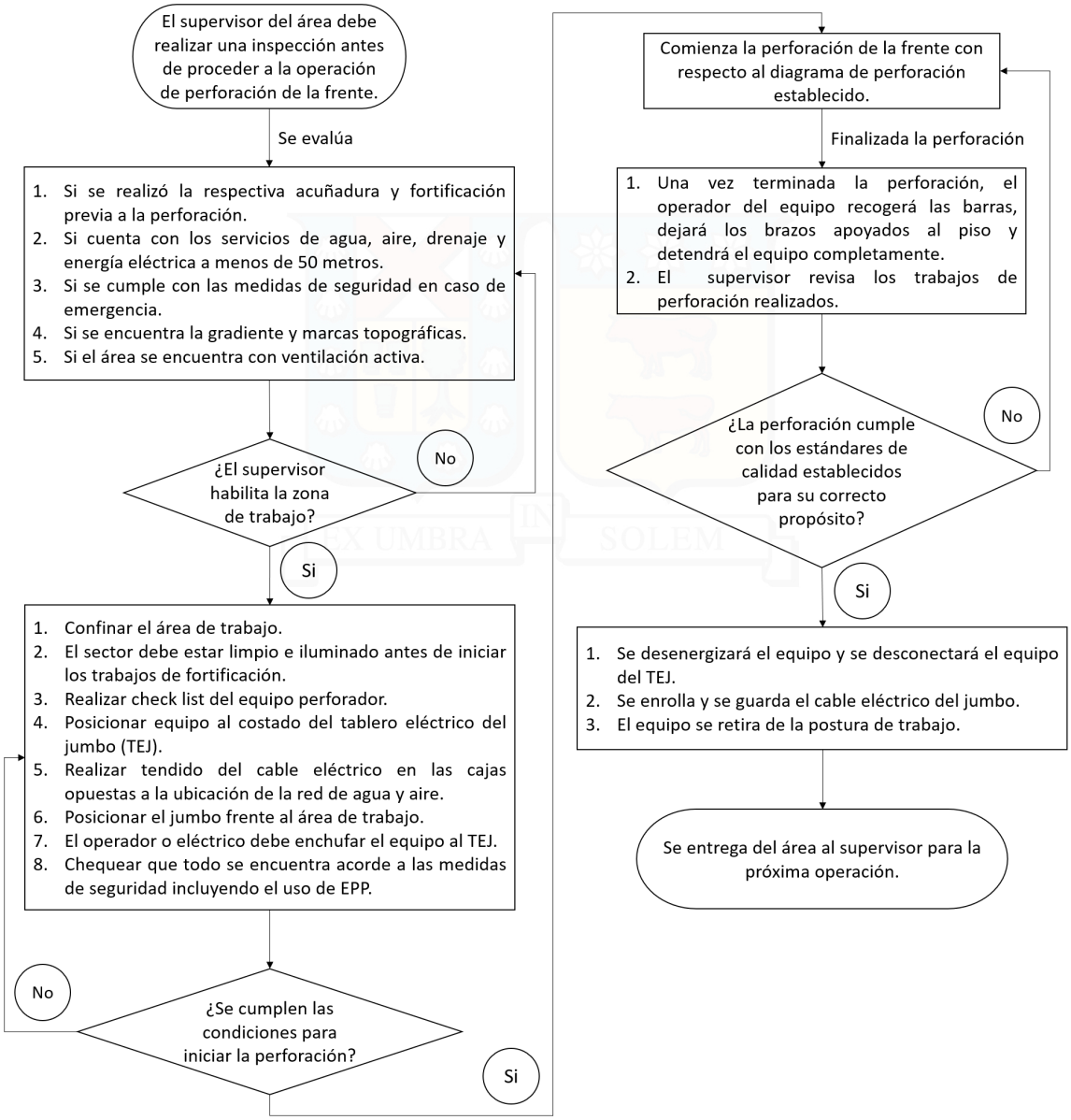


Figura 2.21: Flujograma de la operación de perforación de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin.
(Fuente: Elaboración propia, desarrollado con el procedimiento de perforación de la empresa Züblin.)

2.4.4. Operación de Carguío de Explosivos

El proceso de carguío de explosivos al interior de una mina subterránea consiste, como su nombre lo dice, en el carguío con explosivos de los tiros marcados en el diagrama de perforación. El objetivo principal de la utilización de explosivo en el arranque de roca es de disponer de una energía concentrada químicamente para la fragmentación del macizo rocoso. Es fundamental establecer las distintas zonas perforadas, como son la rainura, zapatera, caja, corona y auxiliares, ya que cada uno cuenta con una densidad de carga o tiempo de retardo distinto, y también puede variar el tipo de explosivo a utilizar, dependiendo de la necesidad rompedora de la zona a tronar.

Diagrama de disparo en túneles

Los diagramas corresponden a la disposición de las perforaciones en la frente del túnel, el orden de la detonación y la cantidad de explosivo, como se puede apreciar en la Figura 2.22. Para realizar la tronadura en los desarrollos horizontales, se utiliza un diagrama de disparo con una sola cara libre y para la segunda cara libre esta se incorpora en el diagrama por medio de los tiros huecos (Camhi, 2012).

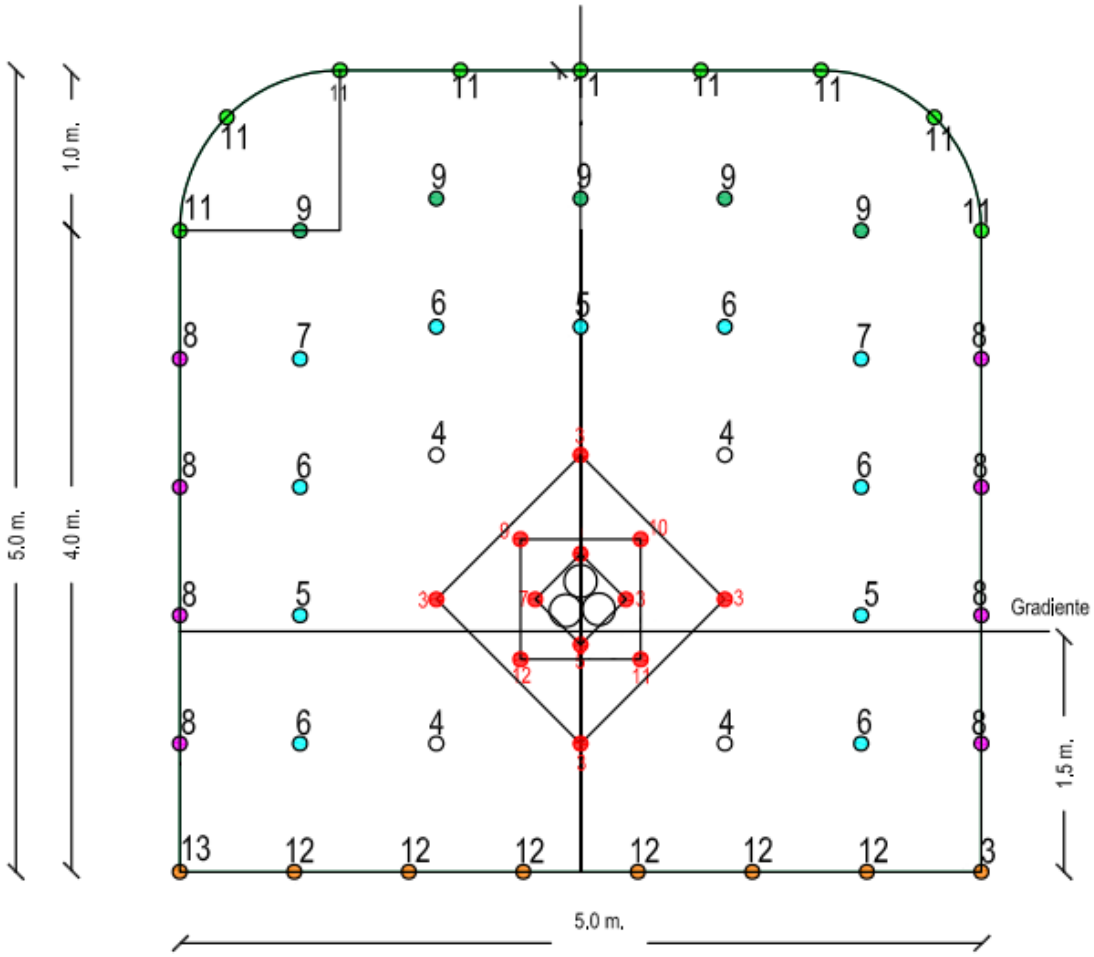


Figura 2.22: Diagrama de disparo utilizado en al interior de la mina CN.
(Fuente: Departamento de planificación e ingeniería, empresa Züblin.)

Para el desarrollo horizontal, el carguío de los tiros comienza con el cebado o prima, que corresponde al conjunto formado por un explosivo secundario (emulsión o dinamita) y un fulminante o Nonel que se inserta en él, cuya función es iniciar la detonación de la carga explosiva.

En términos generales, la empresa Züblin estableció un diseño único de diagramas de perforación de desarrollo, del tipo cuadrado, como el que se puede apreciar en la Figura 2.22, pero con cuatro dimensiones distintas: secciones de 5 x 4 [m], 5 x 5 [m], 5,5 x 5,5 [m] y 6 x 5,5 [m]. El diseño se generó a partir del equipo de extracción de mineral (equipo condicionante) y sus dimensiones cuadradas. Por privacidad de la empresa se borró el burden y espaciamiento de los diagramas.

Parámetros de los explosivos

Dentro de las propiedades y características de los explosivos, la selección del más idóneo será determinada por la necesidad para realizar el trabajo para el cual se necesita. Las características más representativas para escoger un explosivo son las siguientes (Bernaola Alonso et al., 2013):

- Potencia explosiva
- Poder rompedor
- Velocidad de detonación
- Densidad
- Resistencia al agua
- Calidad de humos
- Sensibilidad
- Estabilidad química

Daños por tronadura

La elección del explosivo más idóneo dependerá de las necesidades requeridas, la calidad del macizo rocoso y las condiciones existentes en el sector. Dentro del análisis realizado a la operación de tronadura, cabe evaluar los daños producto de dicha tronadura y ver posibles variaciones en la metodología.

El daño, producto de la tronadura, se analizará como cualquier deterioro de la resistencia del macizo rocoso, debido a la presencia de fracturas nuevas o extendidas, abertura, grietas o discontinuidades. Se puede analizar el daño inducido por la explosión (BID), que correspondería a la sobre excavación, como la rotura significativa del macizo rocoso, más allá del perímetro establecido en el diseño y dicho daño dependerá del nivel de energía que poseen. Esa cantidad de energía se puede calcular mediante análisis de velocidad, aceleración, frecuencia de vibraciones y desplazamiento. Variados autores relacionan directamente el BID con la velocidad máxima de partícula (PPV) (Onederra y Esen, 2004).

Normalmente se relaciona el PPV como una medida de intensidad de las vibraciones inducidas producto de la tronadura y la cual tiene una menor sensibilidad con respecto a cambios en las condiciones geológicas, siendo un parámetro más consistente y predecible para la estimación del daño producido en la roca. Generalmente, se utilizan geófonos que permiten medir las magnitudes de vibraciones. Son variados los autores que determinan distintos umbrales de daño para distintos tipos de rocas, basados en el PPV. Pero uno de los métodos más utilizados son las extrapolaciones basadas en el modelo de campo cercano, propuesto por Holmberg & Persson, como se puede apreciar en la Tabla 2.6. Cabe destacar que el modelo de Holmberg & Persson no incorpora ningún tiempo de retraso para la medición del PPV en un punto P, por lo tanto, el modelo no es capaz de proporcionar un análisis totalmente correcto en el campo cercano.

Umbral de daño	Criterio H&P
Dilatación de fracturas	$\frac{1}{4} \cdot PPV_{max}$
Aparición de nuevas grietas	$1 \cdot PPV_{max}$
Daño notorio y evidente	$4 \cdot PPV_{max}$
Trituración	$8 \cdot PPV_{max}$

Tabla 2.6: Supuestos de criterio de daño según el modelo de Holmberg & Persson.

A continuación, en la Figura 2.23 se muestra el flujograma de los procedimientos establecidos para la ejecución de la operación de carguío de explosivos de desarrollo.

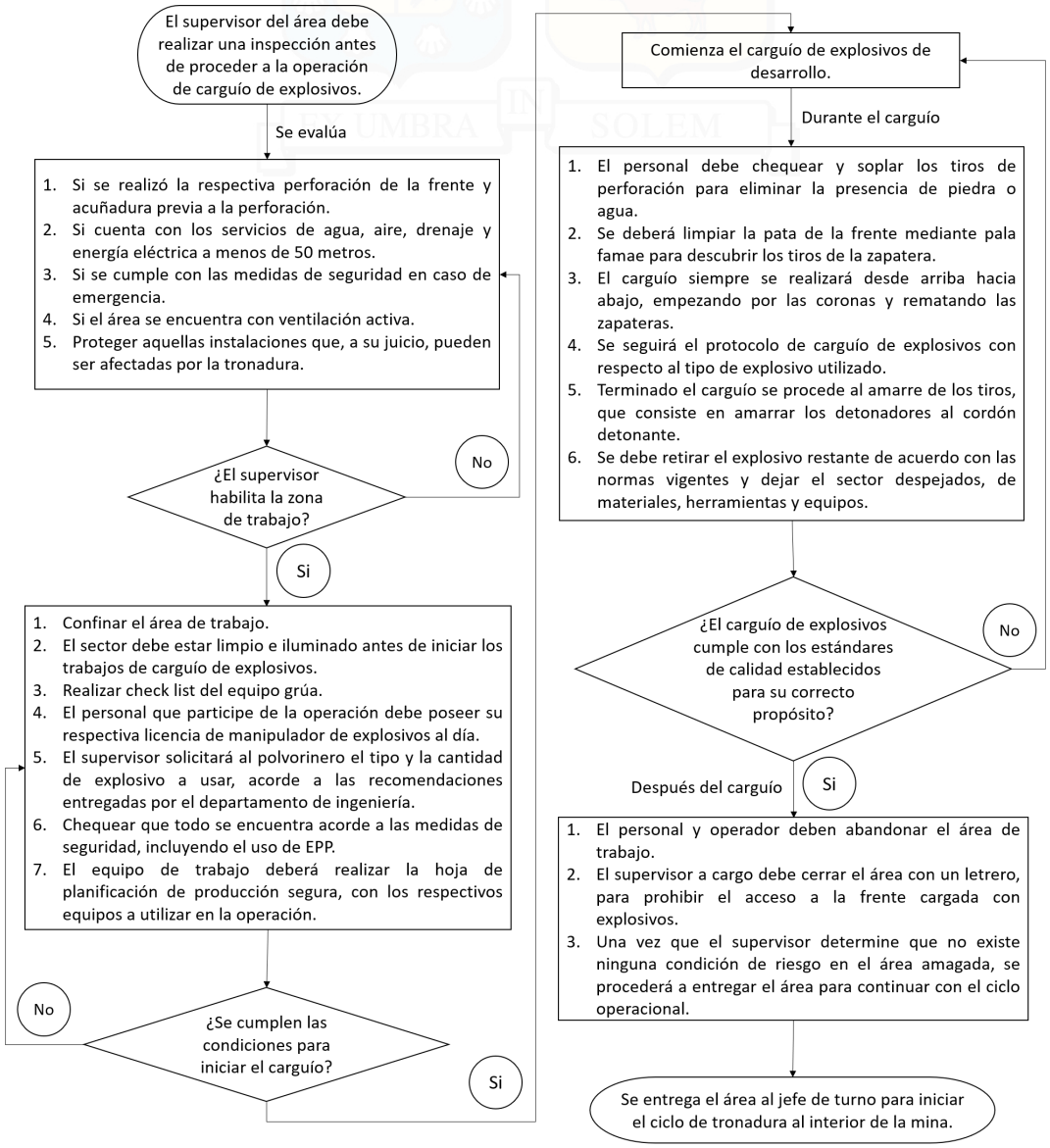


Figura 2.23: Flujograma de la operación de carguío de explosivos de desarrollo, respecto al procedimiento establecido por Züblin.

(Fuente: Elaboración propia, desarrollado con el procedimiento de perforación de la empresa Züblin.)

2.4.5. Operación de Limpieza de Frente

Esta operación no es obligatoria dentro del ciclo de desarrollo y solo se realiza cuando hay mucho material rocoso que impide el trabajo normal de las demás operaciones. Habitualmente se realiza después de la acuñadura post tronadura, debido a la gran cantidad de material rocoso que cae. También, se puede realizar después de la acuñadura post perforación de la frente, debido a la acumulación de material que precipita durante dichas operaciones.

Esta operación la puede realizar la retro excavadora o una pala frontal; la elección del equipo dependerá de la disponibilidad y de la cantidad de material a limpiar.

2.4.6. Operaciones de Carguío y Transporte

El carguío y transporte corresponde al movimiento del mineral o estéril previamente fragmentado en el proceso de tronadura. La operación de carguío consiste en cargar material mineralizado o estéril del yacimiento, para conducirlos a los posibles destinos, ya sea a camiones, punto de traspasos, stock de mineral, entre otros. Por otro lado, la operación de transporte consiste en el traslado de mineral o estéril desde el yacimiento hacia los posibles destinos de traspaso de material, zonas de acumulación o stock pile, generalmente, trasladarlo hacia el exterior de la mina subterránea.

La prioridad, rapidez y planificación de esta operación, radica principalmente en la naturaleza del material transportado, ya que se debe definir en primera instancia:

- El material rocoso corresponde a mineral o estéril, mediante una prueba de porcentaje de ley desarrollada por los geólogos, la cual determina si cuenta con ley suficiente de cobre para ser considerada mineral o de lo contrario, estéril.
- Se debe tener en cuenta la urgencia de avance de la galería, en donde se encuentra la marina, que impactará directamente en la rapidez y disposición de los equipos disponibles para extraer el material.
- Se considera dentro de la planificación y logística de la operación, la cantidad de equipos disponibles y su distribución al interior de la mina, lo cual permite tomar decisiones de la conveniencia en los puntos disponibles para extraer marina.

Dentro de este proceso, debe existir una planificación previa, para determinar las rutas de transporte óptimas, y así, no provocar interferencias en los procesos y determinar las rutas críticas para una mayor supervisión. Como ocurre al comienzo del desarrollo de cada mina, la limitación de frentes de trabajo y la coincidencia con las frentes de salida, impiden un trabajo expedito y continuo al interior de la mina, provocando interferencias inevitables, que solo se solucionan realizando una operación unitaria a la vez. Para los otros casos, en donde existen más rutas de salidas, se planificará la opción de distribuir las operaciones de tal forma, que no interfieran una de otras. En la mina CN, producto del método de explotación utilizado, no se concentran las operaciones en un solo punto, lo cual permite una holgura para realizar los trabajos de cada operación, sin entorpecer a las demás operaciones unitarias del ciclo.

Al interior de la mina CN, el proceso de carguío se efectúa con cargadores modelo Scoop ST-1030, que llevan el material a la zona de acopio para que, posteriormente, los cargadores Volvo L110F carguen directamente a los camiones convencionales Euro III, transportando el mineral al botadero de superficie o zona de acopio, donde finalmente se traspasa a los camiones de alto tonelaje CAT 793 por medio de palas eléctricas.

2.5. Sistema de Trabajo en Candelaria Norte

La mina CN depende de las variadas condiciones organizacionales y establecidas en el lugar de trabajo. Para el caso de la mina subterránea CN, se establecen horarios de trabajo de 12 horas por turno, por lo cual en un día de trabajo existen dos turnos distintos, denominados como el "turno A" -los que trabajan durante el día- y el "turno B", en la noche. Cabe señalar que solo se realiza la tronadura de frentes de desarrollo durante el cambio de turno, es decir, a las 08:00 o 20:00 horas.

2.5.1. Metodología del ciclo de P&T

La mina CN implementó el sistema de trabajo de 12 horas por turno y durante cada turno la asignación de las operaciones unitarias se realiza de la siguiente forma -corresponde a un ejemplo- para cumplir con el ciclo completo de P&T para una frente de trabajo:

Se disponen de 2 frentes de trabajo por cuadrilla[6]. En el turno A comienzan los trabajos de preparación desde la operación de acuñadura II[7], en la postura de trabajo denominada "Frente Nº1". Por otro lado, mientras se realiza dicha preparación de la Frente N°1 de trabajo, la segunda frente de trabajo denominada "Frente N°2" se encuentra ventilándose -puesto que en el cambio de turno se realizó una tronadura de desarrollo- para que luego se proceda a regar y sacar la marina de la Frente Nº2.

Ya finalizando el turno A, la Frente Nº1 debería encontrarse cargada con explosivos para realizar la tronadura durante el cambio de turno y la Frente Nº2, debería estar completamente limpia de marina. En la Tabla 2.7 se describen las operaciones realizadas en cada frente. El nombre y el orden de ejecución corresponde al diagrama de flujo visto con anterioridad, ver Figura 2.10.

[6]Se considera una cuadrilla de trabajo, al grupo de trabajadores necesarios para desarrollar un trabajo específico. Para cumplir con el ciclo de P&T se establece como mínimo en la mina subterránea Candelaria Norte una cuadrilla con 3 mineros, 1 operador de grúa, 1 operador de jumbo y 1 operador de scoop.

[7]La operación de "acuñadura II" corresponde a los trabajos de acuñadura que se realizan después de la operación de carguío y extracción de la marina. Más adelante se especificará su ubicación cronológica para el desarrollo de esta investigación.

	Frente 1	Frente 2
Turno A	Op. acuñadura II	Op. de ventilación
	Op. fortificación	Arremangar la marina
	Op. acuñadura III	Regado y Op. acuñadura I
	Op. perforación de frente	LHD saca marina
	Op. acuñadura IV	-
	Op. carguío de explosivos	-
Cambio de turno - Tronadura		
Turno B	Op. de ventilación	Op. acuñadura II
	Arremangar la marina	Op. fortificación
	Regado y Op. acuñadura I	Op. acuñadura III
	LHD saca marina	Op. perforación de frente
	-	Op. acuñadura IV
	-	Op. carguío de explosivos

Tabla 2.7: Metodología de trabajo actual de la mina CN, con 2 frentes simultáneas y los trabajos realizados durante el turno A y el turno B.

Así, el turno B comienza con la misma operación de acuñadura II en la Frente Nº2, que ya se encuentra limpia, mientras simultáneamente se realizan las operaciones de ventilación, regado y extracción de la marina en la frente de trabajo Nº1. Finalizando el turno B, ambas frentes de trabajo se encuentran en su estado inicial descrito al comienzo. De esta forma se cumple con un ciclo completo de minado. Cabe señalar que se estableció que aquella frente de trabajo que se encuentra en la fase de ventilación, regado y extracción de marina, no puede continuar con las siguientes operaciones unitarias -aunque exista disponibilidad de tiempo durante el turno- debido al sistema de distribución de recursos que se implementó al interior de la mina. La Figura A.2 y Figura A.3 muestran el mismo método descrito, pero de forma más gráfica.

Para el caso descrito como ejemplo anteriormente, en la Tabla 2.7, ambas frentes N°1 y N°2 comienzan los trabajos al inicio del turno, pero son trabajos independientes uno del otro. Por consiguiente, una cuadrilla de trabajo puede realizar el ciclo completo de minado en un día, considerando que durante dicho día trabajan dos turnos. Así, una cuadrilla de trabajo por turno puede finalizar el ciclo completo de desarrollo de dos frentes de trabajo en un día. Por último, se puede apreciar que la asignación de recursos es de forma cíclica y agrupadas solo en dos frentes de trabajo, que realizan distintas fases del ciclo de minado.

2.6. Índices Operacionales

Para poder desarrollar un diagnóstico al interior de la mina Candelaria Norte se utilizarán variados índices operacionales, para lograr medir la efectividad de los procesos existentes.

Los índices operacionales tienen como objetivo identificar el estado del sistema utilizado, comparar el diseño y operaciones, y así optimizar los procesos, aumentando la productividad en la operación. Para esto se utilizan los distintos parámetros de tiempo, tales como los que aparecen en la Figura 2.24.

Los indicadores que se muestran a continuación corresponden a los Key Performance Indicator (KPIs), lo cuales son variables que intentan medir de una u otra forma los objetivos estratégicos establecidos por planificación. Cada indicador está asociado a una meta, la que corresponde al valor que debe alcanzar dicho indicador en un determinado tiempo.

- **Tiempo cronológico (T_c):** corresponde al tiempo reloj total del período a considerar.
- **Tiempo disponible (T_d):** corresponde al tiempo nominal, descontando el tiempo empleado en los eventos de mantenimiento.
- **Tiempo operativo (T_{op}):** corresponde al tiempo disponible, descontando las horas de reservas, incluyendo la presencia o ausencia del operador.
- **Tiempo efectivo (T_{ef}):** corresponde al tiempo operativo, descontando las demoras o pérdidas operacionales.
- **Mantenimiento (M):** se define a las ocasiones en las cuales se detiene el equipo para realizar sus respectivas mantenciones, las cuales pueden ser:
  - **Mantenciones programadas (M_p):** se realizan de acuerdo con un programa de mantenimiento preestablecido.
  - **Mantenciones por falla (M_{np}):** detenciones imprevistas no contempladas en los programas de mantenimiento.

  La suma de ambos tiempos dan como resultado el tiempo de mantenimiento total.
- **Reservas (R):** corresponde al tiempo de detención, debido a una decisión operativa de los equipos que están disponibles mecánicamente. Esta detención puede ser resultado de variadas situaciones que se controlan o se tienen contempladas, a modo de ejemplo la falta de operador.
- **Demoras (D):** corresponde a la pérdida de tiempo, causada por eventos operacionales que demoran más de lo normal o también, a eventos operacionales necesarios en los cuales no hay producción. Se clasifican de la siguiente forma:
  - **Demoras programadas (D_p):** corresponde al tiempo en que el equipo está detenido -motor apagado- por tareas programadas, por ejemplo colación o entrada y salida de turno.
  - **Demoras no programadas (D_{np}):** corresponde al tiempo en que el equipo está detenido por tareas no programadas y que no entregan un beneficio directo, como puede ser la limpieza del equipo, abastecimiento de petróleo o agua, operador en espera de instrucción, despeje por tronadura, charlas de seguridad puntuales, entre otras.

Con respecto a cada una de estas medidas se pueden determinar variados índices e indicadores de parámetros, relevantes para el diagnóstico al interior de la mina, como son las siguientes:

- **Disponibilidad mecánica:**

$$D_{mecánica} = \frac{T_d}{T_c} \times 100 \tag{2.4}$$

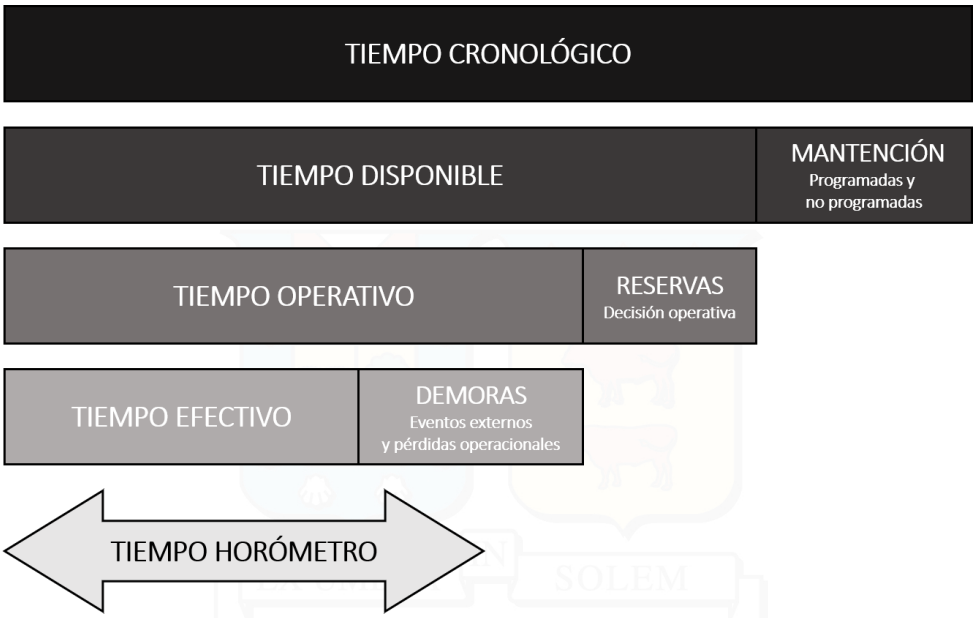


Figura 2.24: Parámetros de los usos de tiempos.
(Fuente: Elaboración propia por medio del software PowerPoint.)

- **Tiempo medio entre fallas:**

$$T_{medio\ entre\ fallas} = \frac{T_{op}}{N°\ mantención\ por\ falla} \tag{2.5}$$

- **Tiempo medio para reparar:**

$$T_{medio\ para\ reparar} = \frac{M_{np}}{N°\ mantención\ por\ falla} \tag{2.6}$$

- **Tiempo medio para fallar:** este indicador se aplica a los equipos que no son reparados y cuando fallan son sustituidos por uno nuevo: su tiempo de reparación es cero.

$$T_{medioparafallar} = \frac{T_{op}}{N°\ mantención\ por\ falla} \tag{2.7}$$

- **Utilización:** el uso de la disponibilidad mide el impacto del tiempo en reserva.

$$Utilización = \frac{T_{op}}{T_d} \times 100 \tag{2.8}$$

- **Factor operacional:** el factor operacional mide el impacto del tiempo en demoras.

$$Factor\ operacional = \frac{T_{ef}}{T_{op}} \times 100 \tag{2.9}$$

- **Índice de mantenimiento:**

$$Índice\ de\ mantenimiento = \frac{T_{op}}{M} \tag{2.10}$$

- **Rendimiento operacional:**

$$Rendimiento\ operacional = \frac{Unidades\ de\ producción}{T_{op}} \tag{2.11}$$

- **Rendimiento efectivo:**

$$Rendimiento\ efectivo = \frac{Unidades\ de\ producción}{T_{ef}} \tag{2.12}$$

- **Pérdidas operacionales totales:**

$$Pérdidas\ operacionales\ totales = \frac{T_{op}}{D} \tag{2.13}$$

Estos indicadores, nos permiten establecer valores tangibles, de cómo se están desarrollando las operaciones al interior de la mina y tomar las medidas correctivas, para mejorar la eficiencia de estas.

2.7. Compilación Bibliográfica

Con la intención de generar una base teórica y técnica para el caso de estudio, a continuación, se presenta una breve compilación bibliográfica, enfocada en la búsqueda de estrategias de mejora, como es la optimización en la forma de distribución de las operaciones unitarias para el desarrollo horizontal. Por consiguiente, se muestran algunos documentos que servirán como apoyo para el desarrollo de la memoria y sentar las bases para la elaboración de la simulación.

Métodos Y Modelos de investigación de operaciones

Parte del objetivo general es proponer una estrategia de mejora; dicha propuesta se enfoca en optimizar la forma de distribución de los recursos disponibles. Es (Witenberg, 1999), en el libro “Métodos y modelos de investigación de operaciones”, que realiza un análisis de la teoría de toma de decisiones, con la finalidad de generar un modelo óptimo con respecto a las condiciones establecidas en el sistema. Los beneficios que trae consigo realizar una investigación y diagnóstico de las operaciones de un sistema, siguiendo dicha teoría, son los siguientes:

- **Incrementa la posibilidad de tomar mejores decisiones:** generalmente las decisiones se toman de forma intuitiva, ignorando la mayoría de las interrelaciones que existen entre los componentes del sistema, por lo tanto, teniendo un diagnóstico completo de la forma de trabajo, aumentan considerablemente las posibilidades de tomar la decisión correcta.

- **Mejora la coordinación entre los múltiples componentes del sistema:** en otras palabras, la investigación de las operaciones genera un mayor nivel de ordenación.
- **Mejora el control del sistema:** al instituir procedimientos sistemáticos, se supervisan, por un lado, las operaciones que se llevan a cabo en la organización y por el otro, se evita el regreso de un sistema peor.

Según (Ackoff, 1956), en el libro "The development of operations research as a science", considera que las fases de un proyecto de investigación de operaciones son las siguientes:

1. Estudio de la organización
2. Interpretación de la organización como un sistema
3. Formulación de los problemas de la organización
4. Construcción de modelo
5. Derivación de soluciones del modelo
6. Prueba del modelo y sus soluciones
7. Diseño de controles asociados a las soluciones
8. Implantación de las soluciones al sistema

La dificultad principal para realizar un modelo de agendamiento de actividades es encontrar la mejor combinatoria de las variables y asignar, de forma factible, los recursos disponibles para desarrollar las operaciones en el transcurso de un turno de trabajo.

Programación lineal aplicada a la minería

En la actualidad, es cada vez más común utilizar la programación lineal como técnica de modelamiento, la cual tiene como objetivo optimizar la utilización de recursos limitados, predecir el comportamiento de distintas variables relacionadas a un proceso, entre otros. Se basa en la maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables, la cual se encuentra sujeta a restricciones propias del entorno a modelar. En este estudio, se analizará el uso o no, de la programación lineal, para evaluar alternativas de asignación y optimizar el uso de recursos.

Un problema de programación lineal debe tener como elementos básicos los siguientes:

- **Variable:** lo que se busca determinar.
- **Objetivo:** lo que se busca optimizar.
- **Restricciones:** lo que se debe cumplir.

En situaciones reales, el analista se enfrenta a "decisiones sí o no", las que pueden ser representadas con variables binarias [0 ,1] propias de las tomas de decisiones. Para el presente estudio se podría utilizar

una función objetivo, para maximizar la asignación de recursos y establecer las condiciones para tomar las decisiones. La fórmula general de la función de objetivos es la siguiente:

$$max! = \sum_{i=1}^{N} f_i \times X_i$$

En donde:

X : son las incógnitas, de 1 a N.

f_i : coeficientes.

Y un problema se puede generalizar según la siguiente ecuación:

$$maxZ = c^T x$$

$$s.a = \begin{cases} Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{cases}$$

En donde:

A : es una matriz de mxn

c, x, b : pertenecen a los reales.

Filosofía Lean

Dentro de la compilación bibliográfica hay estudios con enfoques asociados a mejorar la preparación minera, como es el siguiente caso: "Aplicación de la filosofía Lean en la preparación minera, mina El Teniente de Codelco Chile" (Barrios y Henry, 2017), que si bien no realiza una programación lineal, realiza un diagnóstico de los tiempos requeridos para las operaciones unitarias en los desarrollos horizontales, basándose en la aplicación del Mapeo de Cadena de Valor (MCV). Esta metodología realiza una recopilación de datos en terreno, identificando el procedimiento completo para desarrollar una actividad. Permite implementar indicadores específicos, para identificar aquellas actividades que disminuyen el rendimiento durante una operación. Con el MCV se puede elaborar un diagnóstico certero y acabado del estado actual de una producción, permitiendo desarrollar propuestas de mejoras, mucho más certeras y específicas.

La utilización del MCV es propia de la filosofía Lean, la cual define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción, focalizándose en lograr identificar y eliminar todo tipo de desperdicios, definiendo como desperdicios a aquellos procesos o actividades que requieren un mayor uso de los recursos estrictamente necesarios (Toledano de Diego et al., 2009).

Diego de Toledano resume la filosofía Lean en 14 principios:

1. Base sus decisiones de gestión en una filosofía a largo plazo, a expensas de lo que suceda con los objetivos financieros a corto plazo.
2. Cree procesos en flujo continuo para hacer que los problemas salgan a la superficie.
3. Utilice sistemas PULL (tirar) para evitar producir en exceso.
4. Nivele la carga de trabajo (HEIJUNKA).
5. Cree una cultura de parar a fin de resolver los problemas, para lograr una buena calidad a la primera.
6. Las tareas estandarizadas son el fundamento de la mejora continua y de la autonomía del empleado.
7. Utilice el control visual de modo que no se oculten los problemas.
8. Utilice sólo tecnología fiable, absolutamente probada, que dé servicio a su personal y a sus procesos.
9. Haga crecer a líderes que comprendan perfectamente el trabajo, vivan la filosofía y la enseñen a otros.
10. Desarrolle personas y equipos excepcionales que sigan la filosofía de su empresa.
11. Respete a su red extendida de socios y proveedores, desafiándoles y ayudándoles a mejorar.
12. Vaya a verlo por sí mismo para comprender a fondo la situación (GEN-CHI GENBUTSU).
13. Tome decisiones por consenso lentamente, considerando concienzudamente todas las opciones; impleméntelas rápidamente.
14. Conviértase en una organización que aprende mediante la reflexión constante (HANSEI) y la mejora continua (KAIZEN).

La aplicación más relevante de la filosófica Lean corresponde al uso del mapeo de cadena de valor, como herramienta de diagnóstico de un proceso para entender e identificar los desperdicios. Su aplicación radica en el uso de un diagrama de flujo, mostrando detalladamente los flujos de ingreso y salida, con la finalidad de encontrar las ventajas competitivas y aquellos desperdicios del sistema.

Metodología de Asignación de Recursos

El siguiente caso en estudio se denomina "Metodología de asignación de recursos en desarrollos de minería subterránea" de (Lavado, 2014), cuyo objetivo se enfoca en desarrollar un algoritmo de asignación de cuadrillas y equipos a las frentes de trabajo, para minimizar las pérdidas operacionales del turno, utilizando la función objetivo, determinando la forma de diagnosticar los patrones de trabajos actuales y la manera de identificar las causas principales de pérdidas operacionales.

Se observa otra metodología de diagnóstico para las operaciones unitarias y el proceso utilizado para la validación de datos, ya que el comportamiento en el tiempo de duración de cada operación tiene un alto nivel de variabilidad; esto, debido a la alta complejidad del entorno y el bajo porcentaje de confiabilidad del trabajo con los equipos mineros. Los resultados permiten alcanzar mejoras de hasta un 65 % sobre la gestión realizada en el caso de estudio, sin la necesidad de adicionar recursos. Además, se puede recuperar cerca de un 10 % del tiempo útil del ciclo si se sistematiza la asignación de recursos. Los resultados son categóricos para establecer una propuesta de mejora, que impacte de forma significativa la productividad en una mina.

Por último, un estudio similar denominado "Programación multicriterio de excavaciones horizontales en el corto plazo" de (Toro Vega, 2017), propone un modelo conceptual de optimización, que permite generar de manera automática un programa de actividades horizontales, incorporando diferentes variables de entradas, como son las actividades del ciclo de avance, su duración estimada, el número de equipos disponibles y el número de frentes a desarrollar. Se obtiene, como resultado, una ventaja con respecto a la programación de actividades manuales, minimizando la suma de tiempos de desarrollo de frentes y maximizando la utilización de equipos.

3 | Metodología

El siguiente capítulo presenta la metodología de trabajo utilizada en la investigación, para generar el diagnóstico de las actividades desarrolladas en terreno, realizar su respectivo análisis y plantear las propuestas de mejora. Se determinarán los datos necesarios, para evaluar las condiciones actuales de los trabajos realizados al interior de la mina subterránea, y así, detectar debilidades o interferencias que impactan directamente en la continuidad del proceso.

A continuación, se establece la secuencia de trabajo para desarrollar la investigación y cumplir de forma cabal con los objetivos.

3.1. Etapa de Registro y Recopilación de Información

Para lograr establecer propuestas de mejoras, se debe examinar la forma de trabajo en terreno y la logística implementada al interior de la mina subterránea. Además de cuantificar aquellas variables que afectan directamente el ciclo de desarrollo horizontal. Para esto, se seguirá la siguiente secuencia de desarrollo en la etapa de registro y recopilación de información:

1. **Inspección en terreno del desarrollo completo de un turno de trabajo:** la finalidad es presenciar en terreno y junto a los trabajadores, todas las actividades que deben realizar para completar cada una de las operaciones unitarias, desde que ingresan a la mina hasta que salen del turno. Las actividades deben ser registradas.

2. **Formular la secuencia y metodología de trabajo:** la finalidad es establecer, cual es la metodología de trabajo utilizada y corroborarla con el flujograma establecido por la empresa. Además, determinar el orden de las distintas actividades involucradas en el desarrollo horizontal, previamente registradas.

3. **Registrar el tiempo de duración de las actividades:** una vez obtenida la secuencia de trabajo, se deberá registrar la mayor cantidad de datos de duración de cada labor, para determinar un tiempo estimado por cada una de las actividades y así, obtener un valor representativo para posteriores análisis.

4. **Registrar condicionantes para cada uno de los turnos:** la finalidad es obtener las condicionantes que afectan de forma constante o permanente, el desarrollo normal de un turno, para que sean consideradas en los análisis posteriores y así, elegir el posible escenario a simular, para obtener un resultado más representativo y conforme a la realidad.

Esta supervisión en terreno tendrá como finalidad: corroborar la información que se maneja en el Departamento de Ingeniería y Planificación, obtener una amplia recopilación de valores de tiempo para cada actividad presenciada, y registrar aquellas interferencias o condicionantes que servirán como criterios y restricciones para la simulación.

3.2. Etapa de Desarrollo y Diagnóstico

Esta etapa tiene como finalidad trabajar con los registros obtenidos de la etapa anterior y discriminar los datos útiles y necesarios para utilizar a futuro. Por lo tanto, se sentarán las bases para los análisis posteriores, ejecutándose los siguientes trabajos:

1. **Proceso de validación de datos:** se deberá realizar un proceso de validación de datos de cada conjunto de valores registrados para cada actividad. La finalidad es establecer el tipo de distribución de dichos datos y a través de estadística descriptiva obtener aquel valor más representativo para el uso de la simulación.

2. **Detalle de las actividades de un turno:** se realizará un desglose cronológico de todas las actividades involucradas en el desarrollo del ciclo de P&T, con el tiempo de duración estimado para cada una.

3. **Definir las interferencias:** se establecerán aquellas actividades que no son consideradas operaciones unitarias como interferencias del proceso; se reagruparán y se precisará su respectiva duración.

Una vez definidos los valores a utilizar y organizada la información, se procederá a desarrollar los criterios implementados para ejecutar la simulación.

3.3. Etapa de Simulación

La siguiente etapa, tiene como objetivo determinar las variables principales a utilizar para el desarrollo del modelo, con sus respectivos criterios; presentar la función que cumplirá la simulación, el tipo de metodología de asignación de recursos y los resultados obtenidos de la simulación.

1. **Tipo de metodología:** la finalidad es explicar la diferencia entre la metodología de asignación de recursos propuesta, en comparación con la metodología actual, para entender los distintos criterios y el objetivo que cumple la simulación.

2. **Establecer parámetros iniciales:** describir los parámetros de mayor importancia dentro de la simulación, para entender aquellas variables y su función dentro del modelo.

3. **Definir las restricciones:** consiste en establecer las variadas restricciones o condiciones, establecidas con anterioridad, y ajustarlas al modelo de la simulación.

4. **Simulación de las propuestas:** mostrar los resultados obtenidos de cada simulación y realizar comparaciones de beneficios, con respecto a la metodología actual.

4 | Desarrollo de la Metodología

El siguiente capítulo muestra los datos obtenidos de la inspección en terreno, el desarrollo, los análisis y la simulación -siguiendo el orden establecido en la metodología- con la finalidad de cumplir con los objetivos de la investigación.

4.1. Etapa de Registro y Recopilación de Información en CN

El proceso de registro y recopilación de datos en terreno, se llevó a cabo al interior de la mina subterránea Candelaria Norte, durante 28 días de trabajo en total, equivalente a 4 turnos, de horarios 7x7, o aproximadamente 336 horas en terreno, considerando que se tomaron valores tanto en el turno A como en el turno B.

La inspección se realizó siguiendo la rutina del turno, junto a los trabajadores: se registró un desglose total de 20 actividades de desarrollo durante un turno, que se detallaran más adelante. También, se estableció la secuencia de las operaciones unitarias ejecutadas en terreno, en donde existe una discrepancia con respecto al diagrama de flujo presentado en el Capítulo de Antecedentes (ver Figura 2.10). Debido a la falta de información y actualización de los procedimientos de seguridad, se trabaja actualmente con la siguiente metodología en terreno, la cual incluye todas las operaciones involucradas al interior de la mina subterránea Candelaria Norte, ver Figura 4.1.

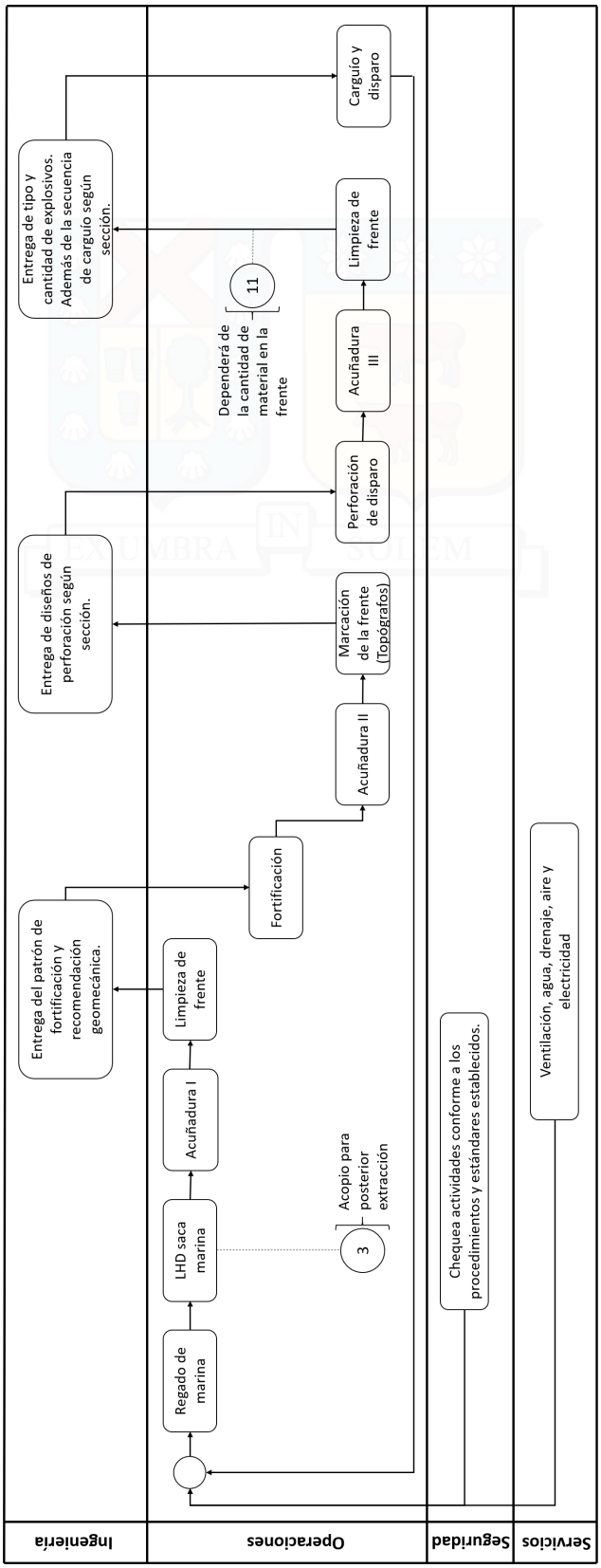


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la operación de desarrollo (disparo de avance), utilizado en terreno por la mina CN.
(Fuente: Elaboración propia por medio del software PowerPoint.)

En el desarrollo de esta investigación se utilizará el diagrama de flujo mostrado anteriormente (Figura 4.1), para los análisis posteriores y elaboración de la simulación.

A continuación, se presentan las Tabla 4.1 y Tabla 4.2. Las cuales se dividen en dos columnas principales, la primera corresponde a las actividades ejecutadas en orden cronológico y la segunda se subdivide en varias columnas, cada una con el registro del tiempo de duración por actividad, cada uno de estos valores corresponde a una medición, que fue tomada durante el proceso de recopilación de información en terreno.

Tipo de actividad	Registro de datos [min]						
1. Preparación para el inicio de turno	15	16,5	16,9	17	17	17,5	18
2. Traslado - Patio Dique al barrio cívico	28	28,3	28,5	29	29	30	31
3. Espera de Charla	13	14	14	14,5	15,5	15,5	17
4. Charla	17	18	19	19,5	20	20,5	20,5
5. Traslado de las cuadrillas a las posturas	18	18,5	19	20	21	21	22
6. Chequeo de postura y llenado de PPS	17,5	18,5	19	21,5	22	22	-
7. Preparación para la acuñadura I	8	9	9,5	10,5	11	11,5	12
8. Operación de acuñadura I	48	50	52,5	54	57	58	59
9. Limpieza de frente	9,8	10,5	10,5	11,3	12,6	12,8	16,3
10. Preparación para la fortificación	12,5	12,6	13	13,5	15,3	16	17,5
11. Operación de fortificación (fort. base)	46,3	47,2	49,2	50,3	51	52	52,1
12. Preparación y marcación de la frente	24,5	24,5	25,8	26,7	27	28,6	33
13. Operación de acuñadura II	15	15,5	16,5	16,5	17	18	19,5
14. Operación de perforación de frente	101,5	106,5	108	108,9	110	111,5	114,5
15. Preparación para la acuñadura III	13,4	14,8	15,2	15,5	16,3	16,4	18,5
16. Operación de acuñadura III	15,4	15,6	17	17,9	18	19,7	22,2
17. Limpieza de frente	10,5	12,4	13	14,5	14,6	15	18
18. Preparación del proceso de carguío	17,9	18,4	18,5	18,7	19,5	19,5	21,5
19. Operación de carguío de explosivos	65	69,5	72,6	73,5	74	74,2	76
20. Finalización - Traslado al cívico	7,5	8,5	9,1	11,5	12	13	13,8

Tabla 4.1: Mediciones en minutos para la ejecución según el tipo de actividad, registrados en terreno.

Cabe señalar que, durante el proceso de inspección y registro de valores, no siempre era necesaria la ejecución de las 20 actividades, puesto que, existían escenarios en que había operaciones que se eliminaban del ciclo, ya que no era necesaria su ejecución, como por ejemplo la limpieza de la frente. Pero de todas formas, para el desarrollo del estudio se consideró como ejemplo el peor escenario -las 20 actividades- con la finalidad de no sobrestimar los resultados.

También, cabe destacar que producto de la dificultad para permanecer en los lugares de trabajo, se obtiene un base de datos de máximo 15 valores por actividad, ya que se establece como condición, estar presente antes de comenzar cada operación y hasta la finalización de aquella.

Tipo de actividad	Registro de datos [min]						
1. Preparación para el inicio de turno	-	-	-	-	-	-	-
2. Traslado - Patio Dique al barrio cívico	32	33	-	-	-	-	-
3. Espera de Charla	-	-	-	-	-	-	-
4. Charla	21	-	-	-	-	-	-
5. Traslado de las cuadrillas a las posturas	25	-	-	-	-	-	-
6. Chequeo de postura y llenado de PPS	-	-	-	-	-	-	-
7. Preparación para la acuñadura I	-	-	-	-	-	-	-
8. Operación de acuñadura I	60	64	-	-	-	-	-
9. Limpieza de frente	17	17,3	17,5	18,4	19,5	25	-
10. Preparación para la fortificación	-	-	-	-	-	-	-
11. Operación de fortificación (fort. base)	53,5	55,5	60,5	-	-	-	-
12. Preparación y marcación de la frente	35,5	37,2	-	-	-	-	-
13. Operación de acuñadura II	20,4	22	-	-	-	-	-
14. Operación de perforación de frente	116	117,2	118,5	120,4	122,5	125	127
15. Preparación para la acuñadura III	19,1	-	-	-	-	-	-
16. Operación de acuñadura III	-	-	-	-	-	-	-
17. Limpieza de frente	18,5	19	-	-	-	-	-
18. Preparación del proceso de carguío	22	22,3	22,5	-	-	-	-
19. Operación de carguío de explosivos	78,5	80,4	81	81,2	-	-	-
20. Finalización - Traslado al cívico	14	14,2	14,5	-	-	-	-

Tabla 4.2: Mediciones en minutos para la ejecución según el tipo de actividad, registrados en terreno.

Por último, en la etapa de recopilación de información en terreno, se registraron las distintas condicionantes e interferencias que deben ser analizadas, para así obtener resultados más representativos en la simulación. Estas condicionantes fueron las siguientes:

- Solo durante los turnos de día “turno A” se realiza una tronadura de superficie, que obliga a paralizar los trabajos al interior de la mina subterránea y evacuar a los trabajadores al barrio cívico de la mina subterránea, o en casos extremos evacuar a la superficie. Las tronaduras se realizan a las 14:00 horas. Por esta razón, se paralizan los trabajos a las 13:25 horas, para comenzar la evacuación a las 13:30 horas en dirección al barrio cívico y retomar dichos trabajos a las 14:30 horas, aproximadamente, posterior a la autorización de la empresa mandante. Cabe señalar que la tronadura de superficie no se realiza todos los días, su frecuencia varía entre 3 a 5 veces a la semana.

- Se registró una alta frecuencia de falla de los equipos de perforación, lo cual es considerado una interferencia en el desarrollo normal del ciclo de P&T y que para efectos de la simulación no se tomará en cuenta, pero sí se realizará un análisis de dicha operación para determinar la causa principal de dichas fallas.

- Los trabajadores tienen 1 hora de almuerzo durante el turno, la cual se aprovecha generalmente en los turnos A, mientras se realiza la operación de tronadura de superficie. Cuando no hay tronadura se

realiza una rotación de personal para almorzar, con la finalidad de no parar los trabajos y permitir que los trabajadores cumplan con su respectivo horario de alimentación. Por lo tanto, dicha condicionante no se tomará en cuenta para la simulación.

- Tampoco se considerarán aquellas interrupciones por parte de los prevencionistas de riesgo, producto del no cumplimiento de las medidas de seguridad de trabajo por parte de los mineros. Este valor se desprecia por su baja frecuencia: solo se registraron 3 casos durante el desarrollo total del diagnóstico.

Cabe recordar, cómo se mencionó en los alcances del estudio, que las operaciones de ventilación, carguío y extracción de marina no serán utilizadas para efectos de la simulación. Puesto que, por procedimientos de seguridad no se logró establecer un tiempo representativo para cada operación y, además, producto de la metodología de trabajo establecida por la empresa Züblin (ver sección de Antecedente) no son necesarias para el análisis y simulación, ya que el enfoque del estudio es otro.

Finalmente, con los registros obtenidos de la etapa de registro y recopilación de información, se procede a la siguiente etapa de desarrollo.

4.2. Etapa de Desarrollo y Diagnóstico en Candelaria Norte

En la etapa de desarrollo y diagnóstico se procederá a la validación de datos, con respecto a las mediciones registrados para cada actividad. De manera que, se utilizaron los valores registrados en las Tabla 4.1 y Tabla 4.2, lo cuales abarcan grupos de datos por tipo de actividad, que varían entre 7 a 14 mediciones. Estas diferencias en las cantidades de datos, es producto de la dificultad para permanecer en terreno mientras se ejecutaban dichas actividades.

En primer lugar, se identificaron las muestras como variables continuas, producto de su condición de medidas registradas en terreno y se sometieron los datos a un análisis de estadística descriptiva, utilizando el software IBM SPSS Statistics[8].

Así, se obtiene como resultado los valores estadísticos registrados en las Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5, los cuales muestran, entre otros resultados, los valores de los coeficientes de asimetría y curtosis, que en primera instancia revelan una tendencia normal de los datos, no obstante, se verifican dichos resultados sometiendo los datos a la prueba de normalidad de Shapiro Wilk[9] para cada una de las actividades. La prueba de normalidad de Shapiro Wilk tiene como finalidad rechazar o no la hipótesis nula de que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, tomando un valor Alpha o de significancia del 0,05. Los valores obtenidos de la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, para cada actividad, se pueden ver en las Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5.

Con respecto a dichas tablas, se puede apreciar, que la primera columna corresponde al descriptivo estadístico a evaluar de los datos y las demás columnas son las actividades enumeradas de 1 al 20, con respecto al orden cronológico establecido de la Tabla 4.1.

[8] SPSS es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y aplicadas, además de las empresas de investigación de mercado.

[9] Se utilizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, debido a la cantidad de datos de cada una de las muestras, los cuales son inferiores a 50 datos.

	Actividades								
Descriptivos	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9
Media	16,84	29,87	14,79	19,44	20,56	20,08	10,21	55,83	15,27
Error estándar	0,36	0,59	0,50	0,49	0,80	0,81	0,54	1,71	1,24
Mediana	17,00	29,00	14,50	19,75	20,50	20,25	10,50	57,00	16,30
Varianza	0,89	3,12	1,74	1,89	5,10	3,94	2,07	26,25	19,99
Desviación estándar	0,94	1,77	1,32	1,37	2,26	1,99	1,44	5,12	4,47
Mínimo	15,00	28,00	13,00	17,00	18,00	17,50	8,00	48,00	9,80
Máximo	18,00	33,00	17,00	21,00	25,00	22,00	12,00	64,00	25,00
Rango	3,00	5,00	4,00	4,00	7,00	4,50	4,00	16,00	15,20
Asimetría	-1,24	0,81	0,50	-0,82	1,01	-0,21	-0,37	-0,74	0,64
Curtosis	2,58	-0,68	0,08	-0,26	1,15	-2,50	-1,08	-0,71	0,11
Prueba de normalidad – Shapiro Wilk									
Valor estadístico - W	0,896	0,897	0,957	0,928	0,925	0,851	0,964	0,978	0,918
Probabilidad crítica - p	0,306	0,235	0,79	0,496	0,475	0,162	0,854	0,952	0,239

Tabla 4.3: Valores estadísticos y prueba de normalidad realizadas a las actividades, desde la N°1 hasta la N°9.

	Actividades								
Descriptivos	N°10	N°11	N°12	N°13	N°14	N°15	N°16	N°17	N°18
Media	14,34	51,76	29,20	18,24	114,82	16,15	17,97	15,06	20,08
Error estándar	0,73	1,31	1,60	0,82	2,00	0,67	0,90	0,98	0,57
Mediana	13,50	51,50	27,00	17,50	115,25	15,90	17,90	14,60	19,50
Varianza	3,76	17,05	23,17	6,69	55,79	3,57	5,68	8,58	3,24
Desviación estándar	1,94	4,13	4,81	2,59	7,47	1,89	2.38	2,93	1,80
Mínimo	12,50	46,30	24,50	15,00	101,50	13,40	15,40	10,50	17,90
Máximo	17,50	60,50	37,20	22,00	127,00	19,10	22,20	19,00	22,50
Rango	5,00	14,20	12,70	7,00	25,50	5,70	6,80	8,50	4,60
Asimetría	0,71	0,88	0,78	0,41	-0,01	0,40	0,86	0,04	0,31
Curtosis	-1,04	1,22	-1,05	-1,36	-0,78	-0,40	0,47	-1,09	-1,91
Prueba de normalidad – Shapiro Wilk									
Valor estadístico - W	0,885	0,948	0,864	0,910	0,981	0,950	0,928	0,937	0,864
Probabilidad crítica - p	0,250	0,643	0,105	0,278	0,979	0,708	0,531	0,551	0,084

Tabla 4.4: Valores estadísticos y prueba de normalidad realizadas a las actividades, desde la N°10 hasta la N°18.

	Actividades	
Descriptivos	N°19	N°20
Media	75,08	11,81
Error estándar	1,53	0,82
Mediana	74,20	12,50
Varianza	25,67	6,68
Desviación estándar	5,07	2,58
Mínimo	65,00	7,50
Máximo	81,20	14,50
Rango	16,20	7,00
Asimetría	-0,56	-0,67
Curtosis	-0,02	-1,19
Prueba de normalidad – Shapiro Wilk		
Valor estadístico - W	0,936	0,878
Probabilidad crítica - p	0,479	0,122

Tabla 4.5: Valores estadísticos y prueba de normalidad realizadas a las actividades, desde la N°19 hasta la N°20.

En la sección de Anexos, se podrán revisar los gráficos Q-Q, para una muestra de distribución normal esperada, y en donde cada actividad tiene su respectivo gráfico. Es preciso destacar que, debido al dinamismo de la actividad minera, cada valor tiene una desviación estándar que puede aumentar o disminuir el tiempo requerido por actividad. Dicha incertidumbre e interferencia afectan directamente la planificación de los programas de desarrollo y las causas dependerán de las distintas condiciones existentes en terreno, pero aun así, el resultado muestra una buena aproximación de los valores esperados[10].

A continuación, se presenta la secuencia de trabajo de las 20 actividades, con su respectivo tiempo de duración y horario cronológico, referente a un ciclo de trabajo en un turno.

[10]Para mayores detalles de la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, revisar en Anexos sección “Validación de datos”.

Ítem	Tipo de actividad	Tiempos [h]		
		Tiempo estimado	Hora de inicio	Hora de término
1	Preparación para el inicio de turno	0:17:00	8:00:00	8:17:00
2	Traslado - Patio Dique al barrio cívico	0:30:00	8:17:00	8:47:00
3	Espera de Charla	0:15:00	8:47:00	9:02:00
4	Charla	0:19:00	9:02:00	9:21:00
5	Traslado de las cuadrillas a las posturas	0:21:00	9:21:00	9:42:00
6	Chequeo de postura y llenado de PPS	0:20:00	9:42:00	10:02:00
7	Preparación para la acuñadura I	0:10:00	10:02:00	10:12:00
8	Operación de acuñadura I	0:56:00	10:12:00	11:08:00
9	Limpieza de frente	0:15:00	11:08:00	11:23:00
10	Preparación para la fortificación	0:14:00	11:23:00	11:37:00
11	Operación de fortificación (fortificación base)	0:52:00	11:37:00	12:29:00
12	Preparación y marcación de la frente	0:29:00	12:29:00	12:58:00
13	Operación de acuñadura II	0:18:00	14:30:00	14:48:00
14	Operación de perforación de frente	1:55:00	14:48:00	16:43:00
15	Preparación para la acuñadura III	0:16:00	16:43:00	16:59:00
16	Operación de acuñadura III	0:18:00	16:59:00	17:17:00
17	Limpieza de frente	0:15:00	17:17:00	17:32:00
18	Preparación del proceso de carguío	0:20:00	17:32:00	17:52:00
19	Operación de carguío de explosivos	1:15:00	17:52:00	19:07:00
20	Finalización - Traslado al cívico	0:12:00	19:07:00	19:19:00
	Tiempo total de trabajo [h]	9,8		
	Tiempo total del ciclo [h]	12,0		

Tabla 4.6: Distribución de tiempos en actividades de desarrollo horizontal, mina CN.

Como los resultados obtenidos para las 20 actividades, muestran una distribución normal para cada una de ellas, el valor utilizado como "Tiempo estimado" corresponde a la media aritmética (ver Tabla 4.6), el cual se puede establecer como un valor representativo.

De manera análoga se establece que, si hay un desarrollo normal de las actividades, y sin considerar contingencias que impiden el curso normal de las operaciones, retrasando los trabajos, el tiempo total de todas las actividades sería de 9,8 [h] durante un turno, pero dicho tiempo no corresponde al ciclo completo de P&T[11] ya que faltan las operaciones unitarias de ventilación y extracción de marina.

También, cabe señalar que el desglose de las actividades corresponde al peor escenario de trabajo durante un turno, lo que implicaría la totalidad de las 20 actividades. No obstante, hubo escenarios en que no

[11]Las 20 actividades registradas corresponden a las operaciones de preparación de la frente, desde la operación de acuñadura I hasta la operación de carguío de explosivos, en donde la secuencia de las operaciones se establece en la Figura 4.1. El orden de trabajo corresponde a las labores iniciales que se ejecutan en una de las dos frentes de trabajo disponibles, respecto a la metodología del ciclo de P&T establecida en la mina CN y explicada en la sección de Antecedentes.

existía la necesidad de realizar ciertas actividades, disminuyendo así el tiempo del ciclo de trabajo.

Por lo tanto, se consideró como escenario base para próximos análisis el turno A (turno de día), el cual tiene constantemente una interferencia inevitable, y es la operación de tronadura de rajo, durante la cual y por motivos de seguridad se debe evacuar al personal que trabaja al interior de la mina subterránea hacia el barrio cívico. La operación de tronadura está programada desde las 13:30 hasta aproximadamente las 14:30 horas, como se puede apreciar en la "hora de inicio" del ítem N°13 de la Tabla 4.6. Así, al trabajar con dicho escenario base, se puede inferir que las soluciones implementadas beneficiarán aún más al turno B o turnos en donde exista una mejor condición de trabajo.

Las 20 actividades presentadas en la Tabla 4.6 se encuentran en orden cronológico de ejecución de cada una. Por comodidad visual, se reagrupan aquellas actividades que no correspondan a operaciones unitarias al grupo de interferencias, en donde cada interferencia se asocia a una operación unitaria específica dentro del ciclo de desarrollo, con la intención de simplificar análisis posteriores. La reagrupación se puede apreciar en la Tabla 4.7, que muestra el número de la interferencia y las actividades que agrupa.

Interferencias	Tipo de actividades
Interferencia I	1. Preparación para el inicio de turno
	2. Traslado – Patio Dique al barrio cívico
	3. Espera de Charla
	4. Charla
	5. Traslado de cuadrillas a las posturas
	6. Chequeo de postura y llenado de PPS
	7. Preparación de acuñadura I
Interferencia II	9. Limpieza de frente
	10. Preparación para la fortificación
Interferencia III	15. Preparación para la acuñadura III
Interferencia IV	17. Limpieza de frente
	18. Preparación del proceso de carguío
Interferencia V	20. Finalización – Traslado al cívico

Tabla 4.7: Reagrupación de las actividades ejecutadas en el desarrollo horizontal.

A continuación, se puede apreciar en la Figura 4.2 las operaciones unitarias involucradas con sus respectivas interferencias y el tiempo de duración de cada una de las actividades.

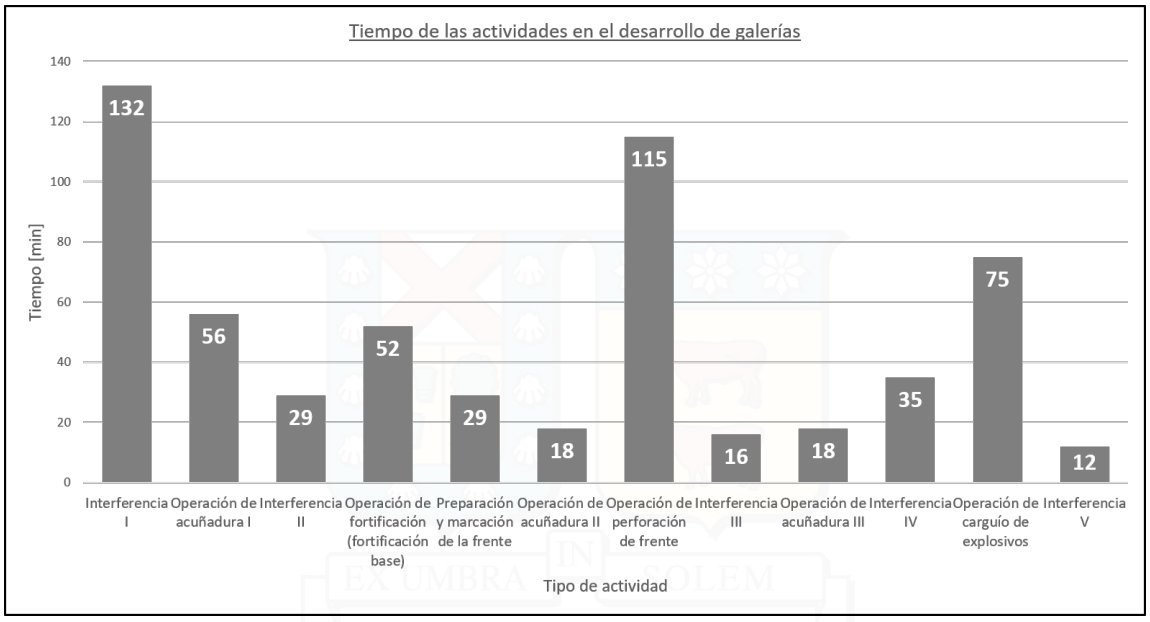


Figura 4.2: Distribución de tiempos, con respecto a las actividades en el desarrollo horizontal.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software Excel.)

Ya establecidos los valores necesarios para el desarrollo de la investigación, se procede a realizar el siguiente diagnóstico:

De la Figura 4.2 se puede apreciar que, la “Interferencia I” y la “Operación de perforación de frente” corresponden a las actividades que requieren una mayor cantidad de tiempo, por este motivo se tabularon las observaciones realizadas a dichas actividades, para analizar si existe algún foco de interés en el desarrollo normal de un turno. Estas observaciones se pueden visualizar en la Tabla 4.8.

De las observaciones, se desprende que: por un lado, la Interferencia I agrupa las actividades descritas en la Tabla 4.7, y que mayoritariamente son actividades necesarias y obligatorias para el inicio del turno, de las cuales existen pocas alternativas para intervenir directamente, por lo tanto, la única opción es mejorar la logística de interacción entre cada una de ellas. Por otro lado, la Operación de perforación de frente es una actividad netamente minera con un alto tiempo de duración; se considera como una operación crítica y un foco de interés para buscar una propuesta de mejora.

Tipo de actividad	Observaciones
Interferencia I	1. El tiempo de traslado desde la superficie hasta la mina subterránea, se encuentra condicionado por la empresa mandante, la cual define las rutas de viaje dependiendo de los sectores a explotar en la mina a rajo abierto.
	2. La charla de seguridad y asignación de tareas es de forma obligatoria, por lo cual no se puede intervenir.
	3. El traslado de las cuadrillas a las posturas de trabajo genera una gran entropía al comienzo de turno, debido a la limitación del medio de transporte para el total de trabajadores al interior de la mina subterránea.
	4. El chequeo de postura y llenado de PPS es obligatorio, cuya finalidad es salvaguardar la integridad de los trabajadores y determinar condiciones de inseguridad en el sector a trabajar.
Op. de perforación de frente	1. Existe una alta frecuencia de fallas en los equipos mientras se desarrollan los trabajos, lo que se ve reflejado en un alto porcentaje de horas de mantención no planificada.
	2. Los equipos de perforación tienen un bajo porcentaje de horas efectivas de trabajo, lo cual se debe a las pocas tareas asignadas durante un turno.
	3. Existe un alto porcentaje de pérdida por falla operacional, correspondientes a esperas por marcación de frente, acuñadura, ventilación o stand by sin postura.

Tabla 4.8: Observaciones detectadas en terreno, mientras se realizaba el registro de información.

De las observaciones detectadas en terreno, para la operación de perforación de la frente, se analizó con mayor detalle cada punto.

En primer lugar, la alta frecuencia de fallas o pannes de los equipos de perforación, se corrobora con el porcentaje de horas de mantención no planificada. Durante los meses de investigación, se obtuvo un resultado del 28,5 % de dicho porcentaje, del total de horas. En siguiente punto corresponde al bajo porcentaje de horas efectivas de trabajo, para los equipos de perforación, que durante la investigación alcanzo un 25,5 %, del total de horas, durante el tiempo de investigación en terreno. Se establece como causa de este resultado, la poca cantidad de trabajos asignados a dichos equipos, que solo realizan una operación de fortificación y perforación de la frente por turno, quedando liberados. Por último, se menciona el alto porcentaje de pérdida operacional, que tiene un valor del 21,4 %, del total de horas, durante el tiempo de investigación en terreno. Y se establece como causa principal, de este alto porcentaje, los largos periodos de esperas de los equipos en postura, para iniciar sus trabajos.

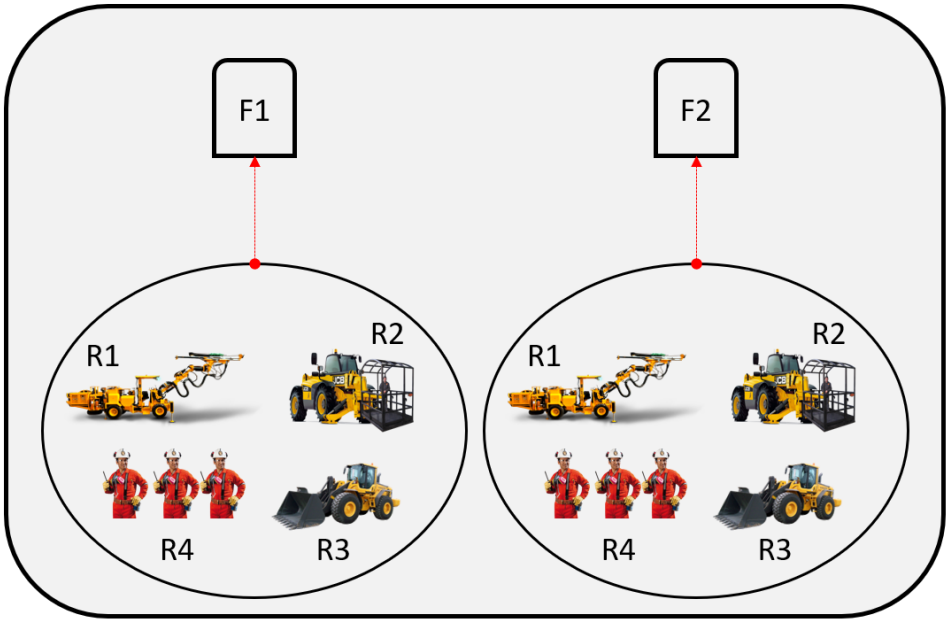
Del análisis anterior, se puede deducir que: por un lado, existe un alto porcentaje de fallas en las perforadoras, que provienen de complicaciones mecánicas de los equipos y problemas del departamento o área enfocada en la mantención óptima de dichos equipos. Por otro parte, existen dos observaciones que tienen un punto en común, el cuál es la poca cantidad de trabajos que realiza un equipo de perforación durante el desarrollo de un turno. Por lo tanto, no se está aprovechando de forma eficiente los equipos disponibles

para trabajar y también, no se está asignando de forma óptima las operaciones en terreno. A causa de este análisis, se analizará cual es la metodología de asignación de recursos y como se ejecuta al interior de la mina subterránea CN, ya que se detectó una ineficiencia de la operación y un foco de interés, que puede derivar en una propuesta de mejora.

Visto que, del análisis anterior, se procede a indagar sobre la metodología de asignación de recursos y distribución de operaciones en el desarrollo horizontal, que son utilizadas actualmente al interior de la mina subterránea. La información recopilada se presenta a continuación.

En primer lugar, al interior de la mina subterránea CN se organiza una cuadrilla de trabajo, la cual reúne los siguientes recursos: entre 3 a 4 mineros, 1 operador equipo de grúa, 1 operador de cargador frontal y 1 operador de equipo perforador. Luego, a la cuadrilla o equipo de trabajo, se le asigna una frente disponible y habilitada para comenzar los trabajos desde la "Operación de acuñadura I" hasta finalizar con la "Operación de carguío de explosivos" durante un turno, según el orden cronológico establecido en la Figura 4.1. Cabe mencionar que, cada cuadrilla dispone con sus propios equipos[12], por lo tanto, no hay pérdidas de tiempo producto de las esperas por equipos que se encuentran ocupados. A modo de ejemplo, se puede apreciar la Figura 4.3, la cual muestra dos cuadrillas de trabajo, cada una con recursos independientes y que desarrollan sus labores en frentes de trabajo diferentes, con la finalidad de no provocar una interferencia entre cuadrillas.

Fi: *corresponde a las frentes disponibles para trabajar por cuadrilla*
$\forall i \in \{1, 2\}$



Ri: *corresponde a los recursos disponibles para trabajar por cuadrilla*
$\forall i \in \{1, 2, 3, 4\}$

Figura 4.3: Esquema de asignación de recursos por cuadrilla de trabajo, para el desarrollo horizontal.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software PowerPoint.)

[12]Los equipos corresponden a: equipo de perforación de avance, grúa de plataforma, cargador frontal y las herramientas necesarias para desarrollar las labores propias del desarrollo horizontal.

Por otro lado, con respecto a la distribución de operaciones unitarias del ciclo de desarrollo horizontal, en una frente de trabajo. No existe una metodología establecida para desarrollar las operaciones de forma eficiente, ya que simplemente se disponen de los recursos requeridos para cumplir con las labores durante el turno. Por lo tanto, una vez finalizado el trabajo de un recurso de la cuadrilla, este se queda esperando en postura, para ser requerido nuevamente en la misma frente de trabajo, pero para otra operación unitaria, o de no ser así, no realizan más trabajos durante el turno. Es por este motivo que, el equipo de perforación tiene un bajo porcentaje de horas efectivas de trabajo, ya que solo realiza las operaciones de fortificación y perforación de la frente, quedando libre el resto del turno.

Cabe mencionar, que actualmente la mina subterránea CN cuenta con un total de 5 cuadrillas de trabajo, cada una con sus recursos independientes y todas se rigen de la misma forma que la presentada en la Figura 4.3. Así, las 20 actividades descritas en la Tabla 4.6, son realizadas por una cuadrilla de trabajo para una sola frente, de forma continua y con todas las falencias detectadas, propias del sistema de asignación de recursos implementado en la mina. Las observaciones asociadas a la metodología existente corresponden a las siguientes:

- Se ocasiona un cuello botella, producto de los equipos que se encuentran en stand by en postura, esperando que se habilite la frente para desarrollar su trabajo.
- No existe una mayor logística para optimizar el uso de los recursos disponibles, al interior de la mina subterránea.
- En casos de condiciones adversas en la frente de trabajo, se deben trasladar y continuar las labores desde el comienzo, ocasionando una pérdida de continuidad.
- Se produce una entropía en las labores de trabajo, generando situaciones de riesgo para los mineros, producto de los variados equipos agrupados en el sector.

Finalmente, se considera realizar una propuesta de mejora, que impacte de forma significativa la productividad de la mina subterránea CN. Dicha propuesta, consistiría en establecer una nueva metodología de asignación de recursos, para el ciclo de P&T, habilitando una mayor cantidad de frentes disponibles por cuadrilla de trabajo. Se utilizará el tiempo estimado de cada operación, las interferencias durante el turno y la misma cantidad de recursos requeridos por cuadrilla de trabajo. Se evaluará el impacto en la cantidad de metros lineales desarrollados, en comparación con la forma actual de trabajar al interior de la mina.

4.3. Etapa de Simulación en CN

La siguiente etapa, tiene como finalidad validar mediante una simulación del ciclo de desarrollo horizontal, la conveniencia de realizar una redistribución de los recursos disponibles actualmente por cuadrilla de trabajo, se plantearán dos escenarios distintos y se cotejarán la cantidad de metros lineales de avance, si se disponen de dos o tres frentes disponibles por cuadrilla de trabajo.

En la siguiente sección se presenta la metodología, criterios y condicionantes utilizadas para la simulación.

4.3.1. Escenario por simular

La mina subterránea CN, distribuyo las operaciones unitarias del ciclo de P&T, de forma tal que, en una frente se realizan operaciones de preparación y carguío de explosivos, mientras que, en una segunda frente se realiza la ventilación y limpieza[13]. Producto de las limitaciones de seguridad establecidas al interior de la mina subterránea CN, para poder ejecutar tronaduras al interior de la mina[14], no es conveniente intervenir con dicha metodología de dos frentes, en su totalidad, en especial aquella frente que se encuentra con las operaciones de ventilación y limpieza. Por este motivo, las modificaciones a la metodología de asignación de recursos, se ejecutarán solo en aquella frente que se encuentra en etapa de preparación y posterior tronadura, y corresponde a aquella que registra las 20 actividades en la Tabla 4.6.

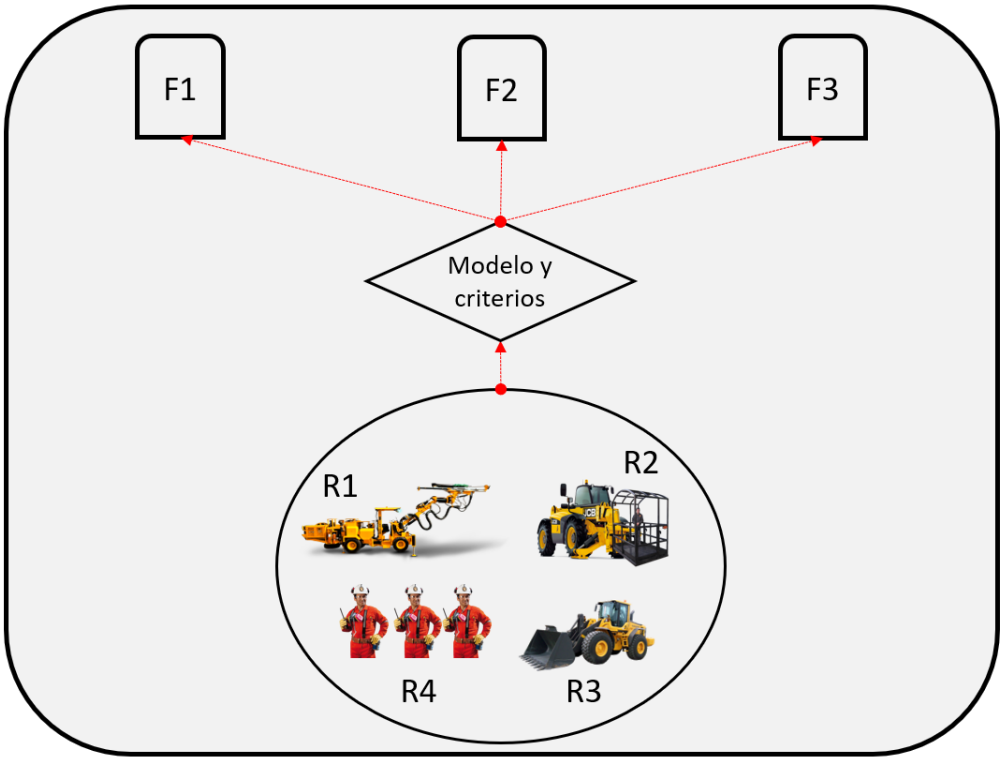
Se implementará la metodología de multi frentes, ajustada a las limitaciones de la mina, y se realizará una simulación con dos escenarios: el primer escenario tendrá una disponibilidad de 2 frentes, para realizar el proceso de preparación y tronadura por cuadrilla de trabajo. El segundo escenario tendrá 3 frentes disponibles por cuadrilla de trabajo, manteniendo en ambos casos la misma cantidad de recursos. Cabe mencionar que, tres frentes es la disponibilidad máxima para evaluar por cuadrilla de trabajo, ya que por condiciones de la mina y de la totalidad de cuadrillas de trabajo, no existen más frentes disponibles.

A modo de ejemplo, una cuadrilla de trabajo cuenta con los siguientes recursos: 3 mineros, 1 operador de equipo perforador, 1 operador de grúa y 1 operador de cargador frontal. Dependiendo de las condiciones y restricciones establecidas para la simulación, el modelo deberá decidir entre las frentes disponibles, para realizar distintos trabajos de preparación, tal ejemplo se puede visualizar en la Figura 4.4.

[13] El detalle de esta metodología aparece en la sección de Antecedentes, capítulo 2.5 “Sistema de Trabajo en Candelaria Norte”

[14] Solo se permitirá la tronadura al interior de la mina subterránea CN en los cambios de turnos, por lo cual se prohíbe realizar tronaduras durante la ejecución de un turno.

$$Fi: corresponde\ a\ las\ frentes\ disponibles\ para\ trabajar\ por\ cuadrilla$$
$$\forall i \in \{1, 2, 3\}$$



$$Ri: corresponde\ a\ los\ recursos\ disponibles\ para\ trabajar\ por\ cuadrilla$$
$$\forall i \in \{1, 2, 3, 4\}$$

Figura 4.4: Esquema de trabajo para la simulación, con las frentes disponibles y sus recursos.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software PowerPoint.)

Cabe señalar que, los escenarios a simular solo consideran las frentes disponibles para una cuadrilla de trabajo. Por lo tanto, dichos resultados aumentan proporcionalmente a la cantidad de cuadrillas dispuestas al interior de la mina subterránea CN.

4.3.2. Parámetros iniciales

A continuación, se presentan las condiciones y parámetros iniciales establecidos en el modelo de la simulación.

- Se establece una cuadrilla de trabajo, con los siguientes recursos: 3 mineros, 1 operador de equipo perforador, 1 operador de grúa y 1 operador de cargador frontal. Los operadores se consideran como recursos, con sus respectivos equipos de operación y los mineros serán 3 recursos independientes.
- Se simulará el trabajo de una cuadrilla de trabajo por turno, para cada uno de los escenarios.
- Se establecen 2 o 3 frentes de trabajo disponibles para la cuadrilla, siendo cada una de las opciones un escenario distinto. No se considera el caso de 1 frente de trabajo, porque es el escenario de trabajo actual al interior de la mina.
- Solo se puede ejecutar una operación a la vez en cada frente de trabajo, siguiendo estrictamente el orden cronológico establecido en la Figura 4.1.
- La operación de acuñadura requiere los siguientes recursos: un operador de grúa y dos mineros.
- La operación de limpieza de frente requiere los siguientes recursos: un solo operador de cargador frontal.
- La operación de fortificación requiere los siguientes recursos: un operador de equipo perforador y un minero[15].
- La operación de perforación requiere los siguientes recursos: un operador de equipo perforador y un minero.
- La operación de carguío de explosivos requiere los siguientes recursos: un operador de grúa y dos mineros.
- Para realizar una operación unitaria, deben estar disponibles los recursos requeridos según el tipo de operación.
- Se considera como recursos ocupados, a aquellos necesarios para realizar las labores correspondientes a la operación a ejecutar, mientras que los recursos restantes se establecen como disponibles, para ser ocupados en otra operación.
- Cuando los recursos disponibles, no cumplan con aquellos recursos requeridos para realizar una operación, no se realizarán labores en esa frente hasta que se habiliten los demás recursos.
- El tiempo de duración de cada operación, se establece como el "tiempo estimado" de la Tabla 4.6, y será utilizado para la simulación.
- Se utilizarán los tiempos de interferencias, en su respectivo orden de registro, establecido en la Figura 4.2.

[15] Solo para el caso de a fortificación base, para otro tipo de fortificación es necesario dos mineros e inclusive el uso de un operador de grúa.

- Se establecen horarios de trabajos de 12 horas por turno, cada vez que comience un nuevo turno, se iniciará con la "Interferencia I" y luego, con las respectivas operaciones pendientes por frente de trabajo.
- Se establecerán horarios de trabajo desde las 8:00 hasta las 20:00 horas, en donde se terminarán las labores a las 19:25 horas, lo cual permite el tiempo de salida de los trabajadores.
- Se establece la restricción de tronadura de rajo, paralizando los trabajos desde las 13:20 hasta las 14:30 horas, donde no se ejecutarán trabajos.
- No se pueden dejar los trabajos incompletos, por lo tanto, se deberá chequear la hora disponible antes que finalice el turno, y verificar si cumple con el tiempo necesario para finalizar la operación. De lo contrario, finalizarán los trabajos en dicha frente durante ese turno.
- Se establecerá un tiempo fijo de traslado de recursos, de 20 minutos entre frentes.
- Se considera el desarrollo completo de una frente, cuando se realizan las siguientes operaciones: comienza con la operación de acuñadura I y finaliza con la operación de carguío de explosivos.
- Cada operación tiene asociado un porcentaje de avance de la frente, que se calculará de forma proporcional al tiempo de duración de cada una de ellas.
- Cuando finaliza una operación, se va sumando de forma acumulativa el porcentaje de avance. Así, cuando termina la operación de carguío de explosivos, la frente tendrá un 100 % de avance. Por lo tanto, se encontrará habilitada para realizar la tronadura de cambio de turno.
- Se establece como restricción, la necesidad de terminar los trabajos para una frente como mínimo por turno, por lo tanto, se debe seguir la continuidad en aquella frente que tenga un mayor porcentaje de avance, para cumplir con dicha restricción.

En resumen, el modelo tiene como finalidad distribuir los recursos de una cuadrilla de trabajo, para realizar una simulación del ciclo de preparación de la frente, de tal forma que, mientras se ejecuta una operación unitaria en una frente de trabajo, se pueda realizar otra operación unitaria distinta con los recursos disponibles de la cuadrilla, en un segunda frente de trabajo o hasta una tercera, siguiendo estrictamente el orden cronológico de las operaciones. Se buscará establecer, cuál de los dos escenarios es más conveniente y permite aumentar la productividad en el desarrollo horizontal, manteniendo la misma cantidad de recursos.

Cabe señalar que, los escenarios descritos a simular obedecen una situación ideal y previamente establecida. Por lo tanto, deben cumplir con ciertos alcances y condiciones en el sistema, para que sea aplicable a los trabajos en terreno, los cuales son:

- Cumplir con la situación ideal de trabajo, que contempla las 20 actividades como máximo.
- Que la recomendación de fortificación corresponda a una fortificación base. De ser otra la minuta de fortificación, la duración de dicha operación puede aumentar y también aumentaría la cantidad de recursos requeridos, para el desarrollo de la operación.

- Que no existan fallas operacionales durante la operación, ya que las interferencias registradas no las contemplan.
- Disponibilidad completa de los recursos asociados a cada cuadrilla, y sin interferencias de estos durante el desarrollo del turno.
- Que los equipos se encuentren operativamente funcionales.

Los parámetros mencionados con anterioridad establecen la forma y restricciones implementadas al modelo de la simulación. Por consiguiente, el software utilizado para la simulación es MATLAB, que a través de un archivo script ejecuta el código de programación desarrollado para el caso en estudio. En la Tabla 4.9, se muestran los parámetros iniciales del sistema, pertenecientes a la simulación y su integración al código.

Variables	Función en la simulación
M	Matriz que incluye parámetros asociados a las operaciones unitarias.
Interferencias	Vector con los valores de todas las interferencias.
Frente1	Contador 1, que muestra la cantidad de frentes desarrolladas en porcentaje.
Frente2	Contador 2, que muestra la cantidad de frentes desarrolladas en porcentaje.
Frente3	Contador 3, que muestra la cantidad de frentes desarrolladas en porcentaje.
Dias	Cantidad de días que se desean simular.
nt	Contador del tiempo requerido por turno.
n	Contador del tiempo durante el desarrollo del turno.
n1	Condicionante de prioridades e interferencias.
n2	Variable binaria, que indica el estado de la frente, disponible o terminada.
n3	Variable binaria, que indica la disponibilidad de equipos de perforación.
n4	Variable binaria, que indica la disponibilidad de equipos de plataforma.
n5	Vector con los horarios de detención durante el turno.
n6	Vector que registra las operaciones ejecutadas en cada frente.
Condicion	Condición para convertir los días ingresados en minutos.
Hora	Hora cronológica del turno.

Tabla 4.9: Variables definidas previamente al inicio del código de programación.

A continuación, se detallan aquellas variables iniciales más importantes.

$$M = \begin{bmatrix} 56 & 52 & 29 & 18 & 115 & 18 & 75 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0,15 & 0,14 & 0,08 & 0,05 & 0,32 & 0,05 & 0,21 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La variable “M” es una matriz de 4x7, en donde la primera fila corresponde a los tiempos de duración en minutos establecidos por tipo de operación; la segunda fila es el orden de ejecución de las operaciones; la

tercera fila corresponde al porcentaje de progreso de la frente en trabajo, asociado al cumplimiento del tipo de operación que se haya ejecutado[16]. Por último, la cuarta fila corresponde a un contador de prioridad para asignar el tipo de operación, que va cambiando en el transcurso de la simulación. Los demás valores son fijos y ya determinados.

$$Interferencias = [132, 29, 16, 35, 12]$$

La variable "Interferencias" corresponde a un vector, que tiene los valores de tiempo de duración en minutos de las interferencias, en su respectivo orden de aparición.

$$Dias = input('Ingresar\ la\ cantidad\ de\ días\ que\ se\ desea\ simular\ :')$$

La variable "Dias" corresponde solo a un valor ingresado por el usuario y que define el tiempo de duración de la simulación. Cabe señalar que en un día existen dos turnos distintos, por lo tanto, se pueden ingresar números enteros o con decimal, 0,5 para especificar una cantidad de turnos a simular.

$$Condicion = Dias * 24 * 60$$

La variable "Condicion" tiene como función convertir los días ingresados en minutos. Ese valor es usado como restricción para el bucle "while" y establece el tiempo total a simular, en donde se tienen que cumplir las siguientes condiciones para acceder a la simulación.

$$nt < Condicion$$

Aquellas variables de entrada corresponden a la información requerida, para el modelo de simulación. Son todos los valores necesarios para cumplir con los requisitos de la simulación. En términos simples, al modelo se deben ingresar la cantidad de días o turnos que se desean simular y el código de programación, debe entregar la cantidad de desarrollo logrado en cada una de las frentes disponibles, rigiéndose por los parámetros y condiciones iniciales.

4.3.3. Restricciones

A continuación, se establecen los criterios y condicionantes utilizadas en el código de programación, con la finalidad de generar el cumplimiento de los objetivos.

- Para el desarrollo de la simulación no será necesario la elaboración de un modelo matemático para describir el tiempo requerido por cada operación unitaria, ya que se simplificará utilizando el tiempo estimado, calculado en la sección anterior.

[16]Este valor fue calculado a partir de las 7 operaciones unitarias, cada valor está asociado al tiempo de duración de cada operación y una vez completado las 7 operaciones se obtiene un 100 % de desarrollo de las frentes de trabajo.

- **Condición inicial:** se establecerán las frentes disponibles según el tipo de escenario. Además, se comenzarán los trabajos en la frente denominada "frente 1" el cual empieza con el contador "n6" en 0 y se realizarán las labores en las demás frentes, siempre y cuando se tenga disponibilidad de los recursos necesarios.

$$nt < Condicion$$

$$n = n + Interferencias(1)$$

$$n6 = [0, 0, 0]$$

- **Rendimiento mínimo:** se establece como mínimo la tronadura de una de las frentes de trabajo por turno, por lo tanto, para realizar trabajos en la segunda o tercera frente disponible, estos no deben entorpecer el ciclo de trabajo de aquella frente que tenga un mayor porcentaje de avance, asignando una mayor prioridad a esta última. Para esto, se revisan los contadores de desarrollo de frentes y se establece cual tiene mayor porcentaje de avance al comienzo de cada turno, asignando un valor al contador de prioridad y entregando la disponibilidad "n3" y "n4" a dicha frente.

$$n1 = n1 + [x, x, x]$$

- **Ejecución de actividades:** se fija el mismo orden cronológico de ejecución de las operaciones, que aparece en la Tabla 4.6, y no se podrá romper dicha secuencia con la finalidad de adelantar trabajos, puesto que se estableció de esa forma por motivos de seguridad. La secuencia se definió en la matriz "M", y va asociado a la ejecución de las interferencias. Las operaciones se registran en "n6" como el estado y desarrollo de la frente.

$$n6 = n6 + M(2, x)$$

- **Término de una frente:** una vez finalizada la operación de carguío de explosivo, dicha frente queda terminada en un 100 % y se agilizarán los recursos a la segunda frente o tercera, dependiendo de la que tenga un mayor porcentaje de avance. A continuación, se presenta el ejemplo de la condición de término para la "Frente1".

$$Frente1 = Frente1 + \sum_{i=1}^{7} M(3, i)$$

$$n2 = [0, 1, 1]$$

- **Término de trabajos durante un turno:** se interrumpe la simulación si los trabajos en las frentes disponibles se encuentran completos durante un mismo turno, por lo tanto, para el próximo turno se comenzará desde la condición inicial. Ocurre solo si la variable "n2" indica el estado de las frentes como terminado.

$$n2 = [0, 0, 0]$$

- **Condición para realizar una operación finalizando el turno:** las operaciones unitarias no pueden quedarse sin un cumplimiento del 100 % durante un turno. Si el tiempo estimado es mayor al tiempo disponible antes que finalice el turno, dicha operación no se ejecutará y será la primera operación en desarrollarse para el próximo turno. Por lo tanto, la variable de tiempo en la matriz "M" tiene que ser menor al contador "n5" menos "Hora".

$$M(1, x) < n5 - Hora$$

- **Traslado de recursos:** se considerará un tiempo de traslado de recursos de 20 minutos, lo cual significa que si se desea trasladar un equipo o un grupo de mineros a trabajar a la segunda o tercera frente disponible, se debe adicionar el tiempo de traslado a la cronología del turno.

- **Disponibilidad de los equipos:** no se adicionarán equipos de perforación o grúas, ya que la finalidad del estudio es mantener la cantidad de los recursos requeridos. Por otro lado, las variables "n3" y "n4" indican la disponibilidad de los equipos. Si su valor es 1 se encuentra trabajando y la siguiente frente tendrá que esperar que se encuentre disponible, es decir con un valor de 0.

$$n3 = 0\, or\, 1$$

$$n4 = 0\, or\, 1$$

- **Restricciones horarias:** se establecerá un escenario único, en donde los trabajos se interrumpen a las 13:30 y se retoman a las 14:30, independiente del tipo de turno. También, se consideró que se ejecutarán las 20 actividades para cada frente, aludiendo siempre a la simulación del peor escenario. Por último, la hora de término de trabajo es a las 19:25 o 07:25. La variable que tienen estos valores corresponde a "n5", un vector de 6x1, que contiene los horarios de detención de las actividades.

4.3.4. Diagrama del proceso

A continuación, la Figura 4.5 muestra un esquema resumen del proceso de simulación y las sentencias de control que se ingresarán al software; la finalidad es comprender, a grandes rasgos, la forma de proceder de la simulación.

A la simulación se ingresan la cantidad de días que se desean simular. Luego, a través de los criterios mencionados, se escoge la frente en donde comienzan los trabajos, a partir de la que tenga un mayor porcentaje de avance. Mientras se ejecutan trabajos en una frente, en la siguiente se realizan las operaciones correspondientes al orden de ejecución establecido, siempre y cuando no interfieran en la primera frente, que tiene una mayor prioridad (porque tiene un mayor porcentaje de avance). Y así, se continúan los trabajos hasta terminar el turno.

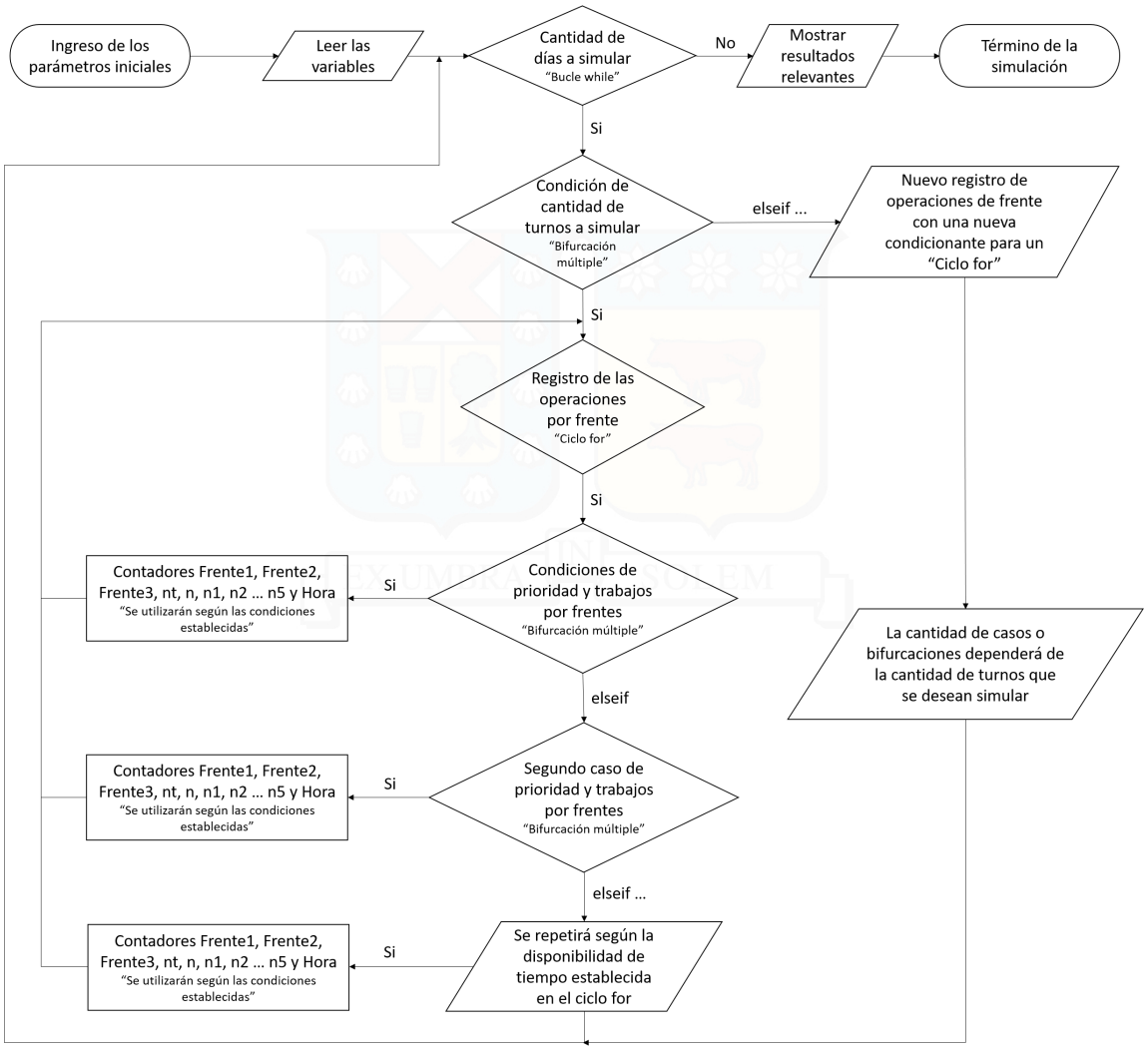


Figura 4.5: Diagrama de flujo básico de las sentencias de control, utilizadas para la simulación.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software PowerPoint.)

4.3.5. Simulación del proceso

Una vez planteados los parámetros utilizados, las condicionantes, los criterios y una breve explicación de cómo se desea implementar el modelo, se corre el modelo en MATLAB para chequear los resultados.

Simulación con 2 frentes disponibles

Se tabularon los resultados, realizando 20 simulaciones, equivalentes a 20 turnos o 10 días de trabajo. Cada simulación tiene el turno en que se encuentra y el porcentaje de avance que se logró para cada una de las frentes. Cabe señalar que los porcentajes de avances para las frentes son acumulativos y dichos valores se pueden visualizar en la Tabla 4.10.

Turno	Frente 1	Frente2
1	1	0,37
2	1,74	1
3	2	2
4	3	3,37
5	3,74	3
6	4	4
7	5	4,37
8	5,74	5
9	6	6
10	7	6,37
11	7,74	7
12	8	8
13	9	8,37
14	9,74	9
15	10	10
16	11	10,37
17	11,74	11
18	12	12
19	13	12,37
20	13,74	13

Tabla 4.10: Resultados de las primeras 20 simulaciones con dos frentes disponibles.

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.10, se desprende que, para el Turno 1, en la Frente 1 se desarrollaron las actividades desde la “operación de acuñadura 1” hasta la “operación de carguío de explosivos”, por lo tanto, se encuentra habilitada para realizar la tronadura durante el cambio de turno,

mientras que, la Frente 2 alcanzó a ejecutarse hasta el 37 % de las operaciones totales. Pero, en el Turno 2, se ejecutan las operaciones restantes llegando al 100 % de desarrollo en la Frente 2 y se alcanza a ejecutar un 74 % en una tercera frente, teóricamente, que se registra y se anota acumulativamente en el ítem Frente 1. Cabe señalar, que la metodología contempla dos frentes disponibles, pero que no son necesariamente las mismas frentes siempre (llevado a terreno), porque se debe dejar como mínimo un turno más, para realizar las operaciones de ventilación y limpieza de marina, en aquellas frentes de trabajo en que se realizó una tronadura.

También, se puede observar que los valores de porcentaje de avance, llegan a un punto de equilibrio dentro de la simulación, ya que estos se repiten cada tercer turno constantemente (se visualiza en la Tabla 4.10 con separadores de fila, desde el Turno 3). Cabe recordar que los ítems Frente1 y Frente2 son acumulativas. Por lo tanto, cada tres turnos de trabajo se obtiene un total de 4 disparos de frentes.

Del ejemplo anterior se simularon 20 turnos de trabajo en total. Con la metodología utilizada actualmente al interior de la mina subterránea CN, se debería obtener un total de 20 disparos realizados, pero con la metodología propuesta de 2 frentes disponibles, se obtuvo un total de 26,74 disparos de frentes, alcanzando una diferencia de 6,74 disparos más. A continuación, se muestra la comparación de los resultados entre las metodologías, simulando un total de 30 días, lo que se puede visualizar en la Figura A.12.

	Metodología actual	Metodología propuesta N°1
Cantidad de disparos en 30 días	60	80
Diferencia	20	
Disparos/3Turnos	3	4
Avance por disparo teórico [m]	3,8	
Avance promedio por disparo efectivo [m]	3,4	
Rendimiento en 1,5 días [m]	10,2	13,6

Tabla 4.11: Comparación entre la metodología actual y la propuesta N°1 para 30 días de trabajo.

En términos porcentuales, la metodología propuesta alcanza el 33,3 %, a diferencia de la metodología actual, lo que equivale a 3,4 [m] de avance lineal extras cada 3 turnos de trabajo. Es un resultado relevante, considerando que solo estamos simulando los beneficios para una sola cuadrilla de trabajo, esto aumenta proporcionalmente considerando que se tiene un total de 5 cuadrillas de trabajo actualmente.

Simulación con 3 frentes disponibles

De igual forma, se tabularon los resultados realizando 20 simulaciones, equivalentes a 20 turnos o 10 días de trabajo. Cada simulación tiene el turno en que se encuentra y el porcentaje de avance que se logró para cada una de las frentes. Los resultados se pueden visualizar en la Tabla 4.10.

Turno	Frente 1	Frente 2	Frente 3
1	1	0,37	0,29
2	1,37	1	1
3	2	1,42	1,42
4	2,74	2	2
5	3	2,79	2,42
6	3,79	3	3
7	4	3,79	3,42
8	4,79	4	4
9	5	4,79	4,79
10	5,79	5	5
11	6	5,79	5,79
12	6,79	6	6
13	7	6,79	6,79
14	7,79	7	7
15	8	7,79	7,79
16	8,79	8	8
17	9	8,79	8,79
18	9,79	9	9
19	10	9,79	9,79
20	10,79	10	10

Tabla 4.12: Resultados de las primeras 20 simulaciones con tres frentes disponibles.

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.12, se observa que en el Turno 1, se alcanzó un desarrollo del 100 % en la Frente 1, la Frente 2 alcanzó a llegar al 37 % de desarrollo y la Frente 3 solo un 29 %. También, a partir del turno N°8 los porcentajes de avances se van repitiendo cada 2 turnos, llegando a un equilibrio en los trabajos para los turnos posteriores.

De igual forma, en la Tabla 4.12, se separan aquellos turnos con separadores de fila y se agrupan aquellos turnos que se van repitiendo. Por otro lado, como se simularon un total de 20 turnos, el resultado obtenido con la metodología actual debería ser de 20 disparos realizados, pero con la metodología propuesta de 3 frentes disponibles, se alcanzaría un total de 30,79 disparos de frentes. Cabe recordar que los recursos referentes a equipos y operadores se mantienen en cantidad. A continuación, se muestra la comparación de los resultados entre las metodologías, simulando un total de 30 días.

	Metodología actual	Metodología propuesta N°2
Cantidad de disparos en 30 días	60	90,79
Diferencia	30,79	
Disparos/8Turnos	8	12,79
Avance por disparo teórico [m]	3,8	
Avance promedio por disparo efectivo [m]	3,4	
Rendimiento en los primeros 4 días [m]	27,2	43,5

Tabla 4.13: Comparación entre la metodología actual y la propuesta N°2 para 30 días de trabajo.

En términos porcentuales, el avance con tres frentes alcanza el 51,3 %, a diferencia de la metodología actual, lo que equivale a 16,3 [m] de avance lineal extra en los primeros 4 días y 6 [m] de avance lineal cada dos turnos.

En ambos casos los resultados son auspiciosos, se aumenta considerablemente los metros de avances lineales en el desarrollo horizontal, por consiguiente, aumenta la productividad y disminuye el tiempo en stand by de los equipos.

5 | Conclusión y Recomendaciones

Finalizando el trabajo de investigación, se puede concluir que el objetivo general propuesto al comienzo del informe se cumple, logrando establecer dos propuestas que permiten aumentar la productividad de metros lineales de avance en los ciclos de desarrollo horizontal.

Con respecto a los puntos de diagnóstico y desarrollo, se estableció una buena metodología de medición de datos en terreno, considerando las variables incontrolables que pueden afectar las operaciones a diagnosticar. Por lo tanto, para promover mejoras que optimicen los procesos de desarrollo es necesario tener una buena base de gestión, logística y obtener una retroalimentación con respecto a la información de control que actualmente se registra y se archiva, para realizar cambios o tomar decisiones a las malas prácticas ejecutadas durante la operación.

Se tiene un modelo determinístico que permite generar una asignación de recursos de forma eficiente, para desarrollar un programa de desarrollo horizontales, maximizando la utilización de los recursos. Por otra parte, la metodología de trabajo actual es cuestionable en términos de eficiencia, para realizar la asignación de recursos, ya que no cumpliría con las fases mínimas de la teoría de toma de decisiones que permiten trabajar con una buena metodología de trabajo. Si se compara la metodología propuesta con la utilizada en la actualidad en la mina subterránea Candelaria Norte, las diferencias con respecto a la asignación de operaciones permite un aumento en la confiabilidad del rendimiento mínimo esperado y del tiempo efectivo de trabajo. Lo cual se traduce en los siguientes resultados.

Propuesta 1 - Simulación con 2 frentes disponibles

Se tiene un aumento de la productividad del 33,3 % en comparación con la metodología de trabajo que se realiza en la actualidad, reduciendo el cuello de botella que afectaba dicha metodología y mejorando los tiempos de trabajo efectivo, tanto para los mineros como para los operadores de equipo. La simulación desarrollada se considera un sistema determinístico, ya que las variables de entrada y salida quedan perfectamente definidas y no hay elementos aleatorios o valores nuevos que vallan ingresando, en consecuencia, era natural esperar que los resultados obtenidos encontraran un punto de equilibrio, reflejado en la secuencia repetitiva de los 3 turnos de trabajo.

Se puede inferir que se podría reducir la posibilidad de pérdida de disparos de frente, producto de condiciones adversas en el lugar de trabajo, ya que se encuentra habilitada la segunda frente disponible que

tiene un porcentaje de avance, permitiendo cumplir el rendimiento mínimo establecido al interior de la mina subterránea CN, de 1 disparo/turno por cuadrilla de trabajo.

Propuesta 2 - Simulación con 3 frentes disponibles

Para la propuesta N°2, que es la misma propuesta N°1, pero con la habilitación de 3 frentes de trabajo disponibles. Se obtiene como resultado el incremento de un 51,3 %, en comparación con la metodología actual. Para este caso se elimina el cuello de botella, respecto a las condicionantes y criterios establecidos por la empresa y en la simulación. Al igual que en la primera propuesta, se considera a la simulación un sistema determinístico, pero con la diferencia que tardó un poco más en encontrar el punto de equilibrio, lográndose en el turno N°8 y sin volver a la condición inicial, estableciendo una secuencia repetitiva cada 2 turnos de trabajo.

Por último, para ambas propuestas la redistribución de las operaciones unitarias trae los mismos beneficios, pero en diferentes porcentajes, reduciendo los largos tiempos de espera para los equipos u operaciones de mayor importancia. Algunas de las ventajas obtenidas son:

- Se desarrolla una logística, para optimizar el uso de los recursos disponibles al interior de la mina subterránea.
- Se reduce el cuello de botella, de aquellos equipos que se encuentran en stand by, esperando la habilitación de la frente de trabajo.
- Se dispondrá de una segunda frente de trabajo, que tendrá un porcentaje de avance en los trabajos, para aquellas eventualidades de impidan continuar con las labores en una primera frente, debiéndose trasladar a una segunda y no comenzar desde cero.
- Se reduce la entropía en las labores de trabajo, debido a la concentración de equipos en un mismo lugar de trabajo.

Estos beneficios se pueden ver reflejados en la empresa contratista, como el aumento de la cantidad de metros lineales de avance mensualmente o en la reducción en la cantidad de recursos necesarios, para cumplir con los metros lineales de avance requeridos por la empresa mandante Lundin Mining.

Recomendaciones

Si bien los resultados entregados, cumplen con los objetivos planteados al inicio del trabajo. Estos valores constituyen un primer análisis de potenciales mejoras a futuro, o también, como guía de focos de mejoras en otras áreas al interior de la mina. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para futuros estudios y también, mejorar la productividad del ciclo de desarrollo horizontal, las cuales fueron detectadas en el proceso de diagnóstico en terreno:

- Se recomienda, aumentar la base de datos, incluyendo las operaciones restantes y el registro de los demás tipos de fortificación. También, se debe aumentar la cantidad de mediciones de tiempo de duración, inculcando a los trabajadores mejorar el registro de datos en sus hojas de trabajo. Así, se permite mejorar la calidad de la información y los resultados de la simulación.

- Como trabajo a futuro, se recomienda realizar un diagnóstico más detallado, siguiendo la filosofía Lean; confeccionar un mapa de cadena de valor, crear un registro automático y simultáneo del tiempo de duración de los trabajos y asignar funciones acordes a la realidad en terreno. Lo anterior permitirá no solo detectar las pérdidas productivas durante el ciclo de minado, sino también, mejorar la logística de utilización de recursos humanos y productividad de la empresa.

- Un mayor control en los materiales de fortificación, ya que se tiene una pérdida en elementos de fortificación que quedan en terreno y sin usar. Por ejemplo, en el mes de julio se tenía una pérdida del 17,6 % de malla que se retiraba de la bodega, pero no se tenía un registro de su uso -se encontraban en distintas posturas sin ocupar-. La finalidad es implementar una cultura de orden y limpieza de las zonas de trabajo, a través de charlas a comienzo de turno, y concientizar a los mineros con el uso correcto de los elementos de fortificación.

- Realizar capacitaciones a los mineros, que quieran ejecutar trabajos como operadores de equipos. Ello permitirá contar con un trabajador multifacético y así suplir la falta de operadores durante un turno, licencias médicas, no asistencia al trabajo, requerimiento del operador para otras áreas de labor, entre otras. Además, entrega una motivación a los trabajadores para seguir creciendo profesionalmente.

- Por último, se deben realizar mantenciones programadas más específicas de los equipos de perforación, incluyendo al operador del equipo y revisar el historial del tipo de panne mecánica de este, para realizar un plan completo de mantención. La finalidad del primer punto es aprovechar los conocimientos y experiencia del operador para detectar las fallas y actuar de forma preventiva y no correctiva, porque, en la actualidad, cuando el equipo presenta una falla, el operador tiene que esperar en el barrio cívico hasta que el equipo se encuentre operativo[17].

La finalidad es mejorar la metodología de trabajo establecida al interior de la mina subterránea, a través de propuestas simples de ejecutar y que a su vez promuevan una inclusión de los trabajadores a ciertas labores, aumentado la motivación de aquellos y una buena cultura de trabajo.

[17] Se basa en el bajo porcentaje de confiabilidad para los equipos de perforación, lo cual se veía reflejado en las altas tasas de fallas e interferencias, presentes durante los trabajos de dichos equipos. El diagnóstico, desarrollo y análisis completo para esta operación se puede revisar en la Sección de Anexos, ítem “Diagnóstico para la Operación de Perforación” para más detalles. De los resultados se puede desprender que el 85 % de las horas perdidas por una mantención no programada corresponden a “panne mecánicas”.

Bibliografía

Ackoff, Russell L (1956). The development of operations research as a science. *Operations Research*, 4(3), 265–295. 2.7

Barrios, Ccatamayo y Henry, Johnny (2017). Aplicación de filosofía lean en la preparación minera, mina el teniente codelco chile. 2.7

Bernaola Alonso, José; Castilla Gómez, Jorge; y Herrera Herbert, Juan (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. 2.4.4

Camhi, Jorge (2012). Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería block caving, caso estudio mina el teniente codelco chile. *Santiago*. 2.4.4

Forrest T. Gay, Colonel Corps of Engineers (1980). *Engineering and Design, Rock Reinforcement*. Department of the army, office of the chief of engineers, Washington, D.C. 2.4.2.1

Hamrin, Hans (2001). Underground mining methods and applications. *Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*. 2.2

Hudson, John A (1993). *Comprehensive rock engineering*. Número BOOK. Pergamon press. 2.4.2.1

Jimeno, Carlos López; Jimeno, Emilio López; y Bermúdez, Pilar García (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Carlos López Jimeno. 2.4.3

Laubscher, DH (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(10), 257–273. 2.4.2.1

Lavado, David (2014). Metodología de asignación de recursos en desarrollos minería subterránea. facultad de ciencias físicas y matemáticas, universidad de chile. santiago. *Memoria de Ingeniería Civil de Minas*. 2.7

Matti, H (1999). Rock excavation handbook. *Sandvik Tamrock Corp*. 2.4

Novikova, Julia (2004). Cartograía geológica con imágenes aster de depósitos tipo cafu) elaria, chile. 2.3

Onederra, I y Esen, S (2004). An alternative approach to determine the holmberg-persson constants for modelling near field peak particle velocity attenuation. *Fragblast*, 8(2), 61–84. 2.4.4

Rieger, Ana A. y Marschik, et al (2010). The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the mantoverde district, northern chile. *Economic Geology*, 105(7), 1271. 2.3

SERNAGEOMIN, SONAMI (2014). Guías de operación para la pequeña minería. 2.4.1, 2.4.2

Singh, Bhawani y Goel, Rajnish K (1999). *Rock mass classification: a practical approach in civil engineering*, volume 46. Elsevier. 2.4.2.1

Toledano de Diego, Asier; Mañes Sierra, Nagore; y García, Sergio Julián (2009). "las claves del éxito de toyota". lean, más que un conjunto de herramientas y técnicas. *Cuadernos de Gestión*, 9(2). 2.7

Toro Vega, Héctor Julio (2017). Programación multicriterio de excavaciones horizontales en el corto plazo. 2.7

Witenberg, Juan Prawda (1999). *Métodos y modelos de investigación de operaciones*, volume 1. Editorial Limusa. 2.7

A | Anexos

Antecedentes - Geología Distrital

Se presenta otra vista geológica del distrito de Candelaria, para tener un mayor detalle de la zona en la cual se desarrolló el estudio, con su respectiva geología.

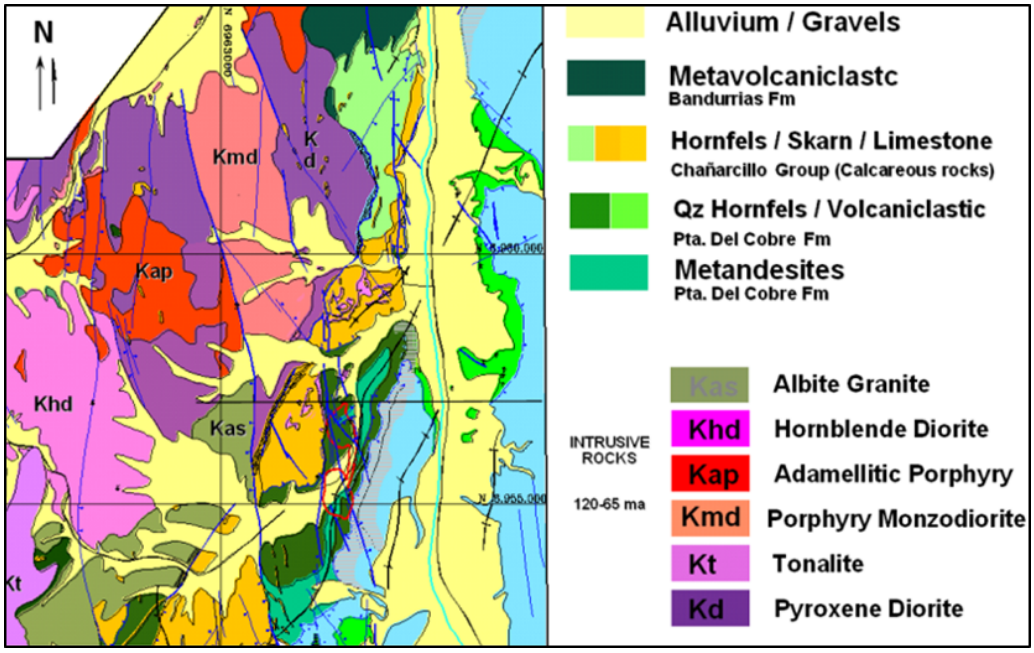


Figura A.1: Geología del distrito Punta del Cobre, correspondiente a la mina Candelaria.
(Fuente: Compañía minera Lundin Mining, 2014.)

Antecedentes - Metodología del ciclo de P&T

A continuación, se presenta la metodología de asignación de operaciones unitarias, establecidas al interior de la mina CN, las cuales no tienen variantes en su forma de trabajo.

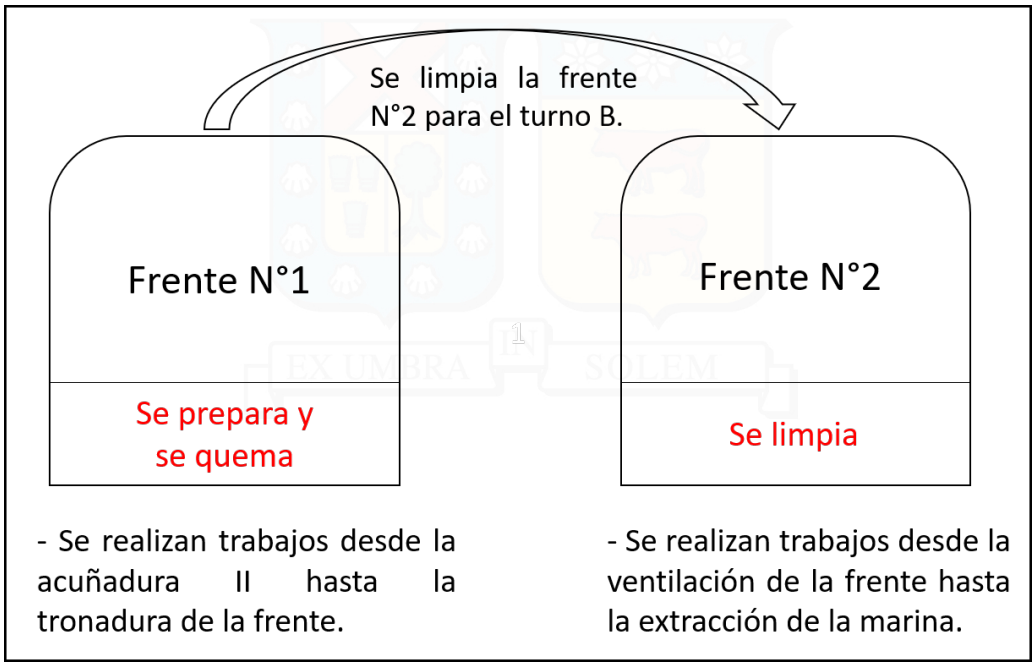


Figura A.2: Metodología de trabajo con dos frentes simultáneas, realizada durante el turno A.
(Fuente: Elaboración propia por medio del software PowerPoint.)

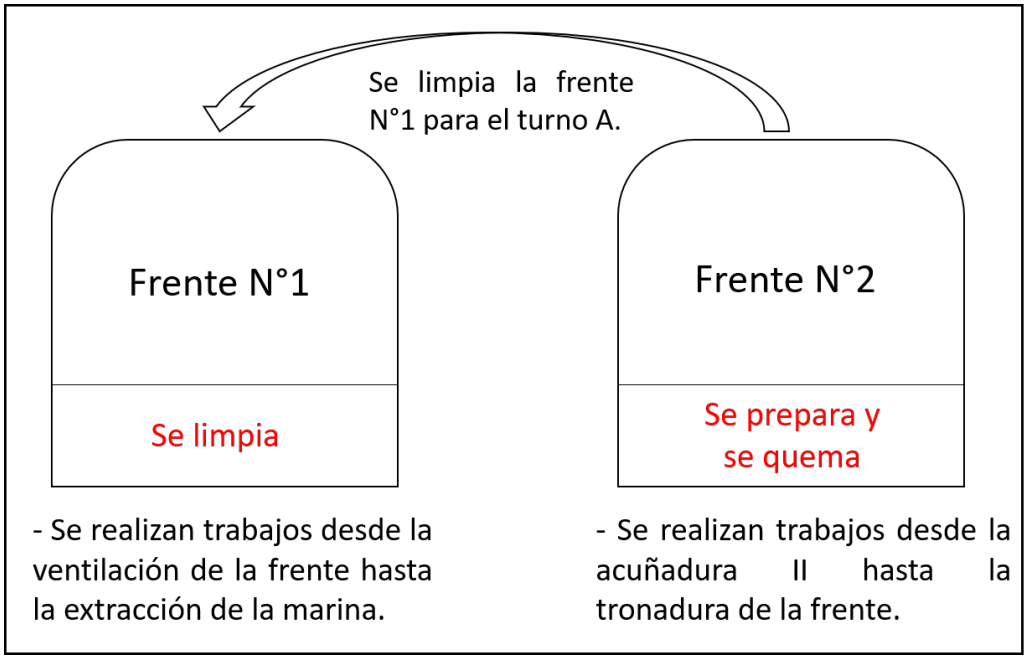


Figura A.3: Metodología de trabajo con dos frentes simultáneas, realizada por el turno B.
(Fuente: Elaboración propia por medio del software PowerPoint.)

Validación de Datos

El proceso de validación de datos, tiene como finalidad verificar si las muestras pertenecen a una distribución normal y así, establecer un valor que sea representativo para análisis posteriores. Por lo cual, se utilizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, que consiste en calcular la estadística de prueba "W", suponiendo que la muestra aleatoria proviene de una distribución normal.

$$W_c = \frac{b^2}{S^2} \tag{A.1}$$

En donde se ordena, de menor a mayor, una muestra aleatoria, obteniendo un vector muestral, de la siguiente manera:

$$(x_{(1)}, x_{(2)}, ..., x_{(n)}) \; siendo \; x_{(j)} \; el \; j - \acute{e}simo \tag{A.2}$$

Y la variable S^2 es la varianza muestral.

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{a})^2 \tag{A.3}$$

Por otro lado, para calcular b se debe establecer si los "n" son pares o impares.

1. **Si *n* es par, *n*=2*k***

$$b = \sum_{i=1}^{k} a_{n-i+1}(y_{n-i+1} - y_i) \tag{A.4}$$

Donde los valores a_{n-i+1} están dados en la tabla final.

2. **Si *n* es impar, *n*=2*k*+1**

$$b = a_n(y_n - y_1) + a_{n-1}(y_{n-1} - y_2) + ... + a_{k+2}(y_{k+2} - y_k) \tag{A.5}$$

Donde el valor de y_{k+1}, la media muestral, no entra para el cálculo de b.

Por lo tanto, se rechazará la hipótesis nula H_0 sí no se cumple con la siguiente regla.

$$W_c < W_T \tag{A.6}$$

$$P - valor < \alpha \tag{A.7}$$

En otras palabras, no hay suficiente evidencia estadística para decir que la distribución de los datos es normal y donde, α es el nivel de significancia.

En el Capítulo 4, se presentó el proceso de validación de datos, los cuales fueron utilizados para elaborar la Tabla 4.6, columna de “Tiempo estimado”. Como ya se mencionaba, las mediciones de cada muestra se sometieron a un análisis de estadística descriptiva, para obtener aquellos valores más relevantes y que explican el comportamiento de dichas mediciones. También, se sometieron a la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, en donde se considera un valor Alpha o de significación del 0,05. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5.

De los valores se puede desprender que, la probabilidad crítica “p” para las 20 muestras tiene un valor mayor a 0,05, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula la cual hace referencia a que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente. Además, cabe mencionar que no se encontraron datos atípicos en cada una de las muestras, lo cual también confirma una distribución más homogénea y normalizada.

A continuación, se presentan los gráficos Q-Q de probabilidad normal, mostrando la tendencia de la distribución de los datos, para cada una de las 20 muestras.

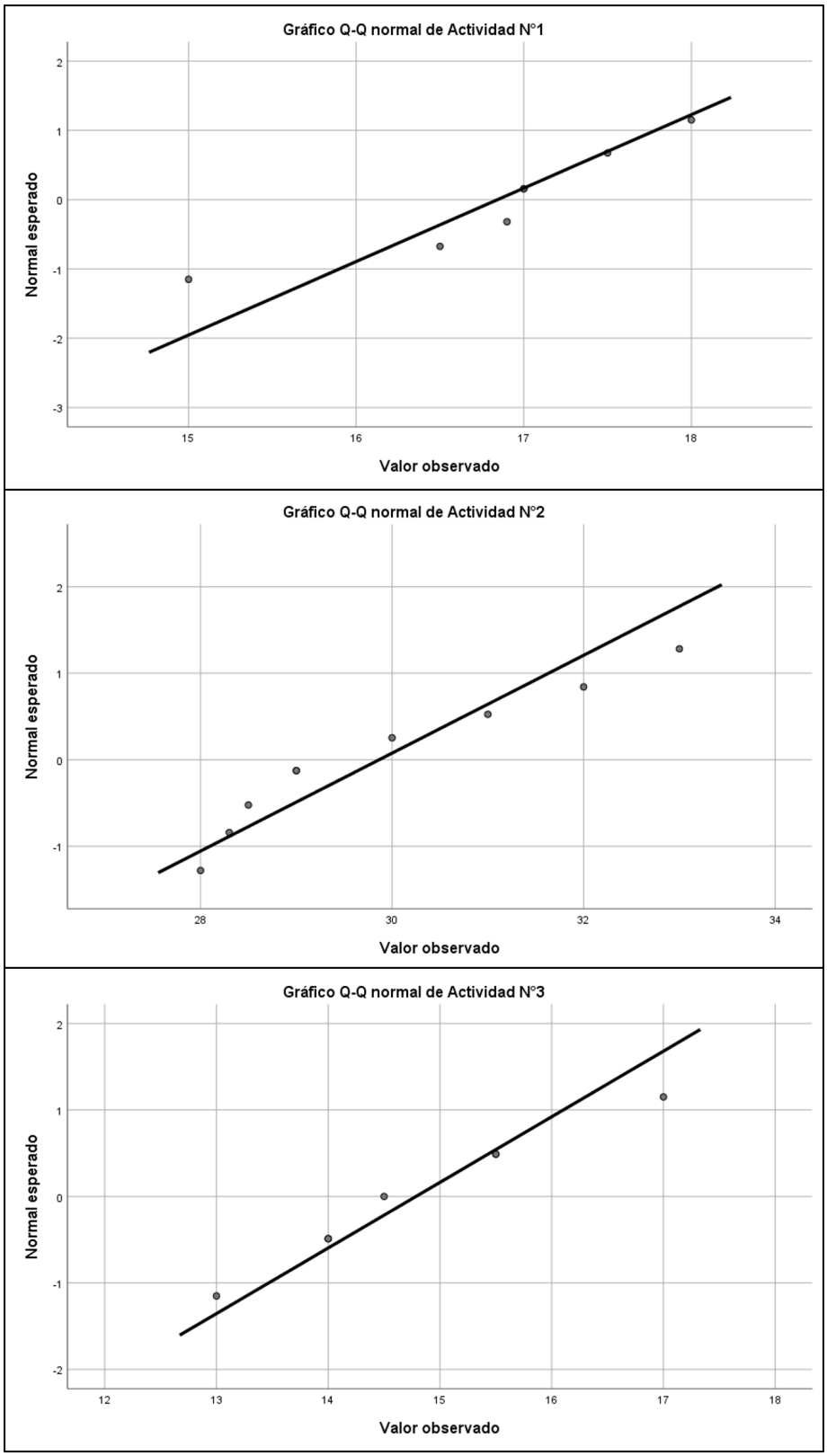


Figura A.4: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°1, 2 y 3.

(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

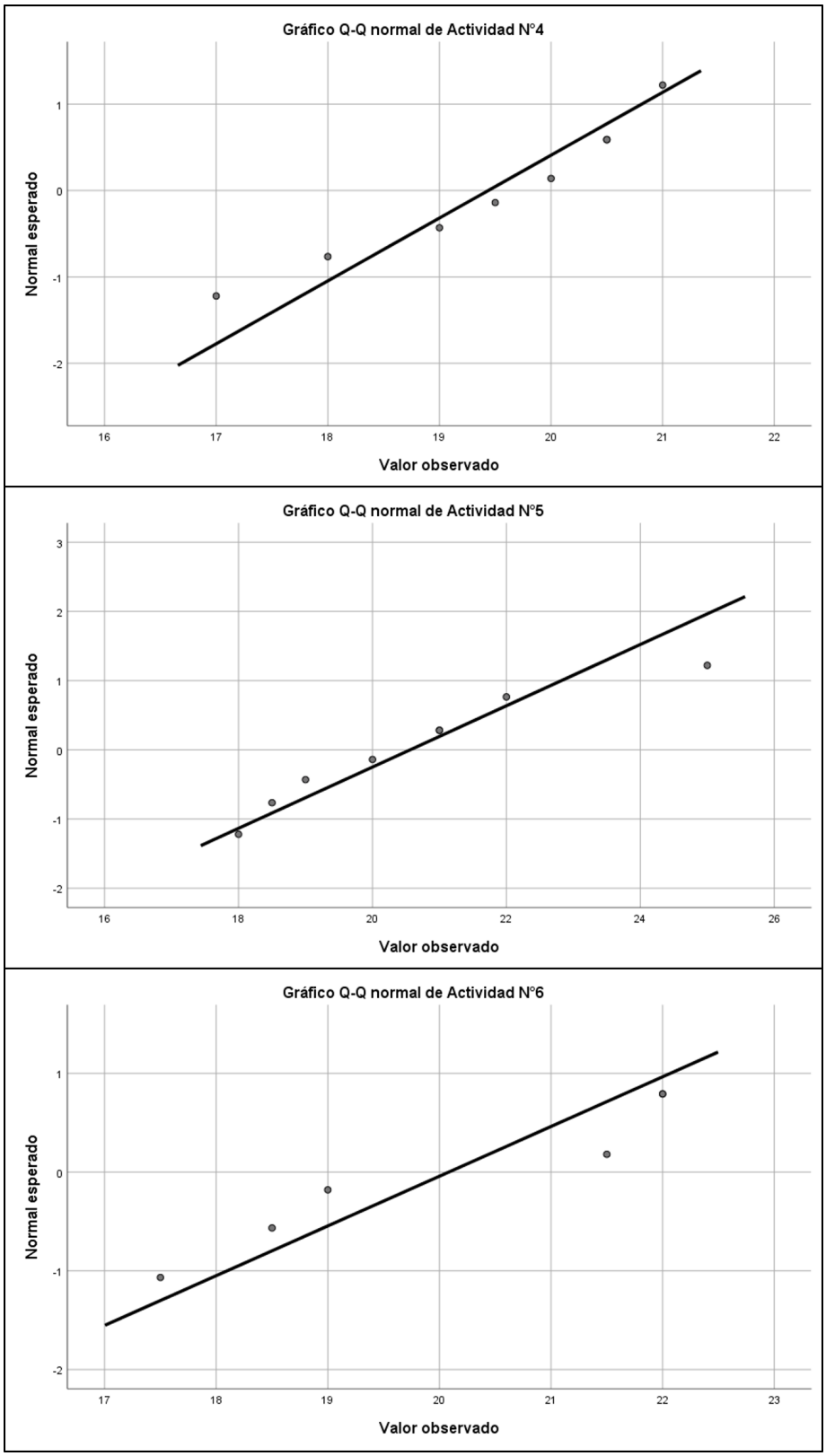


Figura A.5: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°4, 5 y 6.

(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

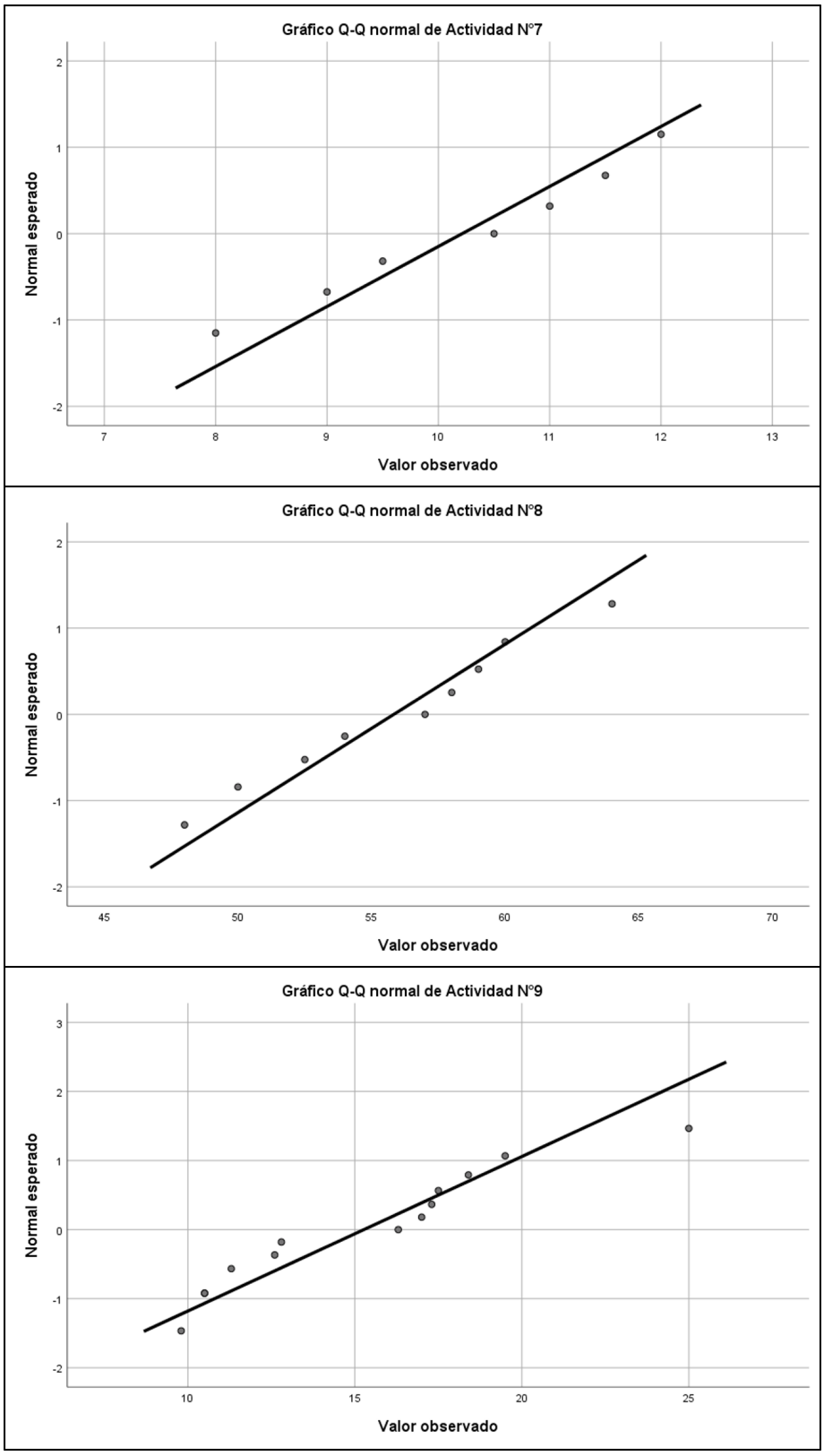


Figura A.6: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°7, 8 y 9.

(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

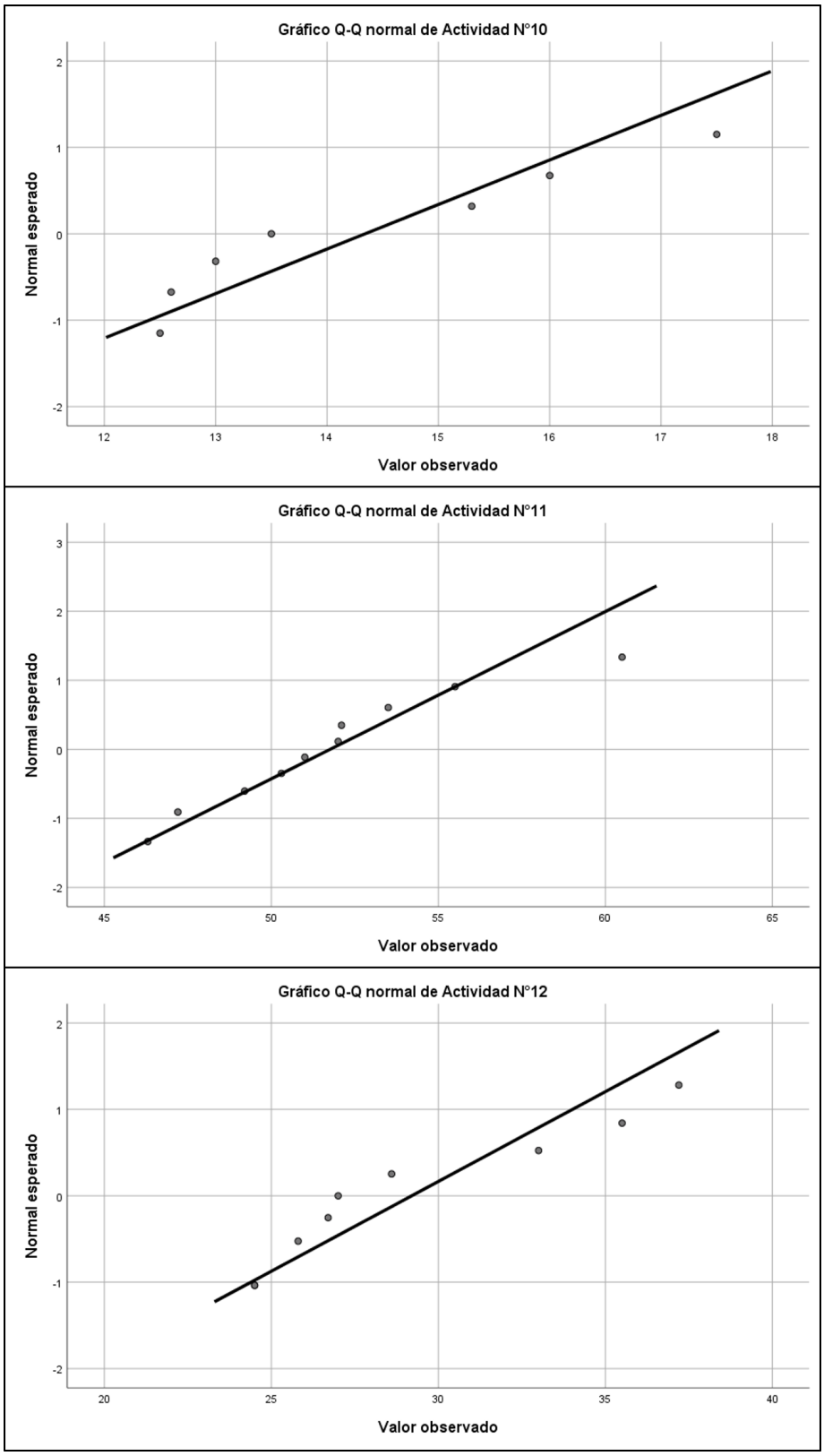


Figura A.7: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°10, 11 y 12.

(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

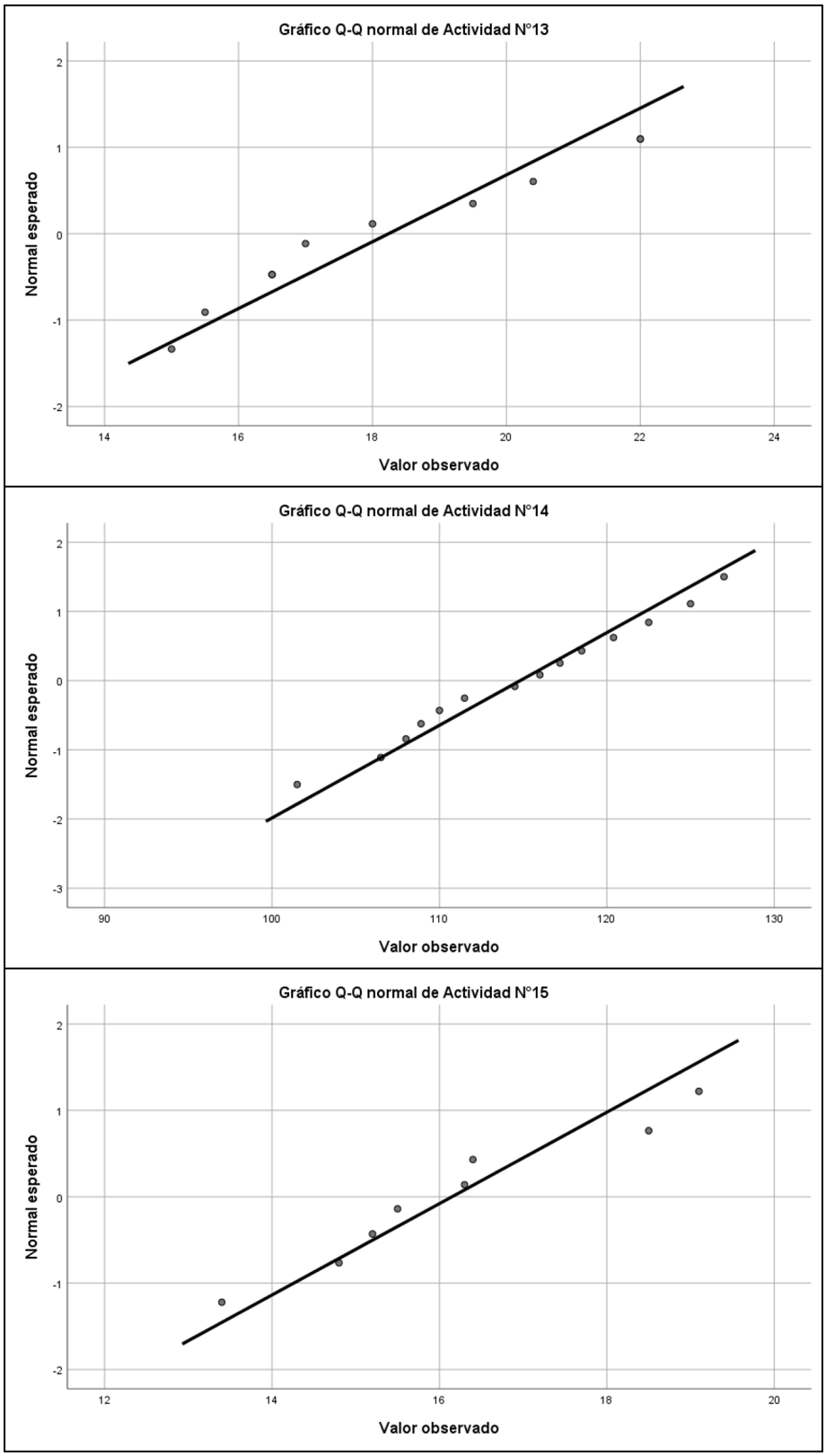


Figura A.8: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°13, 14 y 15.

(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

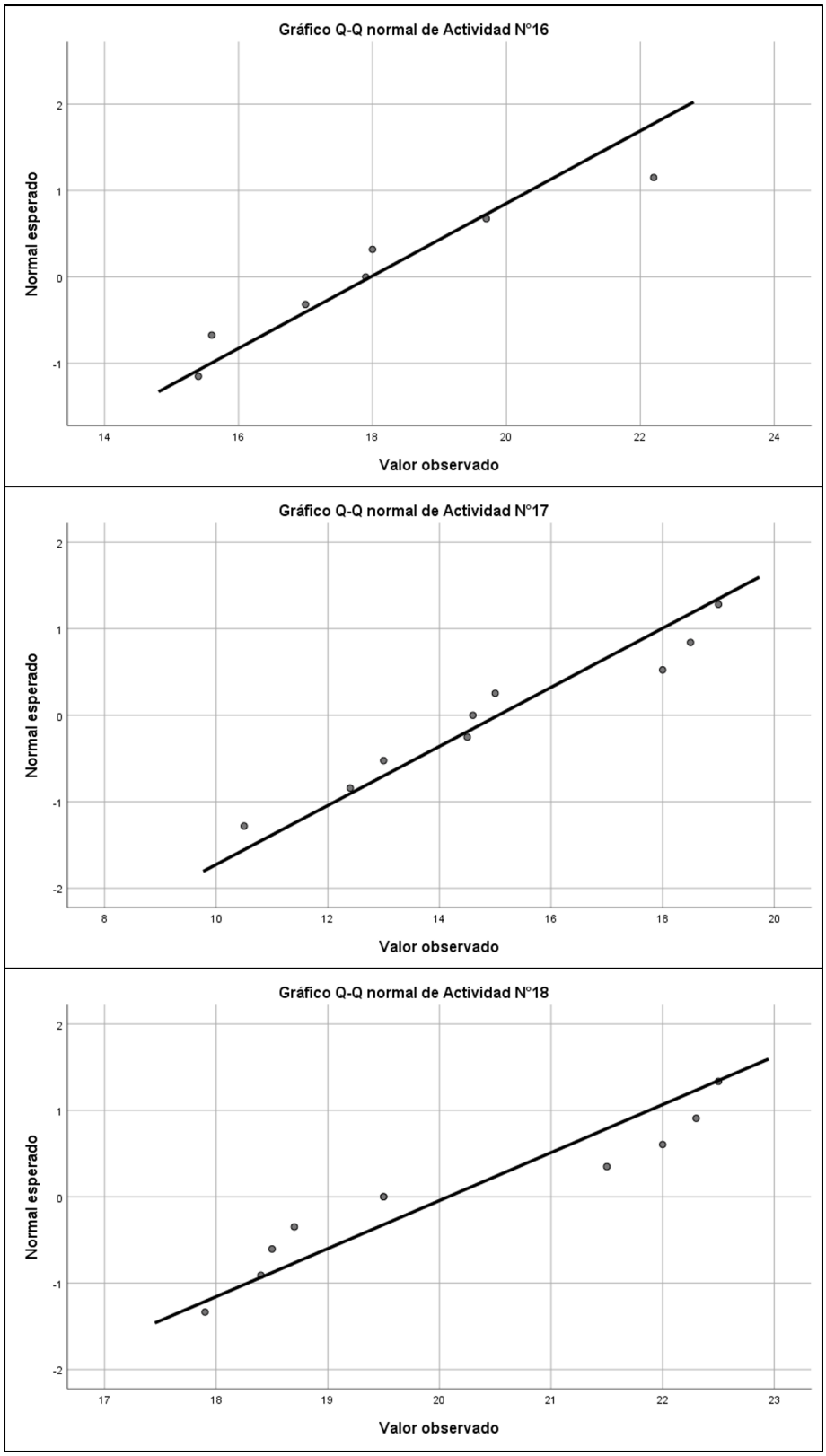


Figura A.9: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°16, 17 y 18.

(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

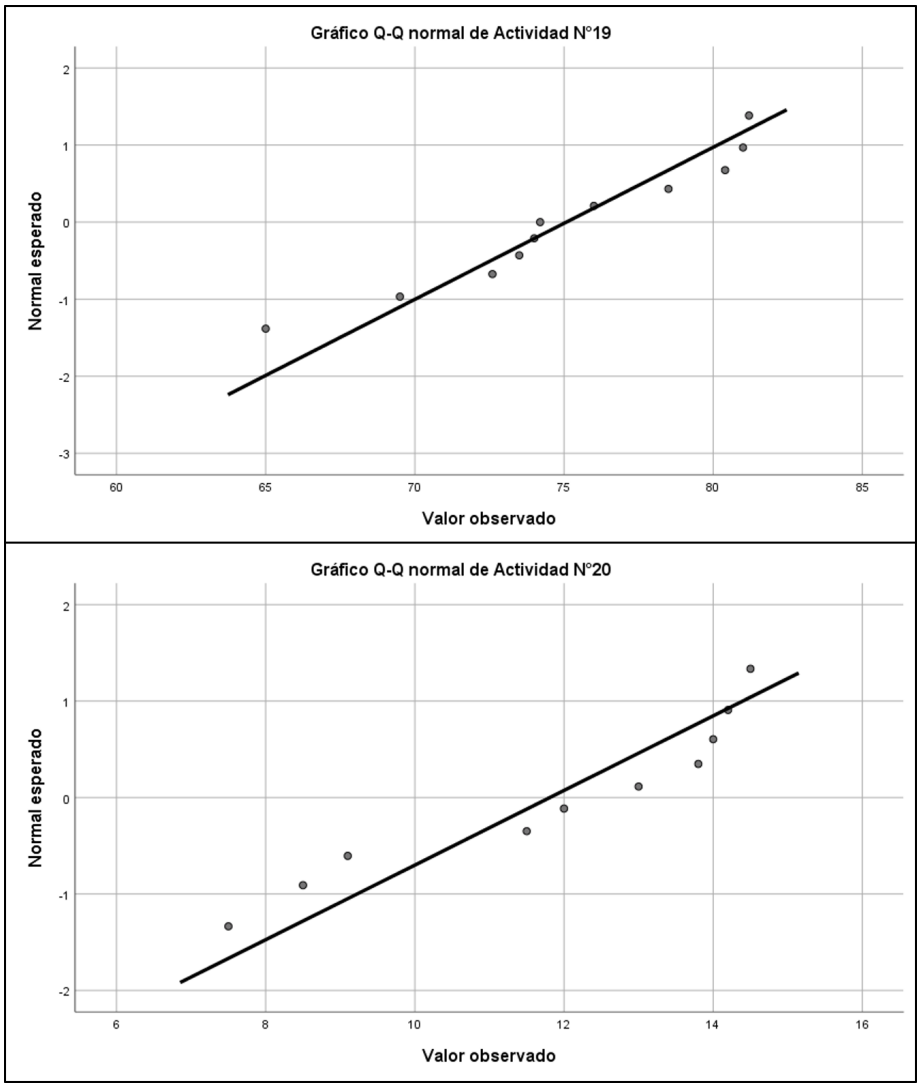


Figura A.10: Gráfico Q-Q de probabilidad normal, que muestra la tendencia a una distribución normal de los datos de las muestras N°19 y 20.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software IBM SPSS Statistics.)

Por último, en las Figura A.4, Figura A.5, Figura A.6, Figura A.7, Figura A.8, Figura A.9 y Figura A.10, se puede comparar la distribución de las muestras de datos, con una distribución normal esperada. También, se puede apreciar, en los 20 gráficos una correlación de los datos medidos con respecto a la recta normal esperada. Cabe destacar que una alta cantidad de datos alejados de la recta, implicaría una baja correlación de dichos datos con la distribución normal que se desea corroborar, lo cual en este caso no ocurre. Finalmente, los gráficos mencionados, tienen como finalidad respaldar los valores de la probabilidad crítica "p", que indican una distribución normal de los datos de cada muestra.

Diagnóstico para la Operación de Perforación

En el diagnóstico a la operación de perforación de la frente, se chequeó si existía una secuencia operacional establecida como procedimiento de trabajo, ya sea previo, durante y después de la perforación. Se revisó el procedimiento establecido y se concluyó que cumple con los objetivos de seguridad, control de riesgos y chequeos de equipos previos al uso. Por lo tanto, no se interferirá en la forma de desarrollar la operación, porque se considera eficiente.

Por otro lado, se revisan los índices operacionales de los equipos, en donde se recopiló la información de los reportes diarios de los equipos de perforación -en los meses de junio y julio- considerando un total de 9 equipos jumbos, es decir, 540 reportes para el mes de junio y 558 reportes para el mes de julio. Cabe mencionar que se tiene estipulado que, de los 9 jumbos uno es utilizado para cachorreo[18] y el otro para trabajos especiales de desquinches, por lo tanto, hay 7 equipos dedicados a la perforación de frente. En los reportes se entrega el detalle de las actividades realizadas por el operador, durante un turno, con su respectivo tiempo por actividad que se haya ejecutado. Los parámetros utilizados en los reportes se pueden apreciar en la Tabla A.5. Para los siguientes análisis de índices operaciones se tomaron las siguientes agrupaciones de actividades, las que se pueden observar en la Tabla A.1.

Clase de hora	Descripción de tiempo
HE	Hora efectiva
HPEFO	Hora pérdida por falla operacional
HPEFS	Hora pérdida por falta suministro
HPEPP	Hora pérdida por proceso
HMTP	Hora mantención planificada
HMTNP	Hora mantención no planificada

Tabla A.1: Sigla de las clases de hora que se utilizan y su respectiva descripción de tiempo.

Como ya se mencionaba, en la Tabla A.5, aparece la totalidad de actividades que podría ejecutar el equipo durante un turno, con su respectiva sigla de clase de hora, para así, verificar cuales son las actividades de cada una de las 6 agrupaciones realizadas en la Tabla A.1.

Luego, se consideró un tiempo cronológico de 720 [h] y 744 [h] para los meses de junio y julio, respectivamente, por equipo; se procedió a realizar la suma de tiempo total de los equipos disponibles y la suma individual de las clases agrupadas -realizadas en las Tabla A.1- con respecto al detalle de cada actividad ejecutada durante el mes. En otras palabras, se calculó la distribución de horas asociada al tipo de parámetro o clase de uso del tiempo. A continuación, se presentan los resultados en la Tabla A.2, para los meses de junio y julio (cuyos valores fueron agrupados), en donde se muestra el porcentaje de horas utilizadas en cada una de las clases de tiempos.

[18] El cochorreo consiste a aquel trabajo de perforación realizado a una colpa para cargar con explosivo y reducir su tamaño, también se conoce como tronadura secundaria.

Clase de hora	Total de datos (junio y julio) [%]
Hora efectiva	25,5 %
Hora pérdida por falla operacional	21,4 %
Hora pérdida por falta suministro	0,5 %
Hora pérdida por proceso	18,0 %
Hora mantención planificada	6,1 %
Hora mantención no planificada	28,5 %

Tabla A.2: Sigla de las clases de hora con su respectivo porcentaje de horas de uso.

Se puede apreciar que existe un alto porcentaje de horas perdidas por mantención no planificada, falla operacional y pérdida por proceso. A raíz de este análisis se detectó la presencia de interferencias[19] que afectan directamente la continuidad de la operación, lo cual también se detectó en terreno -mientras se realizaba el registro y recopilación de datos-. Por este motivo, se revisó el detalle de los sucesos considerados como interferencia; también se analizaron los porcentajes de distribución de tiempo de las demás clases de hora, realizando las respectivas comparaciones del porcentaje de hora planificadas para cada clase. Por último, se clasificaron las actividades consideradas como interferencia, estas se puede visualizar en la Tabla A.3.

N°	Actividad	Clase
1	Sin energía eléctrica	Hora pérdida por falta de suministro (HPEFS)
2	Sin agua	
3	Sin aire comprimido	
4	Panne eléctrica	Hora de mantención no planificada (HMTNP)
5	Panne mecánica	
6	Panne neumática	
7	Panne operacional	
8	Falta de operadores	Hora pérdida por falla operacional (HPEFO)
9	Espera de marcación de frente	
10	Espera de frente o postura	
11	Espera por acuñadura o ventilación	
12	Stand By sin postura	

Tabla A.3: Clasificación de las actividades consideradas como interferencia.

El desglose de horas de la Tabla A.2, muestran que las actividades que corresponden a las horas perdidas por falta de suministro (HPEFS) y hora perdida por falla operacional (HPEFO), se desprecian para los análisis que continúan, ya que en caso de las HPEFS las pérdidas son insignificantes y se encuentran contempladas dentro del porcentaje de error de la planificación, cuyo valor es de un 2 %, y con respecto a las HPEFO, el 89 % de esas horas corresponden a espera de frente o postura y Stand By sin postura, lo

[19] Se consideró como interferencia a los sucesos y actividades fuera del desarrollo normal de las operaciones unitarias, provocando una inactividad en el proceso.

cual dependerá netamente de la logística en el uso de los equipos y que se tendrá en cuenta para análisis posteriores, disminuyendo este porcentaje y aumentando las horas efectivas de trabajo.

Por otro lado, la variable de hora de mantención no planificada, tiene valores mayores a la mínima contemplada dentro de la planificación de utilización de los equipos. Cabe señalar que, por norma de la empresa, se contempla como mínimo una disponibilidad mecánica de un 85 % para los equipos de perforación, por lo tanto, se asigna un 15 % del tiempo a la mantención planificada de dichos equipos. Sin embargo, en los meses de junio y julio se tiene un 75 % y 73 % de disponibilidad mecánica y un 35 % y 34 % de utilización respectivamente. Este bajo valor de disponibilidad mecánica no se compensa con el aumento en el porcentaje de las horas de mantención planificada, como se pude apreciar en los resultados de la Tabla A.2, por lo tanto, la disminución de la disponibilidad mecánica se ve afectada directamente por la horas de mantención no planificadas (HMTNP).

Los valores de la Tabla A.2, muestran un porcentaje de horas de mantención no planificadas, mayor a la mínima contemplada dentro de la planificación de utilización de los equipos. Para buscar la causa raíz del aumento en el porcentaje de HMTNP, se realizó un diagrama de Pareto, con la finalidad de identificar el origen del problema y ver cómo afecta al tiempo de la operación unitaria. Las actividades que componen la variable HMTNP consisten en la panne mecánica, panne operacional, panne eléctrica y panne neumática como se visualiza en la Tabla A.3. El detalle del diagrama de Pareto, que agrupa los datos del mes de junio y julio, se puede apreciar en la Figura A.11.

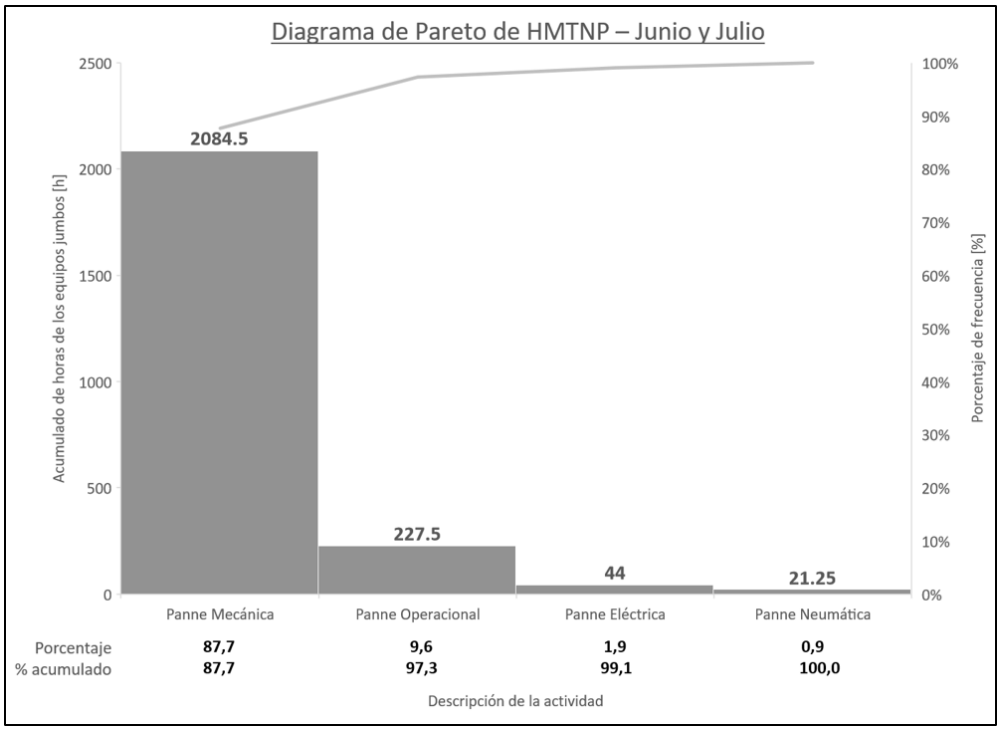


Figura A.11: Diagrama de Pareto de las HMTNP de los equipos jumbos del mes de junio y julio.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software Excel.)

En el diagrama de Pareto, se puede apreciar que para los equipos "jumbo" el problema más común y que abarca más del 85 % de las horas, corresponden a la "panne mecánica" y en menor cantidad la "panne

operacional". Se verificó en los reportes mecánicos y con el jefe de taller mecánico, que el alto porcentaje de falla mecánica, se debe a que no se cumple al 100 % con la mantención programada de los equipos y se corrobora con los valores en la Tabla A.2, donde la clase "Hora de mantención planificada" no supera el 15 % en ambos meses.

Cabe mencionar que dichas mantenciones, no contemplan revisión y cambio de los componentes sometidos a un mayor desgaste, como flexibles, sellos de agua, culatines, entre otros, y aquellos son los elementos que más fallan cuando ocurre una panne mecánica. Este tipo de mantención más específica, no se realiza, producto de la alta demanda que tienen los equipos y la falta de tiempo durante el turno. Como se puede apreciar en la Tabla 4.6 ítem N°20 la finalización de la operación de perforación es a las 19:19:00 o 07:19:00 horas, lo cual no da la holgura suficiente para realizar una mantención completa. También, se calculó el tiempo promedio de duración de la "panne mecánica" mientras se realiza la operación de perforación de la frente, el valor es de 33,1 [min] con una desviación estándar de 9,7 [min], este valor condiciona el disparo de una frente durante el turno.

Finalmente, se puede desprender que una de las causas principales de pérdidas de disparo durante un turno, es el alto valor de las HMTNP que pueden afectar directamente los programas de planificación de metros de avance, para lo cual se realizó un catastro, para ver si realmente afectaba dicho programa mensual.

En la planificación, se establecen 5 disparos de avance por turno para cumplir con la cantidad de metros exigidos por labores de preparación y galerías de exploración, los cumplimientos para los meses de junio y julio se pueden apreciar en la Tabla A.4.

	Fecha	Galerías de preparación	Galerías de exploración
Programa establecido [m]	Junio	750	90
	Julio	800	100
Desarrollo real del programa [m]	Junio	796,6	34,7
	Julio	760,8	66,3
Cumplimiento total del mes [%]	Junio	98,96	
	Julio	91,90	

Tabla A.4: Cumplimiento del programa operativo mensual para los meses de junio y julio.

Dentro de planificación elaborada por la empresa contratista, se consideró una sobre estimación en la cantidad de metros exigidos por la empresa mandante, al estipular 5 disparos por turno, pero pese a eso los resultados para ambos meses (junio y julio) no fueron suficientes cumplir al 100 % con el programa mensual y el promedio de avance efectivo era de 3,5 [m] y 3,3 [m] respectivamente, para un avance teórico de 3,8 [m]. Estos resultados ratifican la condicionante antes mencionada, que producto de las HMTNP pueden disminuir los metros de avance, de todas formas, falta corroborar las causas asociadas a las pérdidas de los disparos, durante los turnos de los meses de junio y julio, sin embargo, se deben establecer medidas para disminuir el alto porcentaje asociado a las HMTNP.

Parámetros de tiempos utilizados

Clase de hora	Descripción del proceso
HE	Chequeo de equipo
HE	Instalación / Desarme
HE	Cambio de Bit
HE	Perforación Frente
HE	Perforación Perno
HE	Instalación Perno
HE	Cachorreo / Desquinche
HE	Repaso de tiros
HPEFO	Atascamiento
HPEFO	Rescate de Barra
HE	Petrolear
HE	Traslado de Equipo
HPEFS	Sin Energía Eléctrica
HPEFS	Sin Agua
HPEFS	Sin Aire Comprimido
HPEFS	Sin Combustible
HPEFS	Sin aceros de perforación
HPEFO	Espera de marcación de frente
HPEFO	Espera por acuñadura
HPEFO	Espera por Ventilación
HPEFO	Espera de frente o postura
HPEPP	Entrada / Salida Turno
HPEPP	Charla / Reunión
HPEPP	Colación
HPEFO	Stand By Sin Postura
HPEFO	Sin Operador
HMTP	Mantención Mecánica
HMTP	Mantención Eléctrica
HMTNP	Panne Eléctrica
HMTNP	Panne Mecánica
HMTNP	Panne Neumático
HMTNP	Panne Operacional
HPEPP	Evacuacion Rajo
HE	Colocación de Malla
HPEFS	Espera Mainsa

Tabla A.5: Detalle de la distribución de horas establecidas en los reportes entregados por los operadores, con respecto a las actividades realizadas y las clases de horas.

Resultados De La Simulación

A continuación, se presentan los valores obtenidos de la simulación por 30 días, de las dos propuestas, obtenidas por medio del software MATLAB.

```
Command Window
>> simutesis
Ingresar la cantidad de días que se desea simular: 30
nt =
       43200
Cantidad de frentes desarrolladas en los días ingresados para la
Frente1 =
   40.0000
Cantidad de frentes desarrolladas en los días ingresados para la
Frente2 =
   40.0000
fx >>
```

```
Command Window
>> simutesis3frentes
Ingresar la cantidad de días que se desea simular: 30
nt =
       43200
Cantidad de frentes desarrolladas en los días ingresados para la
Frente1 =
   30.7900
Cantidad de frentes desarrolladas en los días ingresados para la
Frente2 =
   30.0000
Cantidad de frentes desarrolladas en los días ingresados para la
Frente3 =
   30.0000
fx >>
```

Figura A.12: Resultados de la simulación para las dos propuestas de 2 y 3 frentes disponibles.
(Fuente: Elaboración propia mediante el software MATLAB.)