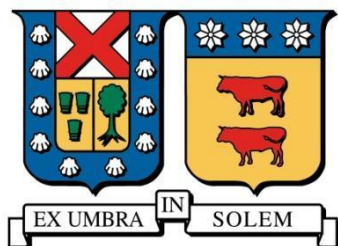


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



“APLICACIÓN DE METODOLOGÍA *LEAN*
MANAGEMENT EN UNIDAD DE
PREACONDICIONAMIENTO DE CODELCO CHILE
DIVISIÓN EL TENIENTE”

Presentado por

PATRIZIO RICARDO JAÑA SALAZAR

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía: Ing. Víctor Encina Montenegro

Profesor Co-Referente: Dr., Rodrigo Estay Huidobro

Septiembre 2022

RESUMEN EJECUTIVO

A medida que Mina El Teniente van profundizando su explotación se encuentra roca primaria con mayor dureza y cada vez con menos estructuras abiertas. Dada esta condición es que la División El Teniente decide implementar el preacondicionamiento con hidrofracturamiento hidráulico con el fin de intervenir la roca in situ, buscando mejorar la hundibilidad de la explotación y disminuyendo la magnitud de los eventos sísmicos provocados por la propia intervención del macizo.

En este ambiente, el proceso de fracturamiento hidráulico se vuelve fundamental para el avance de la explotación minera, ya que ningún sector de la división puede ser explotado si anteriormente no se ha realizado fracturamiento hidráulico en él, siendo una actividad prioritaria para el crecimiento de El Teniente y que debe ser lo más óptimo y eficiente para no generar atrasos en otras áreas de la división.

El objetivo principal es mejorar el rendimiento del proceso de fracturamiento mediante la metodología Lean Management, la cual ha dado buenos resultados en otras áreas de la división y de la empresa y consiste en implementar planes de acción orientados a lograr que la unidad pueda cumplir los requerimientos del plan anual de incorporación de áreas hundidas.

Con los distintos planes de acción implementados se busca generar una estructura de operación que permita tener bases sólidas para mantener estas herramientas en el futuro, además de buscar mejoras en todas las áreas de la unidad, identificando pérdidas del proceso, fortaleciendo la comunicación y coordinación con otras áreas, la planificación del uso equipos, incentivando a los trabajadores a hacerse parte del proceso.

Los resultados obtenidos luego de la implementación de la metodología Lean comprueban los beneficios de su aplicación, aumentando el rendimiento del proceso en general y de los equipos en particular, permitiendo cumplir las metas establecidas en el plan anual.

ABSTRACT

As the exploitation of Mina El Teniente delves deeper, primary rock of increased hardness and progressively fewer open structures is encountered. Given this condition, the El Teniente Division decides to implement hydraulic hydrofracturing as a preconditioning measure. The goal is to intervene with the in-situ rock, aiming to enhance the fragmentation of the ore for easier excavation and reduce the magnitude of seismic events caused by the rock mass manipulation itself.

In this context, the hydraulic fracturing process becomes pivotal for the advancement of the mining operation. No sector within the division can be exploited without prior hydraulic fracturing. This activity is prioritized for El Teniente's growth and must be executed optimally and efficiently to avoid delays in other areas of the division.

The primary objective is to enhance the efficiency of the fracturing process through Lean Management methodology, which has yielded favorable outcomes in other sectors of the division and the company. This approach involves implementing targeted action plans to ensure that the unit can meet the requirements of the annual plan for incorporating mined-out areas.

The various action plans are aimed at establishing an operational framework that provides a solid foundation for the maintenance of these tools in the future. Additionally, the plans seek improvements across all unit areas by identifying process losses, reinforcing communication and coordination with other departments, planning equipment utilization, and encouraging employees to become integral parts of the process.

The outcomes observed following the implementation of the Lean methodology validate the benefits of its application, increasing the overall process efficiency and the performance of specific equipment. This enables the achievement of the objectives outlined in the annual plan.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Objetivos.....	11
1.1.1 Objetivo General	11
1.1.2 Objetivos Específicos.....	11
1.2 Alcances.....	11
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1 Diagnóstico inicial de la unidad PA	12
2.2 Análisis de puntos críticos	12
2.3 Indicadores de desempeño.....	13
2.4 Generación de planes de acción	13
2.5 Implementación	14
3. ESTADO DEL ARTE	14
3.1 Preacondicionamiento.....	14
3.1.1 Fracturamiento Hidráulico (FH).....	15
3.1.2 Equipos y componentes para el fracturamiento hidráulico.....	18
3.2 Lean Management.....	20
3.2.1 Desperdicios	21
3.2.2 Actividad incidental.....	21
3.2.3 Herramienta C+.....	22
4. MOTIVACIÓN.....	23
5. DESARROLLO DEL ESTUDIO	24
5.1 Diagnóstico inicial de la unidad PA	24
5.2 Análisis de puntos críticos	30

5.2.1	Máximo potencial.....	30
5.2.2	Aspiración.....	31
5.2.3	Puntos críticos.....	32
5.3	Condición inicial.....	33
5.3.1	Indicadores de desempeño.....	33
5.3.2	Perdida por disponibilidad.....	34
5.3.3	Perdidas por capacidad productiva.....	36
5.3.4	Perdidas por calidad.....	37
5.3.5	Eficiencia general de los equipos (OEE).....	37
5.4	Generación de planes de acción.....	39
5.4.1	Estándar inicio/fin de turno.....	39
5.4.2	Traslado de personal.....	40
5.4.3	Tiempo entre pozos.....	40
5.4.4	Mantenimiento y reparación de equipos.....	41
5.4.5	Ventanas de operación para obras de construcción.....	41
5.4.6	Detención por falta de agua.....	41
5.4.7	Eventos no deseados.....	42
5.4.8	Perdidas por calidad.....	42
5.4.9	Plan anual y mensual de fracturamiento.....	42
5.5	Implementación.....	43
5.5.1	Tablero de control N°3.....	43
5.5.2	Base de datos única.....	44
5.5.3	Plan de asignaciones de personal y sitios de trabajo.....	44
5.5.4	Plan de trabajo conjunto con contratista de perforación.....	45
5.5.5	Reunión de planificación.....	45
5.5.6	Estanques.....	45
5.5.7	Manipulación de <i>Packers</i>	46
5.5.8	Estudio sobre bomba de mayor potencia.....	46
5.5.9	Actualización del Plan de Avance.....	47
5.5.10	Estudio de trabajo en paralelo a más de un pozo.....	49
6.	RESULTADOS.....	50
6.1	Aspiración.....	50

6.2	Eficiencia general de los equipos (OEE).....	51
6.3	Resultados generales	52
6.4	Plan anual de fracturación	55
6.5	Simulación en <i>Arena Simulator</i>	56
7.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	61
8.	CONCLUSIONES	62
9.	RECOMENDACIONES	63
10.	REFERENCIAS	64
11.	ANEXO A (TÍTULO).....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO DIAGNÓSTICO ADMINISTRATIVO	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Concepto de Preacondicionamiento en mina subterránea. Fuente: Sougarret et. 2004 ..	15
Figura 3.2: Representación del FH en la propagación del hundimiento. Fuente: Baez et al., 2010..	16
Figura 3.3: Representación del FH con relación a la sismicidad. Fuente: Baez et al., 2010.	16
Figura 3.4: Representación esfuerzos sobre el macizo rocoso. Fuente: Nolen-Hoeksema., 2010....	17
Figura 3.5: Esquema descriptivo de la operación de fractura, con detalle del dispositivo típico. Fuente: Baez., 2010.	18
Figura 3.6: Sonda utilizada para realizar fracturamiento hidráulico. Fuente: Unidad PA, 2017.	19
Figura 3.7: Generación de valor añadido. Fuente: Dirección de Excelencia Operacional, 2017.....	21
Figura 4.1: Plan anual por mes de los pozos a fracturar. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos a partir de estadística de producción de la Unidad de Preacondicionamiento, 2019.....	23
Figura 4.2: Plan anual acumulado de los pozos a fracturar. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos a partir de estadística de producción de la Unidad de Preacondicionamiento, 2019	23
Figura 5.1: Plan de fracturamiento en el nivel de hundimiento de la Mina Esmeralda. Fuente: Superintendencia de Estudios Geomecánicos, 2019.....	24
Figura 5.2 Diagrama de flujo de hidrofracturamiento. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	26
Figura 5.3: Ejemplo de estándar inicio de turno. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019	27
Figura 5.4: Estudio de propagación de fracturas. Fuente: Gerencia de Recursos Mineros, 2019.....	27
Figura 5.5: Planilla de fractura. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.....	28
Figura 5.6: Tablero de control N°1 de fracturas. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019. .	29
Figura 5.7: Estructura de la herramienta OEE. Fuente: Quiroz, 2016	29
Figura 5.8: Estrategia y criterios de operación. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019....	33
Figura 5.9: Frecuencia de horarios de inicio y fin de turno. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	35
Figura 5.10: Fracturas acumuladas en el tiempo. Fuente: Elaboración propia, 2019.	35
Figura 5.11: OEE del proceso de preacondicionamiento. Fuente: Elaboración propia, 2019.	37
Figura 5.12: OEE del proceso de preacondicionamiento en horas y minutos. Fuente: Elaboración propia, 2019	38
Figura 5.13: Tablero N°3 de tareas misceláneas. Fuente: Unidad de preacondicionamiento, 2019..	43
Figura 5.14: Base de datos de fractura. Fuente: Unidad de preacondicionamiento, 2019.	44
Figura 5.15: Propagación de la fractura en el tiempo. Fuente: Superintendencia de Estudios Geomecánicos, 2019.....	46
Figura 5.16: Planificación actualizada del plan de avance. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.	47

Figura 5.17: Planificación acumulada del plan de avance. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019. 48

Figura 5.18: Pozos a fracturar por sector. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019..... 48

Figura 6.1: OEE del proceso de preacondicionamiento. Fuente: Elaboración propia, 2019..... 51

Figura 6.2: Comparación de tiempos entregados por tablero de control N°1 para periodo 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019..... 52

Figura 6.3: Comparación de fracturas acumuladas entre 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019. 54

Figura 6.4: Comparación de fracturas acumuladas entre 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019. 54

Figura 6.5: Plan anual mensual en 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019..... 55

Figura 6.6: Plan anual acumulado de los pozos a fracturar. Fuente: Elaboración propia, 2019. 55

Figura 6.7: Fracturas realizadas por mes en el periodo el 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019. 55

Figura 6.8: Fracturas acumuladas realizadas en el año 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019..... 56

Figura 6.9: Fracturas por mes, separando el plan con NNM. Fuente: Elaboración propia, 2019. 56

Figura 6.10: Flujo de tareas para la simulación. Fuente: Elaboración propia, 2019..... 57

Figura 6.11: Resultados entregados por Arena para Conmico 1. Fuente: Elaboración propia, 2019.57

Figura 6.12: Resultados entregados por Arena para Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.58

Figura 6.13: Resultados entregados por Arena para Conmico 3. Fuente: Elaboración propia, 2019.58

Figura 6.14: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 1 con la Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019. 59

Figura 6.15: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 1 con la Conmico 3. Fuente: Elaboración propia, 2019. 59

Figura 6.16: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 3 con la Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019. 60

Figura 6.17: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 3 con la Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019. 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Bombas de fracturamiento que posee la Unidad PA. Fuente: Elaboración propia, 2019.	19
Tabla 5-1: Cantidad de pozos a realizar por sector productivo. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos a partir del plan anual de la Gerencia Mina, 2019.....	25
Tabla 5-2: Fracturas ideal por sector productivo. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	30
Tabla 5-3: Tiempos de ejecución de tareas FH. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	30
Tabla 5-4: Ejemplo de tumo ideal Unidad PA. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	31
Tabla 5-5: Máximo potencial y aspiración de la Unidad PA. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	31
Tabla 5-6: Espiración de la Unidad PA como indicadores de desempeño. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	32
Tabla 5-7: Comparación aspiración vs real. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	33
Tabla 5-8: Comparación de elementos para el cálculo. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	34
Tabla 5-9: Indicadores del tablero N°2 para junio 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	34
Tabla 5-10: Datos para generar el OEE. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	38
Tabla 5-11: Programación de avance por sector. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019..	48
Tabla 6-1: Resultados de rendimiento en base a los pozos y fractura. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	50
Tabla 6-2: Elementos a considerar para el cálculo de rendimiento. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	50
Tabla 6-3: Datos para generar el OEE del segundo semestre. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	51
Tabla 6-4: Comparación de tiempos entre primeras y últimas fracturas por turno, periodo 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	52
Tabla 6-5: Indicadores Tablero de control N°2 para todo el año 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	53
Tabla 6-6: Mejor mes de tiempos para Tablero de control N°2. Fuente: Elaboración propia, 2019.	53
Tabla 6-7: Elementos clave de la simulación. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	56

1. INTRODUCCIÓN

La Corporación Nacional de Cobre de Chile (CODELCO) es una empresa cuyo negocio principal es la explotación de recursos metálicos de cobre, siendo uno de los mayores productores del mundo y cuyas exportaciones van a las principales potencias del globo. División El Teniente es uno de sus principales yacimientos, el cual es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta con más de 4.500 kilómetros de galerías.

Dada sus dimensiones, y en condiciones geomecánicas de alto esfuerzo. A medida que se profundiza en el macizo rocoso, la probabilidad de ocurrencia de estas problemáticas van en aumento, por lo que se vuelve necesario el encontrar solución a ellos.

División el teniente, está aplicando desde el año 2004 el método de fracturamiento hidráulico conocido como preacondicionamiento o simplemente como PA, para mejorar la hundibilidad y disminuir la magnitud de los eventos sísmicos característicos de las explotaciones por el método de hundimiento en roca dura con altos esfuerzos in situ. En la actualidad. Todos los sectores de la mina que se incorporan a la producción son objeto de preacondicionamiento por lo que este subproceso es crítico para la operación de la mina.

La Dirección de Excelencia Operacional de Codelco ha desarrollado la herramienta de optimización de procesos conocida como “C+”, la cual está basada en los principios de *lean management*, cuyo fin es alinear a las personas en la idea de hacer las cosas de manera correcta en el tiempo y medida necesaria, utilizando la mínima cantidad de recursos posible.

En este trabajo se aplica la metodología C+ en la unidad PA a través de la herramienta *Lean Management*, lo cual consiste en implementar planes de acción orientados a lograr que la unidad pueda cumplir los requerimientos planteados en el plan anual de incorporación de áreas hundidas de la Gerencia Mina de la División El Teniente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Mejorar el rendimiento del proceso de fracturamiento hidráulico en la Unidad de Preacondicionamiento de Codelco Chile División El Teniente, mediante la metodología *Lean Management*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las actividades de la cadena productiva que afectan el rendimiento del proceso de preacondicionamiento.
- Establecer el máximo potencial de producción y definir aspiración de la Unidad PA.
- Proponer un plan de mitigación de pérdidas y reducción de tiempo en tareas que no contribuyen al resultado deseado.
- Implementar y evaluar los resultados del plan.

1.2 Alcances

- El estudio se lleva a cabo en la Unidad de Preacondicionamiento de la División El Teniente de Codelco Chile.
- Los sectores productivos que se consideran para la aplicación de la metodología *Lean* corresponden a los del Plan Anual 2019.
- Los planes de acción son genéricos y aplicables a cualquier sector donde se lleve a cabo el hidrofracturamiento.

2. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se basa en la filosofía Lean Management la cual consta de 5 etapas:

2.1 Diagnóstico inicial de la unidad PA

El proyecto comienza con un diagnóstico de la situación en la que se encuentra la unidad PA y el proceso de fracturamiento hidráulico. Para ello se recolecta información pasada y actual del rendimiento del proceso de hidrofracturamiento, y se aplican indicadores de desempeño para analizar su evolución en el tiempo.

Como fuente de información se utilizan los reportes diarios de actividades de la unidad PA e informes de las unidades usuarias del preacondicionamiento. También se revisan antecedentes no incluidos en los reportes diarios como la calidad del trabajo entregado, el estado de actualización de los procedimientos y las formas de coordinación con otras unidades que comparten el área de trabajo.

2.2 Análisis de puntos críticos

Una vez realizado el diagnóstico inicial es necesario determinar la “aspiración” y el “máximo potencial” que tiene la unidad de preacondicionamiento sobre su proceso productivo.

La aspiración corresponde a la meta productiva deseable por parte Unidad PA y el máximo potencial representa al máximo rendimiento que puede sacarse al proceso suponiendo que todas las tareas se llevan a cabo sin contratiempos ni interferencias.

Para establecer la aspiración hay que considerar que el proceso PA se realiza coordinadamente con la Unidad de Preparación Mina y que, para realizar los trabajos, ambas Unidades deben resolver numerosas situaciones reales de terreno que pueden afectar la productividad de los procesos.

Luego de obtener del máximo potencial y la aspiración de la unidad PA se procede a analizar la cadena de valor del proceso y a determinar los puntos críticos, los cuales pueden corresponder a “cuellos de botella”, “desperdicios” y/o las “actividades incidentales” presentes en el proceso, tanto en la aplicación del preacondicionamiento propiamente tal como en el entorno de ejecución del trabajo.

Se denomina “cuellos de botella” a las tareas o situaciones que entorpecen la realización de las actividades que siguen en la cadena de valor del proceso productivo y “desperdicios” a aquellas acciones que se realizan y que no aportan valor al desarrollo del proceso. Las “actividades incidentales” son las acciones que se sabe que no aportan valor al proceso pero que son indispensables para realizar las tareas que si lo aportan.

2.3 Indicadores de desempeño

En esta actividad se revisan los indicadores disponibles y se establecen las tendencias e impacto en el proceso PA. Esta revisión puede concluir en confirmar, reemplazar y/o agregar nuevos indicadores que puedan representar mejor el desempeño de los procesos.

Los indicadores permiten generar objetivos comunes que deben estar alineados con la aspiración definida anteriormente. Estos indicadores deben cumplir funciones específicas que permitan detectar y diferenciar las dificultades que puedan existir en los procesos, por lo que deben ser específicos, medibles, relevantes y definidos temporalmente, ya que se encuentran en un ciclo constante de mejora continua y puede que pierdan relevancia en el tiempo. Además, cuando se fijen metas, estas deben ser alcanzables.

Al realizar el análisis de indicadores de desempeño también se revisan todos los trabajos administrativos orientados a generar indicadores. Algunos de los cuales, pueden ser irrelevantes para el proceso PA, ya sea por entregar información innecesaria, errónea o poco representativa. En estos casos dichas tareas administrativas pueden considerarse un desperdicio y por lo mismo desecharse, o reemplazarse por otras que si pueden generar algún efecto positivo.

2.4 Generación de planes de acción

Una vez definidos los objetivos de la unidad en relación con la superación de condiciones detectadas en los puntos críticos del proceso, se establece la prioridad en que van a ser tratados mediante planes de acción para resolverlos y que puedan verse reflejados posteriormente en los distintos indicadores de desempeño.

Los planes de acción pueden incluir cambios tanto a procedimientos de trabajo, equipos, tareas administrativas, como directamente pueden agregar o eliminar elementos que no aportan valor a la cadena productiva. Además, dentro de esta sección es donde se puede evaluar nuevas distribuciones de las tareas, tanto rutinarias como extraordinarias, que permitan minimizar recursos y maximizar producción.

Los planes de acción incluyen un programa de seguimiento y de control de indicadores de desempeño con el objeto de no perder el foco y mantener retroalimentación continua al personal involucrado. Esta etapa finaliza con la aprobación del plan por parte de sus trabajadores y sus ejecutivos.

2.5 Implementación

La implementación la efectúa la propia unidad, guiada por un líder de mejora continua que apoya el desarrollo de la transformación durante el desarrollo de los planes.

En esta instancia de implementación, debe registrarse el progreso de las acciones planificadas y su impacto en los respectivos indicadores de desempeño, para tomar medidas inmediatas y resolver los problemas que van encontrando en la implementación.

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen el proceso de preacondicionamiento aplicado en Codelco Chile División El Teniente y la metodología *Lean Management*.

3.1 Preacondicionamiento

El proceso de preacondicionamiento, tal y como su nombre lo indica, consiste en acondicionar el macizo rocoso antes de iniciar un proceso de hundimiento, para mejorar sus condiciones de hundibilidad y fragmentación.

En el caso de El Teniente, para hacer el PA se utiliza la técnica de fracturamiento hidráulico (*fracking*) para aumentar la frecuencia de fracturas en el macizo y de esa forma modificar la calidad de roca. Esta técnica permite la creación de nuevas fracturas y/o extender las preexistentes a partir de microcavidades que posee el macizo rocoso.

En la siguiente figura (3.1) se presenta un macizo rocoso que no posee fracturas visibles. Una vez efectuada la perforación y realizado el preacondicionamiento, se observa la creación de grietas que facilitan el hundimiento para posibles explotaciones y reduce la energía interna a liberar en caso de actividades sísmicas.

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

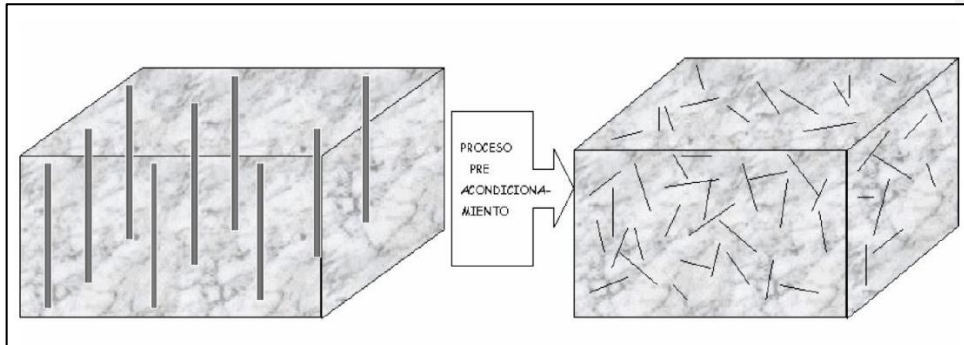


Figura 3.1: Concepto de Precondicionamiento en mina subterránea. Fuente: Sougarret et al., 2004

La mayor frecuencia de fracturas que resulta del PA también repercute positivamente en la disminución de la magnitud de los eventos sísmicos que ocurren con ocasión de la propagación del hundimiento y por tanto disminuye el riesgo de estallido de roca.

3.1.1 Fracturamiento Hidráulico (FH)

Este método consiste en inyectar un fluido líquido al macizo rocoso, idealmente agua, a alta presión con la finalidad de generar y/o extender una fractura en la roca y propagarla hasta lograr la mayor extensión posible.

El uso industrial de esta técnica se desarrolló para aumentar la porosidad del macizo rocoso en el entorno de pozos de extracción de petróleo por el año 1947 en Kansas, EE. UU. También se utiliza en pozos de agua, explotación de reservorios geotermales, almacenamiento de desechos y como método de medición de esfuerzos.

En minería se justifica su utilización para reforzar o asistir el progreso de la propagación del desarme del macizo rocoso tal como se aprecia en la figura 3.2.

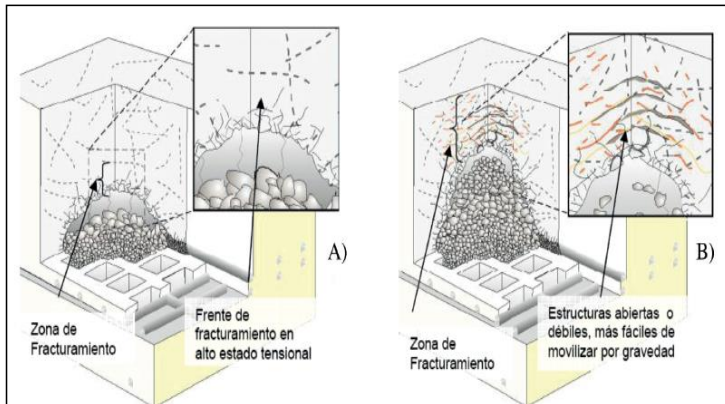


Figura 3.2: Representación del FH en la propagación del hundimiento. Fuente: Baez et al., 2010.

El FH también, disminuye el riesgo sísmico del volumen intervenido, reduciendo la magnitud de los eventos sísmicos y disminuyendo en consecuencia, el riesgo de ocurrencia de estallidos de roca. (ver figura 3.3)

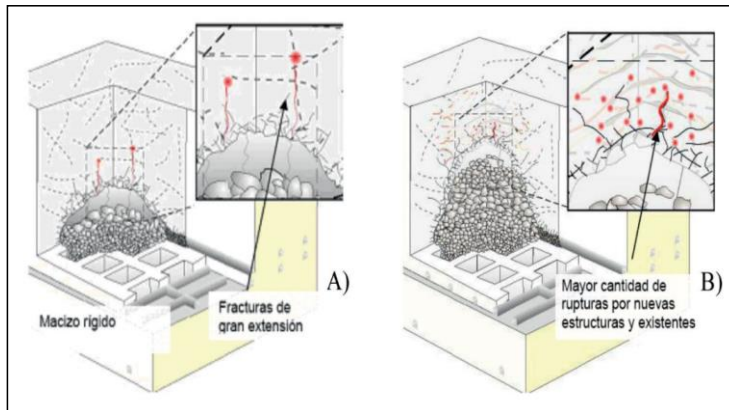


Figura 3.3: Representación del FH con relación a la sismicidad. Fuente: Baez et al., 2010.

El tamaño y la orientación de una fractura, junto con la presión necesaria para romper el macizo, son determinados por el campo de esfuerzos locales. Este campo está definido por 3 esfuerzos de compresión perpendiculares entre sí, incrementando con la profundidad.

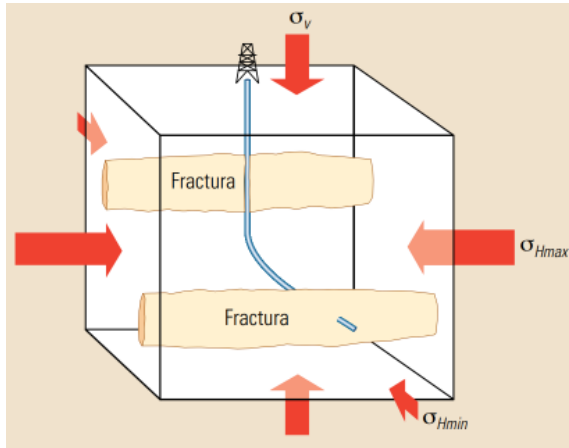


Figura 3.4: Representación esfuerzos sobre el macizo rocoso. Fuente: Nolen-Hoeksema., 2010.

Este nuevo set de estructuras, se propagan a través del plano de esfuerzos principales σ_1 - σ_2 y se abre en la dirección del esfuerzo principal menor σ_3 , que también corresponde al σ_{Hmin} según la figura 3.4. La fractura se abre en dirección al esfuerzo de menor resistencia, por lo que se suele diseñar y efectuar la perforación de forma que deba seguir la dirección del esfuerzo menor.

A continuación, se describen las principales etapas del proceso de hidrofracturamiento aplicado en las minas de División El Teniente.

3.1.1.1 Perforación

Se perfora el macizo rocoso preferentemente en dirección perpendicular al plano de esfuerzos menores para hacer la mayor cantidad de fracturas por metro y aprovechar de mejor manera la extensión de la perforación. El diámetro de perforación debe ser compatible con los aparatos que se deben instalar en su interior.

En zonas de altos esfuerzos a veces es necesario reforzar las perforaciones con lechada de cemento y re perforarlas antes de colocar el sistema de cámaras presurizadas.

3.1.1.2 Instalación del sistema de cámaras presurizadas

Se ingresa, mediante una sonda, un dispositivo que permite aumentar localmente la presión al interior de la perforación. Esto se realiza con un par de sellos inflables denominados *packers*. Al inyectar agua por a los *packers*, estos se inflan quedando fijos a las paredes de la perforación en la posición deseada dejando una cámara sellada.

3.1.1.3 Fracturamiento hidráulico

Una vez instalado el dispositivo, se bombea agua a la cámara que quedó entre los *packers* hasta un punto crítico en el cual se inicia la fractura. Luego se mantiene la presión, durante el tiempo de propagación de la fractura por el macizo rocoso (ver figura 3.5).

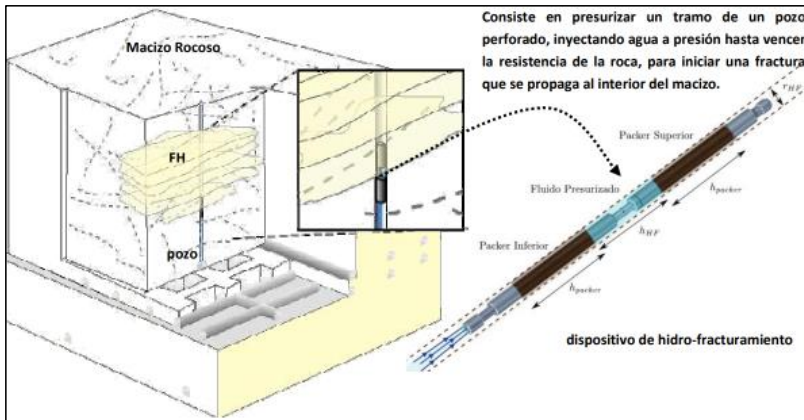


Figura 3.5: Esquema descriptivo de la operación de fractura, con detalle del dispositivo típico. Fuente: Baez., 2010.

3.1.2 Equipos y componentes para el fracturamiento hidráulico

Los equipos y componentes necesarios para el FH consisten básicamente en un sistema de packers, un sistema de apoyo (sonda) y una bomba de fracturamiento. Además, se requiere la una sala de control para el caso en que se requiera monitoreo de datos en línea para fracturamiento a distancia.

3.1.2.1 Packers

Los *packers* son elementos inflables que se utilizan para aislar la zona donde se requiere realizar una fractura. El sistema de *Packers*, consta de dos elementos inflables, los cuales se encuentran separados con el objetivo de aislar un tramo del pozo, generando así una cámara, la cual se presuriza hasta iniciar una fractura y luego continúa propagándola hacia el interior del macizo rocoso.

3.1.2.2 Sonda

La sonda es un equipo de perforación que se utiliza solo para posicionar los packers dentro del pozo. La máquina se ancla en dirección alineada con el pozo y se utiliza el tren de barras para localizar y posicionar el *packer* a la profundidad de la fractura artificial (figura 3.6).



Figura 3.6: Sonda utilizada para realizar fracturamiento hidráulico. Fuente: Unidad PA, 2017.

3.1.2.3 Bomba de fracturamiento

Corresponde a la bomba que provee el flujo de alta presión necesario para iniciar y propagar la fractura al interior del macizo rocoso, por medio de la inyección de fluido a alta presión. A continuación se presenta las bombas de la unidad PA (Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Bombas de fracturamiento que posee la Unidad PA. Fuente: Elaboración propia, 2019.

MARCA	DESCRIPCIÓN	AÑO	CAPACIDAD BOMBA	CAPACIDAD BOMBA
ConMico 1	Modelo HDP-250-45E	2006	230 lt/min	45 Mpa
ConMico 2	Modelo RHP-400-78	2010	300 lt/min	55 Mpa
ConMico 3	Modelo RHP-700-100 Gen III	2016	377 lt/min	77 Mpa
ConMico 4	Modelo RHP-700-100 Gen III	2019	377 lt/min	77 Mpa

3.1.2.4 Sala de control

Esta sala se utiliza para controlar los parámetros de fractura desde un lugar cercano pero seguro. Se tener esta sala como un estándar para poder resolver cualquier dificultad entre o durante la operación de hidrofracturamiento.

3.1.2.5 Estanque

Debido a la escasez de agua en los distintos sectores de la mina, se prefiere disponer de suministro propio mediante la utilización de estanques de agua. El agua se recupera porque después de propagada la fractura, se corta la presión y la fractura se cierra, impulsando el agua de vuelta al estanque.

3.2 *Lean Management*

La filosofía *Lean* proviene de la industria automotriz, específicamente de la empresa japonesa Toyota, la cual desarrolló un nuevo sistema con poco inventario y con trabajadores que participaban activamente en la toma de decisiones, produciendo solo lo justo y necesario en el momento que el cliente lo solicitaba.

La metodología *Lean* fomenta la multifuncionalidad, el trabajo en equipo, la participación y compromiso de los trabajadores, la mejora continua y la eliminación del trabajo innecesario, también denominado “desperdicio”.

Existen 5 principios básicos en la filosofía lean y que son aplicables a todo proceso que quiera realizar esta transformación, buscando hacer más con menos (menor esfuerzo humano, menor equipamiento, menor tiempo y espacio) y enfocándose en ofrecer a los clientes exactamente lo que ellos necesitan. Los principios son:

1. Identificar el producto de valor para el cliente
2. Diseñar el proceso de trabajo para generar dicho producto
3. Implementar y mantener un flujo continuo en el proceso de producción
4. Involucración del cliente en el ajuste a sus necesidades de la programación de la producción
5. Evaluación y mejora continua del proceso productivo

IDENTIFICAR EL PRODUCTO DE VALOR: Es el producto o servicio que satisface las necesidades del cliente o consumidor final. Es significativo mientras se exprese como un producto específico a un precio conocido y en un momento determinado. El valor para el cliente se define ignorando el estado actual de los activos y/o de la tecnología en uso, pero con una idea clara de lo que es realmente necesario en el nuevo proceso.

DISEÑO DEL NUEVO PROCESO DE TRABAJO: Son los pasos que habría que seguir para producir el nuevo producto o servicio de valor. Para diseñarlos, los procesos actuales son sometidos al análisis de las unidades especializadas en: áreas críticas, solución de problemas, gestión de la información y transformación física. Al aplicar este principio se revela la existencia de: actividades generadoras de valor, actividades incidentales y desperdicios.

IMPLEMENTAR Y MANTENER EL FLUJO PRODUCTIVO: Luego de eliminar los desperdicios de la cadena de valor, se implementa la reorganización del trabajo, según el diseño del punto anterior, de manera que las actividades se realicen de la forma más continua y expedita posible.

INVOLUCRAR AL CLIENTE EN LA PROGRAMACIÓN: Organizar la programación de la producción, siendo el mismo cliente quien puede manejar el ritmo productivo dependiendo de sus necesidades, ajustando el proceso a sus necesidades, evitando así la generación de grandes cantidades de inventario y de sobreproducción.

MEJORA CONTINUA: Establece como principio que “la situación actual es el peor estado posible”, abriendo la posibilidad a una evaluación y crecimiento continuo basado en los 4 principios anteriores. generando un círculo virtuoso que va observando y eliminando permanentemente los desperdicios, adecuándose a los cambios y generando confianza y una sensación de ir acercándose constantemente a la perfección.

3.2.1 Desperdicios

Los expertos sobre pensamiento Lean definen como desperdicio a cualquier actividad productiva que utiliza recursos propios del proceso pero que no genera valor a este. Por ejemplo, se considera como desperdicio aquellos errores que requieren rectificación; la fabricación de productos no demandados por el cliente, el exceso de inventario; procesos innecesarios; desplazamiento de personas o materiales sin ningún propósito; esperas debidas a cuellos de botellas en actividades previas y producir bienes o servicios que no satisfacen las necesidades del cliente.

3.2.2 Actividad incidental

Actividades incidentales son aquellas que no generan valor directamente al producto, pero que son indispensables para que se puedan efectuar los trabajos que sí generan valor. Para aumentar el valor del proceso es necesario reducir el tiempo incidental y generar condiciones donde los desperdicios tiendan a cero, tal como se presenta esquemáticamente en la figura 3-7.

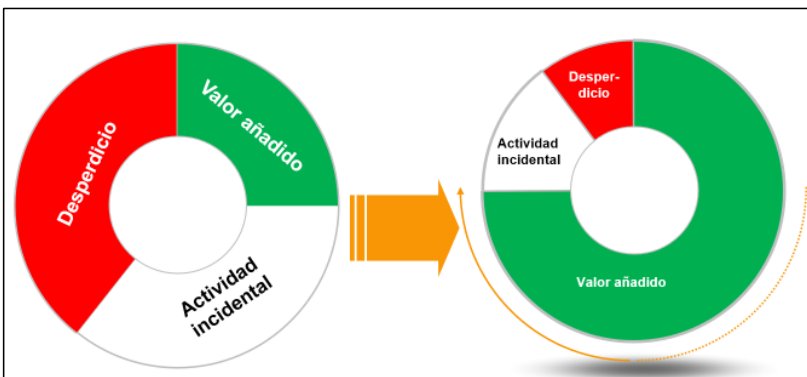


Figura 3.7: Generación de valor añadido. Fuente: Dirección de Excelencia Operacional, 2017.

3.2.3 Herramienta C+

C+ es una herramienta desarrollada por Dirección de Excelencia Operacional de Codelco Chile División el Teniente, que está basada en la metodología *Lean Management*. Este sistema de gestión interpreta que el producto de valor para el cliente es un servicio o producto que cumple con ciertas metas de desempeño, ajustadas a sus necesidades de oportunidad y funcionalidad.

Para ello en cada se debe definir un objetivo común que satisfaga las necesidades operativas y la optimización de costos de ambas partes: cliente y servidor.

El objetivo común permite establecer un “máximo potencial” del proceso y una “aspiración” de desempeño considerada satisfactoria para el cliente.

El cliente es generalmente el usuario del producto o servicio, el cual corresponde al siguiente eslabón de la extensa cadena de valor del proceso productivo de la División El Teniente.

4. MOTIVACIÓN

Codelco Chile División El Teniente ha determinado que ningún área puede ser hundida sin antes ser hidrofracturada, por ello es por lo que la unidad de preconditionamiento debe cumplir planes anuales y mensuales de hidrofracturamiento, los cuales permiten habilitar áreas de aplicación del método de hundimiento.

Considerando el incumplimiento del plan en el primer semestre del año en estudio (ver figuras 4.1 y 4.2), se hace necesario determinar los principales focos de atención para mejorar la situación.

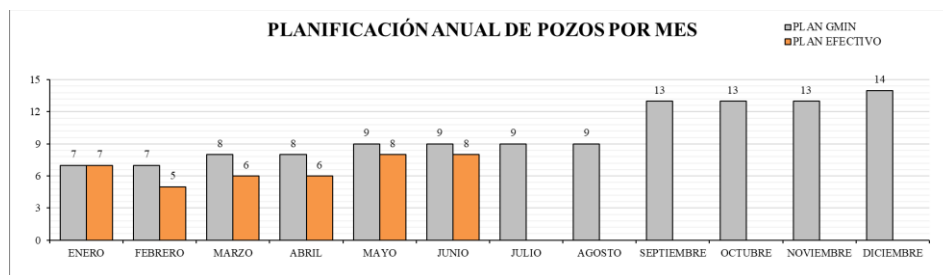


Figura 4.1: Plan anual por mes de los pozos a fracturar. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos a partir de estadística de producción de la Unidad de Preacondionamiento, 2019.

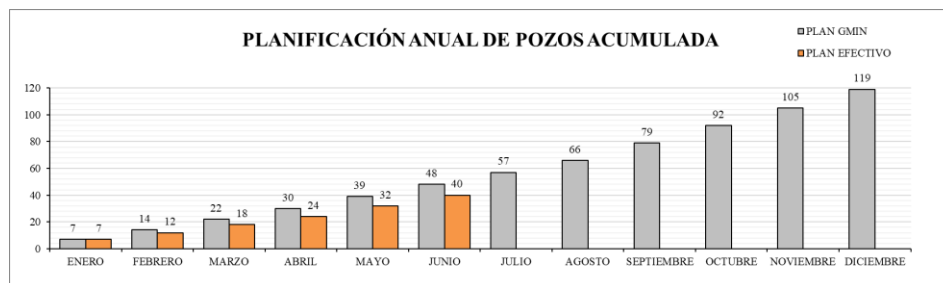


Figura 4.2: Plan anual acumulado de los pozos a fracturar. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos a partir de estadística de producción de la Unidad de Preacondionamiento, 2019

El plan fue elaborado a finales del año anterior, considerando la programación de avance para las distintas zonas productivas de la división, estableciendo que el PA debe estar terminado alrededor de 3 meses antes de la fecha en que se hunde el sector para su extracción. Además, se consideran los eventos programados de detenciones o interrupciones del proceso PA como: mantenciones y cambios de personal.

Tabla 5-1: Cantidad de pozos a realizar por sector productivo. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos a partir del plan anual de la Gerencia Mina, 2019.

SECTOR PRODUCTIVO	Nº DE POZOS
NP DACITA	8
NP ESMERALDA BLOQUE 1	12
NP ESMERALDA BLOQUE 2	14
NP PILAR NORTE	6
NP RENO	6
UCL DACITA	13
UCL ESMERALDA BLOQUE 1	9
UCL ESMERALDA BLOQUE 2	31
RENO UCL	13
EXT. NORTE	2
PANEL RENO	2
NUEVO NIVEL MINA	3
TOTAL	119

La realización del hidrofracturamiento se hace siguiendo procedimientos de trabajo seguro y efectivo en la secuencia descrita en el diagrama de la figura 5.2, cuya secuencia de operación se puede resumir en 2 grandes líneas de trabajo correspondientes a: movimiento de equipos y fracturamiento hidráulico.

Las medidas de seguridad incluyen la aislación del área de trabajo en un radio de acción denominado el “halo de influencia” donde sólo puede ingresar personal relacionado con el PA.

Dependiendo de la profundidad de cada pozo se calcula la cantidad de fracturas que deben realizarse, las cuales deben estar separadas cada 1,5[m].

La Unidad PA también dispone de tecnología para hacer fractura a distancia, la cual permite controlar la operación de la bomba desde una sala de control móvil ubicada en el taller de preacondicionamiento en el mismo nivel que los pozos a fracturar. Este modo de operación ahorra tiempo en el movimiento de los equipos, sin embargo, solo es aplicable en zonas que cuentan con las conexiones de ethernet en buen estado.

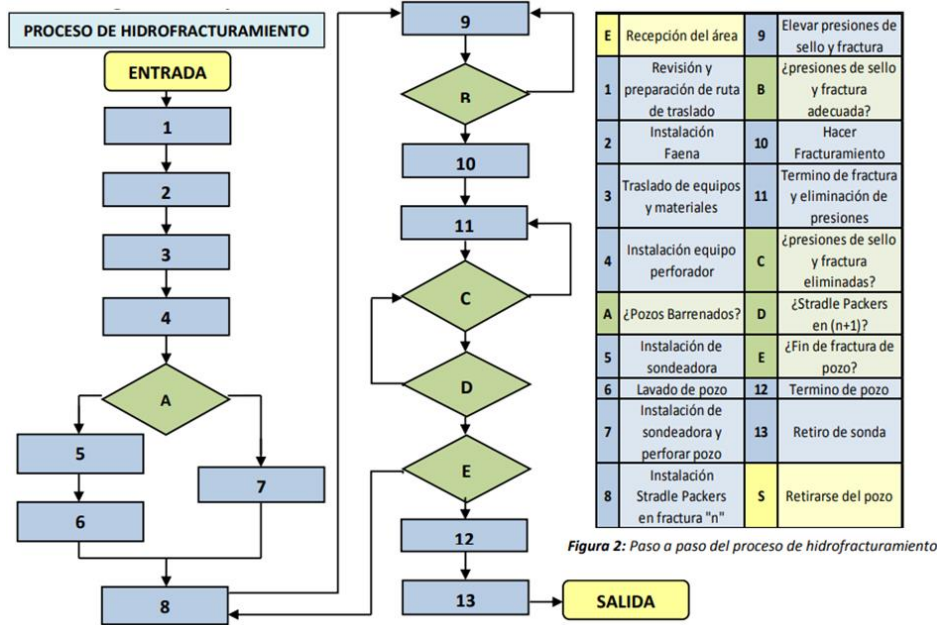


Figura 5.2 Diagrama de flujo del proceso de hidrofracturamiento. Fuente: Elaboración propia, 2019.

La jornada laboral es de 3 turnos de 8 horas y 40 minutos cada uno, y comienza con el procedimiento estándar “Inicio de Turno” (Figura 5.3) cuyos primeros 40 minutos se traslapan con los últimos 40 minutos del turno saliente. Según el procedimiento en ese período el personal del turno saliente comparte impresiones de su jornada laboral con el del turno entrante, mientras los Jefe de Turno planifican las pautas de trabajo y asignación del personal a las distintas locaciones de trabajo. En este tiempo también se imparten las charlas diarias de seguridad.

Los principales factores que inciden en el rendimiento del hidrofracturamiento son:

- Retrasos en la entrega de pozos por cambios de resistencia de la roca durante la perforación con impacto en la velocidad de penetración de la sonda.
- Interferencia con terceros debido a que en las zonas de operación coexisten diversos contratistas y otras unidades, con quienes hay que efectuar reuniones de coordinación para la utilización de espacios, especialmente en los halos de seguridad.
- Eventos no deseados, que son aquellos sucesos que demoran o interrumpen el trabajo, entre los cuales se encuentran la mala instalación de equipos, evacuación por sismicidad en el área, accidentes laborales, inspecciones, falta de suministro eléctrico, agua o ethernet.

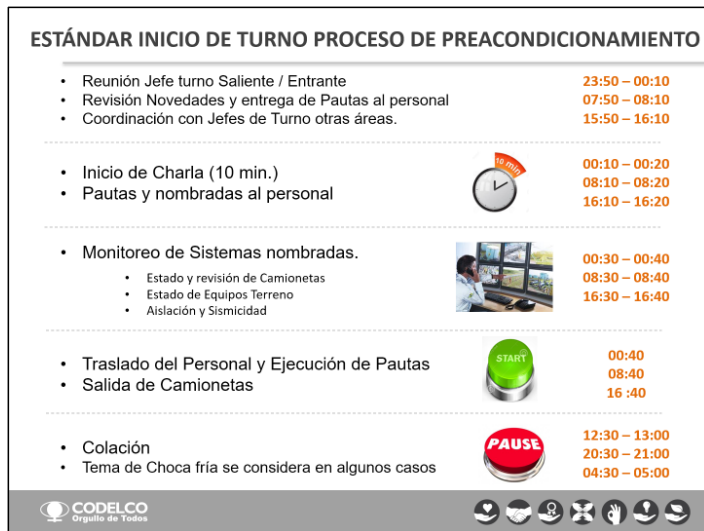


Figura 5.3: Ejemplo de estándar inicio de turno. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019

El tiempo de ejecución de una fractura varía con la extensión de la fractura, la calidad de roca, el estado de esfuerzos en la localización del pozo y la potencia de la bomba, sin embargo, la experiencia muestra que por lo general no pasa de 30 minutos, cifra que se considera como estándar de tiempo de realización de una fractura (ver Figura 5.4).

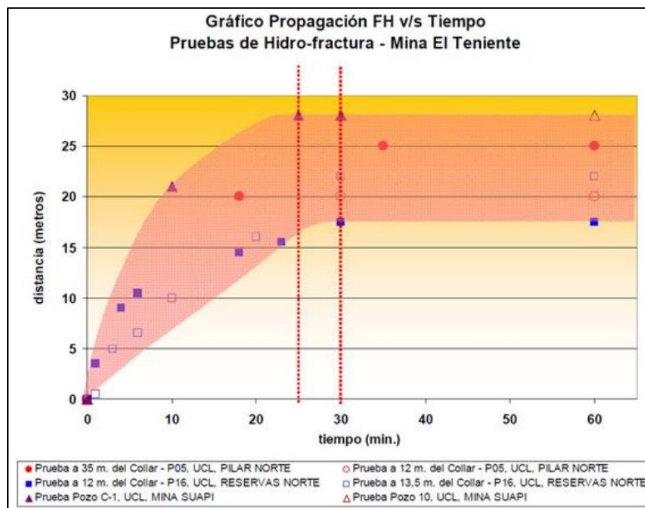


Figura 5.4: Estudio de propagación de fracturas. Fuente: Gerencia de Recursos Mineros, 2019

Sistema administrativo

Existe un registro de cada fractura realizada en formato Excel (ver Figura 5.5) el cual contiene: la identificación del pozo, hora y fecha en que se realiza, duración del tiempo de fractura, el agua utilizada, la presión con la que se inicia y se expande la ruptura, la profundidad en que se realiza.

UNIDAD PREACONDICIONAMIENTO - SUPERINTENDENCIA SERVICIOS MINERIA															
CONTROL FRACTURAMIENTO HIDRAULICO															
SECTOR	PROYECTO NUEVO NIVEL MINA TUNEL TC				POZO FHTC-36			UBICACION		FRONTÓN ESTOCADA 5			BOMBA: CONMICO 4	SONDA: 044	
N° FRACTURA	DISTANCIA COLLAR (m)	TIPO DE FRACTURA	FECHA	T°	BOMBAS			HORA (hh:mm)		TIEMPO			TIPO DE STRADDLE PACKERS		
					SELLOS (SI HAY RISAL)	RUPTURA BOMBA FRACTURA	PROPAGACION MEDIA	INICIO	TERMINO	FRACTURA (min)	RETORNO (min)	UN RISAL	UN RISAL	N° COLLAR (SEN RISAL)	
1	425,0	Normal	09-01-2020	A	-	7.519	5.995	12:05	12:35	30	10	X		17	
2	423,0	Normal	09-01-2020	A	-	7.365	5.839	14:32	15:02	30	10	X		17	
3	421,0	Normal	09-01-2020	B	-	7.107	6.148	17:48	18:18	30	10	X		17	
4	419,0	Normal	09-01-2020	B	-	6.534	5.486	19:09	19:39	30	10	X		17	
5	417,0	Normal	09-01-2020	B	-	6.025	5.512	20:18	20:48	30	10	X		17	
6	415,0	Normal	09-01-2020	B	-	6.070	5.371	21:25	21:55	30	10	X		17	
7	413,0	Normal	09-01-2020	C	-	5.567	5.263	01:08	01:38	30	10	X		17	
8	411,0	Normal	09-01-2020	C	-	4.910	4.771	02:17	02:47	30	10	X		17	
9	409,0	Normal	09-01-2020	C	-	5.503	5.055	03:25	03:55	30	10	X		17	
9	409,0	Reapertura	09-01-2020	C	-	5.256	5.038	04:19	04:49	30	10	X		17	
10	407,0	Normal	09-01-2020	C	-	5.103	4.988	05:10	05:40	30	10	X		17	
11	405,0	Normal	09-01-2020	C	-	4.697	4.542	06:29	06:59	30	10	X		17	
12	403,0	Normal	10-01-2020	A	-	4.690	4.586	10:38	11:08	30	10	X		17	
13	401,0	Normal	10-01-2020	A	-	5.099	4.882	11:40	12:10	30	10	X		17	
14	399,0	Normal	10-01-2020	A	-	4.852	4.563	12:30	13:00	30	10	X		17	
POZO TERMINADO															

Figura 5.5: Planilla de fractura. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.

Esta información es enviada a la Unidad de Estudios geomecánicos para validación. Si alguna fractura es rechazada debe realizarse nuevamente y se considera como un trabajo repetido para la Unidad PA. La información de estas planillas se usa como base para elaborar las estadísticas del año.

También existen libros en que los Jefes de Turno registran la información que pueda ser de utilidad para el turno siguiente y los incidentes del turno tales como: fallas de equipos, mantenciones realizadas, problemas en las distintas áreas de trabajo, acuerdos realizados con otras unidades y cantidad de fracturas realizadas.

Otra información disponible es el denominado Tablero de Control de Preacondicionamiento (ver Figura 5.6), en el que los trabajadores registran, identificación del pozo por fracturar en el día, la hora de salida y de llegada a la unidad, la hora en que se efectuó la primera y última fractura, la cantidad total de fracturas realizadas.

Existen más registros de información administrativa como el seguimiento de capacitaciones, charlas de seguridad e inventario de componentes y equipos.

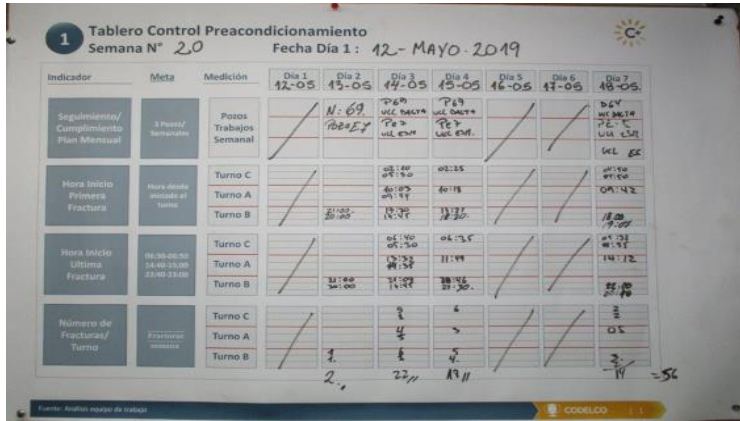


Figura 5.6: Tablero de control N°1 de fracturas. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.

Como herramienta de análisis se cuenta con el procedimiento de cálculo de Efectividad Total de Equipos, localmente denominado OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) descrito en el esquema de la figura 5.7. El tiempo efectivo de fracturamiento resultante del OEE debería coincidir con el rendimiento real de la estadística.

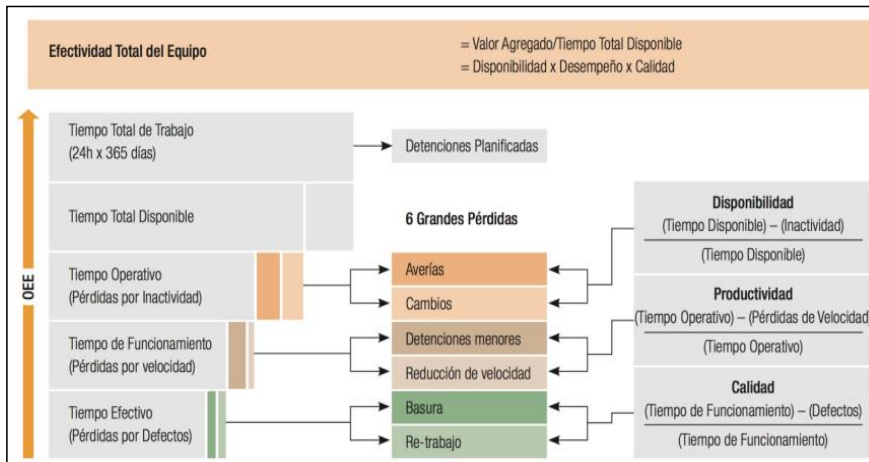


Figura 5.7: Estructura de la herramienta OEE. Fuente: Quiroz, 2016

Como diagnóstico acerca del sistema administrativo, se constata la existencia de una gran cantidad de datos relacionados a las tareas y funciones que se cumplen en la Unidad de Preacondicionamiento, pero que está dispersa y es poco aprovechada para la propia autoevaluación del proceso.

5.2 Análisis de puntos críticos

Antes de iniciar el análisis es necesario saber cuál es el “máximo potencial” y la “aspiración” que tiene la unidad de preacondicionamiento y que serán parte de los objetivos a alcanzar con la implementación de los planes de acción.

5.2.1 Máximo potencial

En este caso, el máximo potencial corresponde al mayor rendimiento que puede alcanzar el proceso de fracturamiento hidráulico. En particular se busca una estimación de la cantidad de fracturas que se ejecutarían en un estado completamente ideal, sin pérdidas por capacidad productiva ni de calidad que afecten al proceso ni la existencia de eventos no deseados.

El máximo potencial para cada tipo de bomba y los distintos sectores de PA, resulta ser el de la Tabla 5-2, cuya base de cálculo de pozos por turno corresponde al sector Mina Esmeralda, Niveles de Producción y Hundimiento, cuyos respectivos máximos se calculan en 11,3 y 6,2 pozos por semana con 236 y 347 fracturas semanales respectivamente. Cabe hacer notar que los pozos de Nivel de Producción son cortos con pocas fracturas y, por el contrario, los de Nivel de Hundimiento son largos, con menos cambios de localización y más fracturas por pozo.

Tabla 5-2: Fracturas ideal por sector productivo. Fuente: Elaboración propia, 2019.

CONMICO 1 CONMICO 2	ESMERALDA	6 FRACTURAS TURNO MÁS 1 A DISTANCIA	=	24	FRACTURAS POR DIA
	RENO/DACITA	5 FRACTURAS TURNO MÁS 1 A DISTANCIA	=	21	FRACTURAS POR DIA
CONMICO 3	ESMERALDA	8 FRACTURAS TURNO MÁS 1 A DISTANCIA	=	30	FRACTURAS POR DIA

Para el cálculo de máximos potenciales de la Tabla 5-2, se consideran los tiempos óptimos de la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Tiempos de ejecución de tareas FH. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Fracturamiento	25	MIN
Liberación de Presiones	5	MIN
Movimiento de Barras, revisión de instalaciones y agua	15	MIN
TOTAL	45	MIN

En la Tabla 5-4 se presenta un ejemplo detallado de distribución de actividades del turno ideal en el sector Esmeralda.

Tabla 5-4: Ejemplo de turno ideal Unidad PA. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Mina esmeralda	
Inicio de turno	8:00
Salida de camionetas a lugar FH	8:40
Llegada a lugar FH	8:50
Inicio fractura	9:05
Inicio fractura	9:50
Inicio fractura	10:35
Inicio fractura	11:20
Inicio fractura	12:05
Almuerzo	12:50
Vuelta a lugar FH	13:30
Inicio fractura	13:55
Inicio fractura	14:40
Inicio fractura	15:25
Vuelta al taller	16:15
Inicio fractura a distancia	16:25
9 fracturas turno ideal (con 1 a distancia)	

5.2.2 Aspiración

La aspiración representa una meta productiva deseable acordada por la Unidad de PA y la Gerencia Mina que en este caso representa la mirada integral de la cadena de valor del proceso aguas abajo. Se diferencia del máximo potencial principalmente en que la aspiración considera la ocurrencia eventos indeseables que puedan afectar el desempeño del proceso, llegando a una proyección de resultados aceptables para todas las partes.

Como resultado de esta actividad se obtiene la tabla comparativa entre los valores de máximo potencial y aspiración de la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Máximo potencial y aspiración de la Unidad PA. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Bomba	Máximo Potencial			Aspiración		
	Pozos por semana	Fracturas por turno	Fracturas por semana	Pozos por semana	Fracturas por turno	Fracturas por semana
CONMICO 1	3,7	8,0	108	3,1	7	90
CONMICO 2	3,7	8,0	109	2,5	6	82
CONMICO 3	3,9	9,0	130	2,3	7	123
Total	11,3	25,0	347	7,9	20	295

A su vez, en la Tabla 5-6 se resume la aspiración expresada como indicadores de desempeño:

Tabla 5-6: Espiración de la Unidad PA como indicadores de desempeño. Fuente: Elaboración propia, 2019.

			Aspiración
Disponibilidad Bombas	CONMICO 1	%	90%
	CONMICO 2	%	90%
	CONMICO 3	%	90%
Tiempo entre fracturas	CONMICO 1	hh:mm	0:50
	CONMICO 2	hh:mm	0:50
	CONMICO 3	hh:mm	0:45
Traslado e instalación promedio	CONMICO 1	turnos	3,33
	CONMICO 2	turnos	3,25
	CONMICO 3	turnos	2,50
Inicio Primera Fractura (en las primeras 2 horas)		%	90%
Inicio Última Fractura (En las últimas 2 horas)		%	90%
% Turnos con Fracturas		%	72,1%

5.2.3 Puntos críticos

Luego de definir las aspiraciones se procede a determinar los principales “cuellos de botella” y/o “desperdicios” presentes en el proceso.

La cadena de producción del proceso de preacondicionamiento se inicia con la recepción del plan de avances mensual (PAM) de la Gerencia Mina, el cual es bajado en la Unidad Geomecánica a un documento de detalle para la unidad de PA, con información particular de halos de aislamiento, indicaciones de profundidad y distancias entre fracturas de cada pozo. Una vez recibidas las instrucciones de la Unidad Geomecánica, la Unidad PA ya puede preparar su programa de hidrofracturamiento, que comprende las tareas indicadas en la figura F1

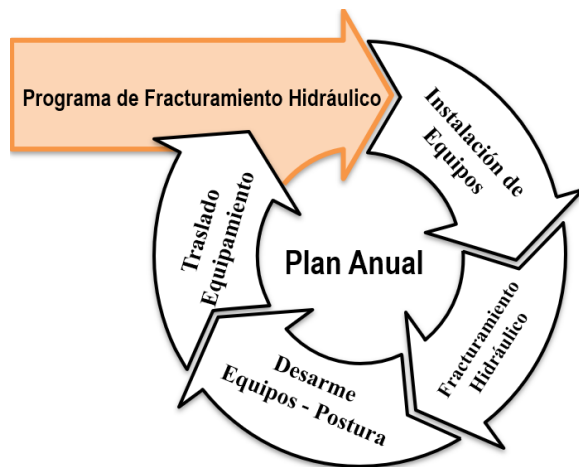


Figura 5.8: Estrategia y criterios de operación. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019

En cada uno de estos elementos existen puntos críticos que afectan la cadena de valor y que pueden ser focos de transformación.

5.3 Condición inicial

A continuación, se presentan los indicadores de desempeño representativos de la condición en la que se encuentra la función preacondicionamiento al término del primer semestre del año en estudio. La comparación de estos indicadores con sus homólogos de la aspiración, permiten establecer los puntos críticos y sus puntos de intervención en el proceso.

5.3.1 Indicadores de desempeño

La condición inicial de desempeño de la Unidad PA se encuentra muy lejos de los indicadores a que se aspira, tal como se puede ver en la Tabla 5-7, donde se destaca el bajo rendimiento que tiene la unidad con relación a las fracturas realizadas y los pozos entregados.

Tabla 5-7: Comparación aspiración vs real. Fuente: Elaboración propia, 2019

Periodo	Aspiración		Real junio 2019	
	Pozos	Fractura	Pozos	Fractura
Por semana	7,9	295	1,5	62
Por mes	31,8	1182	6,7	269
		Rendimiento de la Unidad	21,1%	21,0%

La misma comparación respecto de los elementos de desempeño presenta el estado indicado en la Tabla 5-8:

Tabla 5-8: Comparación de elementos a considerar para el cálculo. Fuente: Elaboración propia, 2019

ELEMENTOS QUE CONSIDERAR	BOMBA	PARAMETRO	ASPIRACIÓN	REAL JUNIO
Disponibilidad Bombas	CONMICO 1	%	90%	-
	CONMICO 2	%	90%	72%
	CONMICO 3	%	90%	80%
Tiempo entre fracturas	CONMICO 1	hh:mm	0:50	-
	CONMICO 2	hh:mm	0:50	1:10
	CONMICO 3	hh:mm	0:45	0:55
Traslado e instalación promedio	CONMICO 1	turnos	3,33	-
	CONMICO 2	turnos	3,25	11,1
	CONMICO 3	turnos	2,50	6,2
Inicio Primera Fractura (en las primeras 2 horas)		%	90%	62%
Inicio Última Fractura (En las últimas 2 horas)		%	90%	52%
% Turnos con Fracturas		%	72,1%	51,5%

Donde se destaca la gran cantidad de tiempo ocupado en movimiento e instalación de equipos, además del bajo porcentaje de turnos donde se realizó fractura.

5.3.2 Perdida por disponibilidad

El primer elemento por estudiar es el estándar de inicio y fin de turno, a partir de la información de tableros de control obteniendo los datos de la Tabla 5-9.

Tabla 5-9: Indicadores del tablero de control N°2 para junio 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Salida de Camionetas			Llegada a lugar asignado			Tiempo a lugar asignado		
Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
0:48	8:51	16:48	1:07	9:10	17:05	19 [min]	19 [min]	17 [min]
Salida de lugar asignado			Llegada de Camionetas			Tiempo a Taller		
Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
7:22	15:31	23:26	7:37	15:47	23:42	15 [min]	16 [min]	16 [min]

Se observa que los turnos no cumplen la hora de salida establecida en el estándar de inicio de turno las que idealmente deberían ser a las 0:40; 8:40 o 16:40 y están lejos de los horarios ideales de llegadas y salidas a o desde el lugar asignado en que las llegadas deberían ser a las 0:50; 8:50 o 16:50 y las salidas a las 8:15; 16:15 o 0:15, lo cual disminuye significativamente el tiempo disponible para realizar trabajos de fracturamiento, siendo entonces considerados como perdidas por disponibilidad.

Respecto de la cantidad de fracturas y la hora de las primera y última fracturas, se puede preparar la figura 5.9 con datos del año anterior al período en estudio, y ver que el horario en el que es más probable de inicio de las primera y última fracturas de cada turno, están a 1 hora y media del horario de cambio de turno.

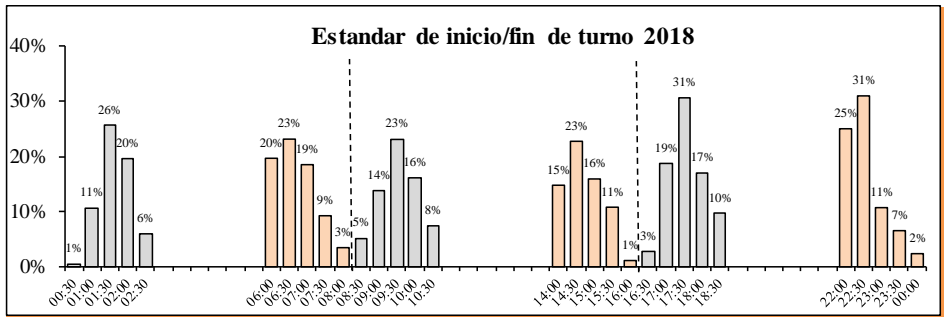


Figura 5.9: Frecuencia de horarios de inicio y fin de turno. Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 5.10, se puede ver la frecuencia de fracturas efectuadas cada media hora, observándose que, para conseguir continuidad, sería necesario efectuar algún plan de fracturamiento a distancia aplicable en los períodos de cambio de turno.

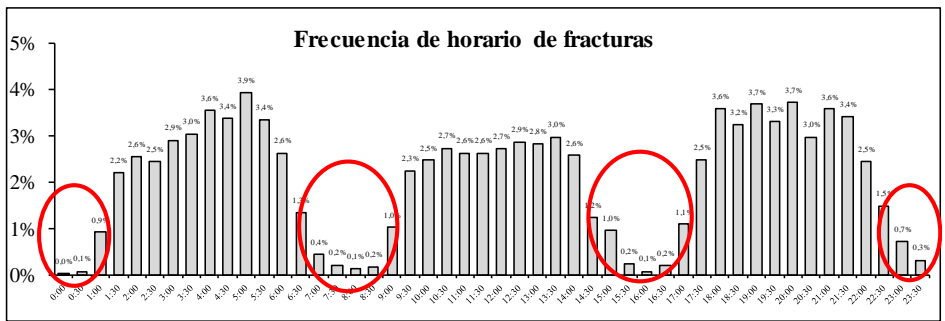


Figura 5.10: Fracturas acumuladas en el tiempo para el periodo 2018. Fuente: Elaboración propia, 2019.

También se consideran como perdidas por disponibilidad las demoras en el transporte y el tiempo de mantención programada de los equipos.

Como no existe un registro numérico que permita entrar y saber directamente cuales son las perdidas por estos conceptos, para calcular los respectivos indicadores en la Tabla 5-8, se utilizó el libro de registro de actividades y las planillas de pozos que contienen la fecha en que se realiza cada una de las fracturas y por consiguiente se puede determinar la relación entre los turnos en que se realizan trabajos de fracturamiento o tareas de traslado, instalación y/o reparación de equipos.

Al registrar estas actividades, se evidencian desviaciones considerables a la hora de realizar movimiento de sondas, salas de control, packers y otros elementos necesarios para la correcta y continua operación y ejecución de hidrofracturamiento. Dentro de los elementos que más se repiten en las novedades se encuentra la disponibilidad de sectores para la instalación de estos equipos, dadas principalmente por descoordinaciones con otras áreas en los tiempos de ejecución de tareas y la falta de prioridad a ciertas tareas.

Por otro lado, el aumento en los tiempos de mantención de equipos afecta considerablemente en la producción de los últimos 6 meses previos a la ejecución del estudio, dado que equipos que deberían estar disponibles aún se encuentran fuera de servicio. Con el fin de completar los planes previos, se realizan muchos movimientos de equipos poco eficientes, dada también la necesidad productiva y geomecánicas de algunos sectores productivos.

5.3.3 Perdidas por capacidad productiva

Se consideran pérdidas por capacidad productivas los tiempos de detención programada por coordinaciones operacionales, denominadas ventanas de detención programada, las pérdidas por falta de agua y las pérdidas por eventos indeseables. El cálculo de tiempos promedios entre fracturas consecutivas se obtiene indirectamente por comparación con los tiempos homólogos en turnos donde no existan eventos no deseados que detengan el proceso con los turnos que sí experimentaron detenciones programadas o eventos no deseados, entre los cuales se suele incluir: la falta de agua, las fallas mecánicas, barras cortadas, packers reventados, equipos mal instalados, reparaciones de emergencia, caídas de redes de comunicaciones o energía, actividad sísmica, desprendimiento de rocas entre otras de similar tenor.

Del libro de registros se estima que alrededor de un 30% de los turnos se ven afectados por eventos no deseados lo cual indica que se debe prestar especial atención a la completitud de tareas en los procedimientos y posible deterioro temprano de algunos insumos.

5.3.4 Pérdidas por calidad

Las pérdidas por calidad corresponden a trabajos que deben repetirse por ser rechazados debido a incumplimiento de las especificaciones. A partir de la información disponible, en el primer semestre del año en estudio, solo una vez se debió repetir el hidrofracturamiento en un pozo, lo que más que a defectos de calidad se debió a la pérdida de la hoja de registro del fracturamiento.

Como no existe un registro específico de los trabajos rehechos, por encuestas al personal se puede concluir que no más de una vez por semana se presenta alguna situación que requiera repetir el trabajo, lo cual representa un 4,8% de los turnos trabajados.

5.3.5 Eficiencia general de los equipos (OEE)

Eficiencia General de los Equipos o OEE (Overall Equipment Effectiveness) es un indicador utilizado principalmente para el cálculo de eficiencia de maquinaria que permite la medición integral de producción. Al igual que en la metodología *lean management*, este se basa en el sentido de perfección y por lo tanto nos permite adaptarlo para poder medir la eficiencia del proceso de hidrofracturamiento en la unidad PA.

Para adaptarlo al PA, se incluyen dentro del calculo de la OEE las pérdidas productivas mencionadas con anterioridad que son: por disponibilidad, por capacidad productiva y por calidad.

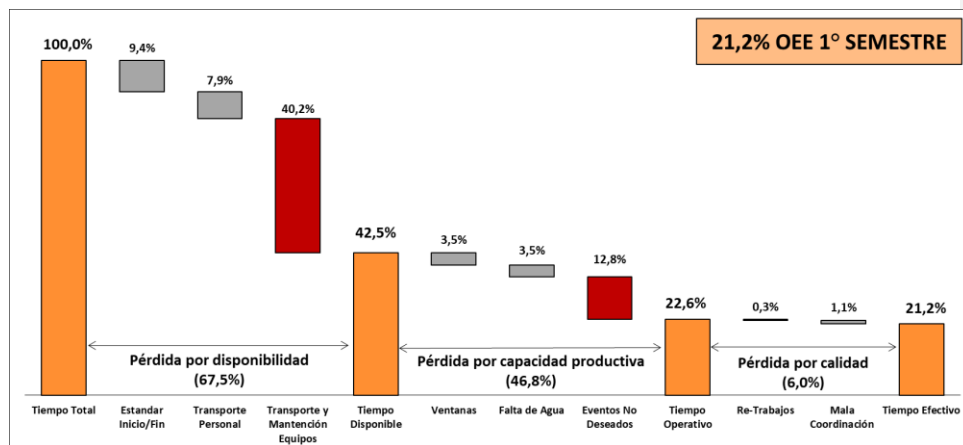


Figura 5.11: OEE del proceso de preacondicionamiento. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 5-10: Datos para generar el OEE. Fuente: Elaboración propia, 2019

Tiempo Total	100,0%		
	% disponibilidad	% del tiempo total	% acumulado total
Estándar Inicio/Fin	9,4%	9,4%	90,6%
Transporte Personal	7,9%	7,9%	82,7%
Transporte y Mantenimiento Equipos	40,2%	40,2%	42,5%
Tiempo Disponible	42,5%		
	% desempeño	% del tiempo total	% acumulado total
Ventanas	8,3%	3,5%	38,9%
Falta de Agua	8,3%	3,5%	35,4%
Eventos No Deseados	30,2%	12,8%	22,6%
Tiempo Operativo	22,6%		
	% calidad	% del tiempo total	% acumulado total
Re-Trabajos	1,2%	0,3%	22,3%
Mala Coordinación	4,8%	1,1%	21,2%
Tiempo Efectivo	21,2%		

Se puede pasar este tiempo efectivo a las horas correspondientes a un turno, recordando la modalidad de turno A-B-C con 40 minutos de sobretiempo entre turnos.

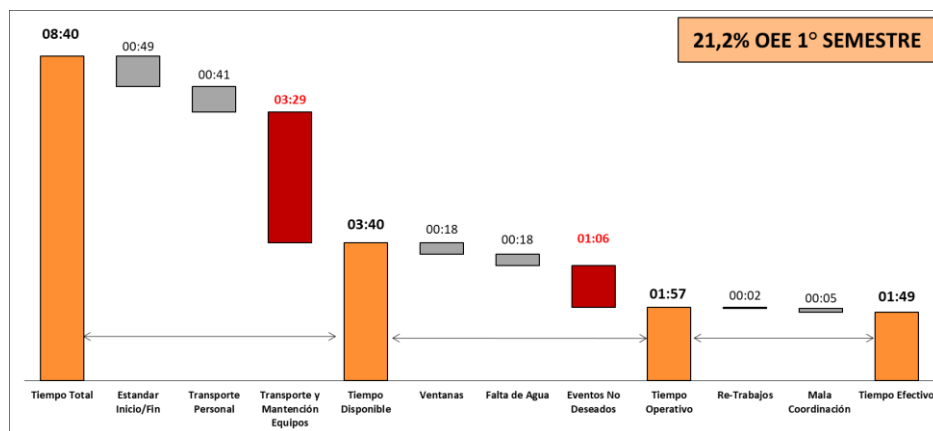


Figura 5.12: OEE del proceso de preacondicionamiento en hh: mm. Fuente: Elaboración propia, 2019

Se observa que las mayores pérdidas productivas corresponden a “transporte y mantenimiento de equipos” y “eventos no deseados”, los cuales generan amplio margen de mejora en busca de tener más tiempo disponible para realizar fracturas, sin dejar de generar planes de acción para otros puntos que permitan tener un proceso más eficiente.

Dado el tiempo efectivo y los tiempos de fractura se estima que se realizan alrededor de 2 fracturas por turno.

5.4 Generación de planes de acción

Antes de abordar los elementos del OEE, el primer plan de acción corresponde al de mejoras en la recolección, procesamiento y conservación de la información histórica de la Unidad PA, orientado a construir una base confiable de información histórica desde la cual se pueda extraer medidas de mejora continua.

En principio habrá que diseñar y aplicar procedimientos de registro de datos que eviten la dependencia de la subjetividad del informador de turno y lograr categorizar los datos de las distintas tareas. Además, se propone no solo registrar el qué, como en los libros de registro existentes, sino que también el cómo se hizo y ojalá también el por qué se hizo de esa manera.

Como acción inmediata se agrega a la información de operación un tercer tablero donde se registren y categoricen: las actividades incidentales, las pérdidas de tiempo por trabajos misceláneos, los eventos no deseados y los trabajos rehechos.

A su vez, como acción de mediano plazo se propone implementar un sistema de información único, centralizado y en línea, con menús de categorías para todos los registros asociados en principio a la unidad fractura. Incluyendo elementos como los tiempos de ejecución, presión de fractura y de expansión, hora de inicio y termino, flujo de agua, bomba utilizada y otros propios de la actividad de preacondicionamiento.

5.4.1 Estándar inicio/fin de turno

En la actividad de inicio/fin de turno de acuerdo con el estándar existente sobre las tareas a realizar en la jornada por parte del turno entrante, las que más demora generan son la de revisión de novedades, la coordinación entre áreas y la charla de seguridad.

Se propone implementar un plan de asignación de trabajo en que, en la reunión inicial entre jefes de turno, participe también un trabajador del grupo entrante, con liderazgo, para que se entere de las condiciones en que se recibe la operación y de las necesidades de coordinación con el contratista de perforación y terceros de la zona de trabajo.

La idea es que a continuación se repartan el trabajo dejando la función de coordinación a cargo del jefe de turno y la asignación de personal a los distintos lugares de trabajo a cargo del trabajador líder. De esa forma esas funciones se pueden realizar en paralelo para ahorrar tiempo.

El jefe de turno entrante tan pronto como comprende la situación operacional, inicia la coordinación con los distintos sectores donde se esté realizando preacondicionamiento para ver la habilitación de espacios o, en caso de traslado, coordinar el movimiento e instalación de equipos con quienes corresponda.

Respecto de las charlas de seguridad plantea mantener el formato, pero reforzar permanentemente la atención hacia la seguridad y la calidad.

5.4.2 Traslado de personal

El traslado hacia los lugares de FH, suele presentar demoras debidas a necesidades de coordinación ante situaciones imprevistas en el terreno o por interferencias con la salida del turno anterior. Si bien mucho de este tráfico no es evitable por acciones que pueda realizar la unidad, se espera que con el de asignación de trabajos se pueda minimizar las eventuales coordinaciones en el trayecto, y a consecuencia de ello, disminuir los tiempos de traslado a o dese los logares de FH.

5.4.3 Tiempo entre pozos

Tal como se observó en el resumen OEE, el principal foco de pérdidas por disponibilidad se debe a traslado e instalación de equipos, respecto de lo cual es necesario aclarar que dicho tiempo se refiere más bien al tiempo que media entre que termina el fracturamiento de un pozo hasta que comienza el fracturamiento en el que le sigue de acuerdo con el plan de fracturamiento.

Así, ocurre que aun cuando el equipo y sus operadores están en situación de iniciar la fragmentación, no pueden hacerlo porque todavía el sitio está ocupado por el contratista de perforación. A veces, es tal el atraso de la perforación, que se prefiere buscar sitios de trabajo alternativos en otros sectores de la mina, donde proseguir con el hidrofracturamiento para no dejar los equipos en reserva.

Estos reemplazos de sectores de trabajo, por la falta de pozos, suelen ser planificados en plazos muy breves y muchas veces no resultan ser del todo óptimos, agregando tiempo innecesario a los traslados.

Una de las causas de la demora en el traslado propiamente tal de equipos, se piensa que es el deterioro de la infraestructura que permite el desplazamiento, tanto en carros de empuje o los propios sistemas de traslación de algunos equipos. Sin embargo, la principal causa son los considerables atrasos en la perforación de pozos, lo que impide el inicio oportuno del hidrofracturamiento.

En consecuencia, como plan de acción se propone mejorar la planificación con el contratista de perforación y generar un plan de ventanas de tiempo con acceso a zonas exclusivas de PA (Halos de seguridad) donde éste pueda avanzar con la perforación mientras no se esté realizando fracturamiento propiamente tal.

También, para el corto plazo se intentará habilitar sectores alternativos del proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM), donde se pueda realizar preacondicionamiento trabajando alternadamente en FH o perforación lejos de los halos de seguridad. En este caso la Unidad PA podría facilitar sus propios equipos de perforación a la empresa contratista para poder realizar más metros de

pozos en el sector más atrasado en Mina Esmeralda, tanto nivel de producción como nivel de hundimiento, mientras se efectúan fracturas en pozos de NNM.

Una vez finalizada la perforación de los pozos en el sector Esmeralda, se planifica el PAM de tal forma de completar el FH en los pozos de Mina Esmeralda y luego continuar con los otros niveles. En esta etapa se seguirá procurando mantener la coordinación con la empresa contratista de perforación, pero esta vez sin los equipos propios de la Unidad PA.

Paralelamente a la implementación de este plan de acción, se presenta la oportunidad de aplicar el FH en sectores del Proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM) con una bomba propia de dicho proyecto, lo cual puede contribuir a mejorar el cumplimiento de plan de perforación del año.

5.4.4 Mantención y reparación de equipos

Al analizar los datos de los libros de novedades se encuentra una disponibilidad más baja de lo esperado para cada bomba y los elementos que la acompañan, pero que por sí solos siguen siendo valores que permiten tener un ritmo de trabajo constante.

5.4.5 Ventanas de operación para obras de construcción

Además de la coexistencia del hidrofracturamiento con la perforación de los pozos en espacios comunes de trabajo, muchos de los trabajos realizados por la unidad de preacondicionamiento se hacen después o en paralelo con los trabajos de la Unidad de Desarrollos y Construcción Minera, lo cual también requiere el uso compartido de los mismos sitios de trabajo y la consecuente coordinación de actividades, en la que se busca programar momentos de la jornada, denominados localmente como ventanas, en que se permite el acceso y ejecución de tareas de desarrollo y construcción al interior del halo de seguridad.

El plan de acción para poder coordinar los trabajos en áreas comunes consiste en establecer reuniones periódicas con los distintos jefes de unidad de sectores en conflicto, con un protocolo de formalización de los acuerdos ante la Gerencia de Obras Mina, con el objeto de comprometer el efectivo cumplimiento de estos.

5.4.6 Detención por falta de agua

El plan de acción para evitar las pérdidas por falta de agua consiste en disponer de estanques portátiles que permiten el almacenamiento momentáneo, del agua que ingresa a las fracturas y su posterior recuperación, los cuales se pueden rellenar en los puntos donde hay suministro.

Existen sectores donde el estanque logra recuperar su contenido inicial mientras se realiza la fractura, en otros puede quedar casi vacío o directamente puede cancelarse alguna fractura por falta de agua.

Los últimos dos casos suelen ser más probables con las bombas de mayor potencia, por lo tanto, para estas bombas se propone el uso de estanques más grandes o tener más de una unidad compatible con las dimensiones de los accesos a las zonas de PA.

5.4.7 Eventos no deseados

El plan de acción para reducir las pérdidas por eventos no deseados consiste en desarrollar una práctica de efectuar muchas acciones preventivas, que, entre todas, ocupan menor tiempo que cualquiera de los eventos indeseables por sí solos.

Se trata entonces de hacer un cambio cultural, este trabajo se orienta a las personas, específicamente para darles la capacidad y el respaldo necesario de modo que cada trabajador se sienta libre de exponer cualquier condición subestándar de seguridad o calidad del proceso en los sectores de trabajo. De esa manera se puedan tomar las medidas preventivas o correctivas para se requieran para evitar un mal mayor.

También se planea realizar inspecciones en terreno para verificar que se cumplen los procedimientos por parte de los trabajadores propios y de contratistas. Estas inspecciones son de carácter incidental, ya que no generan directamente valor a proceso, pero sí son necesarias para evitar los eventos no deseados que se previenen al cumplir los procedimientos.

Otra acción inmediata muy particular que se propone es la de capacitar a más personal e instaurar o modificar algún procedimiento sobre el manejo y armado de los *packers*, para asegurar la funcionalidad de esa tarea. Para realizar esta tarea, en la actualidad hay un solo trabajador capacitado por lo que en caso de su ausencia no se puede hacer el fracturamiento.

5.4.8 Perdidas por calidad

Para este punto crítico no hay propuesta específica de plan de acción, debido a que las pérdidas por calidad suelen ser menores en comparación a los otros puntos, hay que ocuparse de que la ocurrencia de estas, tienda al mínimo posible, ya que son directamente desperdicios de la unidad.

Para ello se espera que los planes de acción propuestos anteriormente para las otras pérdidas también contribuyan a disminuir estas pérdidas.

5.4.9 Plan anual y mensual de fracturamiento

Respecto del plan de fracturamiento, y como una forma de consolidar la transformación del modo de trabajo de la Unidad PA, se concluye esta etapa modificando el plan de fracturamiento del segundo semestre. El plan modificado responde a la necesidad de efectuar la totalidad de fracturamiento originalmente programado para el segundo semestre y completar el 60% faltante de pozos que no se efectuaron en el primer semestre. Para ello se debe aumentar el rendimiento de la unidad aplicando los planes de acción anteriormente descritos.

Además de esta actualización del plan de fracturamiento, se pretende confirmar los estudios realizados por la Superintendencia de Estudios Geomecánicos sobre el efecto de usar la bomba Conmico3, de mayor potencia.

Lo que se va a confirmar es la posibilidad de aumentar la extensión de las fracturas, lo cual permitiría ampliar el espaciado entre pozos con la consiguiente reducción de la demanda de perforación. De confirmarse, dicha bomba se destinaría al Nivel de Hundimiento de la Mina Esmeralda, que es el sector con mayor déficit de fracturamiento.

5.5 Implementación

En esta etapa se define el detalle de ejecución de los planes y las variaciones esperables en los indicadores de desempeño. Se establece que este proceso finalizará al completar la ejecución del Plan de Avance Anual modificado, cuyos indicadores de desempeño revelarán en ese momento, si se logró la mejora del rendimiento de la unidad y cuáles fueron los elementos que ayudaron u obstaculizaron a esta transformación.

5.5.1 Tablero de control N°3

Se implementa un “Tablero de Tareas Misceláneas” (ver figura 5.13) con el fin de poder llevar un control de las tareas más rutinarias de la unidad, especialmente las referidas a trabajos que se realizan en los turnos con déficit de realización de fracturas. Aunque este tablero provoca cierta incomodidad en los trabajadores, debido a que muchas de esas tareas no constituyen un procedimiento de trabajo con gran efecto en la operación, este registro representa una oportunidad de mejora porque permite incluir estas tareas rutinarias dentro de los procedimientos ya existentes. Un ejemplo de oportunidad aprovechada fue la idea planteada en los planes de acción sobre la capacitación y generación de procedimiento sobre el armado y mantenimiento de los *packers*.

Actividad	Responsable	Día 1			Día 2			Día 3			Día 4			Día 5			Día 6			Día 7				
		C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B		
Armado & Mantenimiento de Straddle Packers	01 02 03																							
Verificación de Elementos de Trabajo en Altura	01 02 03																							
Trabajos de Estructura & Pintura	01 02 03						1			2														
Limpieza del Taller	01 02 03	3					1																	
Operación & Gestión Fracturamiento a Distancia	01 02 03	3					1																	
Información Tarjas Equipos & Tableros de Control	01 02 03																							
Lavado de Camionetas	01 02 03	3																						
Orden y Mantenimiento Cámaras & PC tele comando - Bajil	01 02 03																							

Figura 5.13: Tablero N°3 de tareas misceláneas. Fuente: Unidad de preacondicionamiento, 2019.

5.5.2 Base de datos única

La segunda acción de implementación corresponde a la creación de una base de datos (ver figura 5.14) que reúne toda la información disponible, incluyendo pestañas de navegación por la base y encontrar fácilmente cualquiera de los pozos y ver tanto los datos técnicos de sus fracturas, como la información de las fracturas por turno, avance de plan, horarios de fracturas y continuidad operacional.

ID_POZO	SECTOR	UBICACIÓN	EQUIPO	Valores			
				Suma de FRACT_REALIZADA	Suma de PACKS_ROTOS	Suma de C/FILT_FRAC	Cuenta de Q POZOS
1	NUEVO NIVEL MINA			46	4	0	1
3	NUEVO NIVEL MINA			57	0	0	1
5	NUEVO NIVEL MINA			48	1	1	1
190	RENO UCL			63	0	14	1
191	RENO UCL			37	0	2	1
192	RENO UCL			34	0	3	1
P-245	UCL ESMERALDA BLOQUE 1			63	0	4	1
P-267	UCL ESMERALDA BLOQUE 2			63	0	0	1
P-274	UCL ESMERALDA BLOQUE 1			58	0	2	1
P-277	UCL ESMERALDA BLOQUE 1			63	0	3	1
P-278	UCL ESMERALDA BLOQUE 1			63	0	3	1
P-279	UCL ESMERALDA BLOQUE 1			63	0	6	1
P-4	NUEVO NIVEL MINA			43	0	0	1
P-47E	NP RENO			15	3	9	1
P-48E	NP RENO			17	0	7	1
P-49E	NP RENO			17	0	3	1
P-50E	NP RENO			22	0	8	1
P-51E	NP RENO			10	3	2	1
P-52E	NP RENO			25	1	3	1
P-81E	NP ESMERALDA BLOQUE 1			11	0	0	1
P-84E	NP ESMERALDA BLOQUE 1			9	2	1	1
P-88E	NP ESMERALDA BLOQUE 1			11	1	0	1
P-92E	NP ESMERALDA BLOQUE 1			7	1	0	1
PR-7	NP PANEL RENO			32	0	5	1
PR-8	NP PANEL RENO			32	0	5	1
(en blanco)	(en blanco)	(en blanco)	(en blanco)	0	0	0	0
Total general				3956	52	250	114

Figura 5.14: Base de datos de fractura. Fuente: Unidad de preacondicionamiento, 2019.

De esta planilla se puede obtener la gran mayoría de la información para revisar y realizar los cálculos para los indicadores de desempeño que tengan relación directa con las fracturas.

El problema principal de esta base de datos es que se debe pasar la información desde las planillas físicas hacia una de las pestañas donde se recibe la data, por lo que se suele dejar a un lado por realizar tareas de la propia unidad. Además, sigue siendo información pura que debe ser procesada para el cálculo de indicadores y que, por consiguiente, no genera valor por sí solo. De todas formas, el poder tener la información más accesible ayuda a presentar resultados de los planes de acción de forma más eficiente.

5.5.3 Plan de asignaciones de personal y sitios de trabajo

La implementación de este nuevo sistema de asignación de personal y sitios de trabajo por los propios integrantes de las cuadrillas de trabajo se efectuó sin inconvenientes con la cooperación de los trabajadores, dejando en todo caso, la aprobación definitiva al jefe de turno.

La bajada temprana de información induce formas de anticipación en algunos trabajadores, quienes empiezan inmediatamente a proponer alternativas para resolver dificultades que

presento el turno anterior, formando un ambiente de trabajo que se encuentra mejor predispuesto a recibir las órdenes del día.

Por otro lado, al tener el jefe de turno mayor tiempo de preparación y coordinación, antes de entregar las pautas al personal, permite que los traslados de trabajadores se hagan directamente al sitio de FH sin acompañar al jefe a las oficinas de terceros en que se hace la coordinación de tareas.

5.5.4 Plan de trabajo conjunto con contratista de perforación

Este plan consiste en pasar ciertos equipos propios de la Unidad PA al contratista para que puedan ser utilizados y aumentar su capacidad de perforación, concentrando el trabajo en el sector de Mina Esmeralda mientras la Unidad PA realiza los trabajos hidrofracturamiento para Nuevo Nivel Mina lo cual durará 2 meses

Se estima que, en ese período de 2 meses, el contratista podrá poner en disposición de la unidad PA la mayor cantidad de pozos perforados posibles a disposición de realizar fracturas, habilitando gran cantidad de pozos en sectores que presentan atrasos considerables. Con esto se busca reducir los traslados de equipos, pudiendo instalar y realizar FH durante semanas en estos sectores habilitados y solamente realizar movimientos en casos excepcionales.

5.5.5 Reunión de planificación

Además de coordinar con el contratista de PA, se debe compartir el terreno con la unidad de Desarrollos y Construcción Minera. Para ello se propone retomar las reuniones semanales a cargo de la Gerencia de Obras Minas, en donde se establece la absoluta prioridad al preacondicionamiento.

En estas reuniones se revisan las tareas a realizar por ambas unidades, y se establecen los períodos de utilización de espacios comunes en los niveles de producción.

5.5.6 Estanques

Aunque la utilización de espacios sea un problema, el estar trabajando junto a la unidad de obras ha hecho necesario el tener nuevos estanques para realizar la fractura. El estar más cercano al crecimiento de los sectores productivos implica que las redes aún no funcionan en su totalidad, por lo que tener uno o dos estanques permite realizar un par de fracturas sin interrupciones.

En algunas ocasiones es necesario detener el fracturamiento mientras se llenan estos estanques, por lo que se generan ventanas de trabajo para otras unidades cercanas a donde se realiza la fractura. Si bien el instalar estanques acota el espacio físico disponible, esta implementación permite trabajar de mejor forma con otras áreas y genera un ciclo de confianza positiva con otras unidades, en especial con aquellas presentes en las reuniones de planificación.

5.5.7 Manipulación de Packers

Al revisar los procedimientos sobre la manipulación de *packers* se encuentra que en ellos se regulan los trabajos de: movimiento desde el taller hasta sector productivo, su instalación en la sonda, la forma de desinstalarlo, sin embargo, como este elemento debe armarse y repararse en taller, la disponibilidad de *packers* se afecta porque hay solamente un operador capacitado para ese trabajo, el cual trabaja un turno al día. El plan, en este caso consiste en capacitar a todo o una parte importante del personal y no depender de solo un trabajador.

5.5.8 Estudio sobre bomba de mayor potencia

La dirección de geomecánica divisional realiza pruebas en terreno (figura 5.15) para confirmar la primera etapa de estudios sobre el radio de influencia y el tiempo de ejecución de la fractura. Los resultados obtenidos para esta etapa de la prueba de morfología evidencian que la inyección de agua durante al menos 25 minutos a una cantidad promedio de agua de 345 litros por minuto, alcanza una longitud promedio de 30 metros.

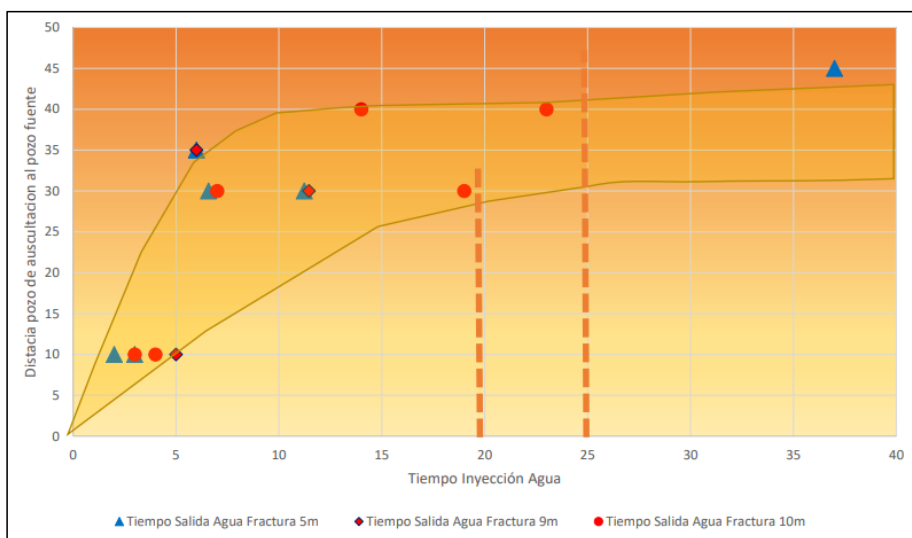


Figura 5.15: Propagación de la fractura en el tiempo. Fuente: Superintendencia de Estudios Geomecánicos, 2019.

Este estudio permite cambiar la configuración de pozos en los sectores donde se realice fractura con la bomba “Connico 3”, la cual tiene una capacidad nominal de presión de ruptura a unos 77 [MPa], además de una capacidad de inyección de agua a unos 377 [lts/min].

Con el cambio de configuración se pretende abarcar la misma área preacondicionada con menos pozos, por lo que el plan anual cambia. Los sectores donde se utilizará esta bomba son el bloque 2 de la Mina Esmeralda, tanto en el nivel de producción como en el de hundimiento. Se escoge

este sector debido a que es donde se encuentran las mayores presiones de ruptura y de expansión de fractura debido a la dureza que posee el macizo.

5.5.9 Actualización del Plan de Avance

Existen varias condicionantes que permiten actualizar y adaptar el plan de avance anual de la unidad de preconditionamiento para el segundo semestre. Lo primero que se recomienda es no considerar las diferencias que existen en el plan anterior y dar inicio al segundo semestre con un plan enfocado en los desafíos que vienen más que pensar en lo que se hizo mal anteriormente.

Esta nueva planificación se realiza desde el mes de agosto en adelante debido al cierre de mes mientras se iniciaban otras tareas propias del estudio. En esta planificación no se consideran los pozos fracturados en Rio Blanco para el proyecto de Nuevo Nivel Mina, dado que están fuera del plan, pero si se tendrán en consideración para el cálculo de rendimiento una vez finalice el periodo de implementación.

Por otro lado, se propone un plan (figura 5.16, 5.17, 5.18 y tabla 5-11) que vaya escalando en exigencia hasta el último cuatrimestre, siendo este periodo donde la exigencia por lograr el plan anual será mayor. Además, la puesta en marcha de la bomba “Connico 1” luego de su reparación facilita el tener 3 sectores posibles de fractura, en caso de que situaciones de coordinación o eventos no deseados no permitan que alguna de las bombas esté disponible. Se estima que en octubre será un mes de evaluación por parte del NNM hacia la unidad PA y por lo tanto no habrá pozos que fracturar en Rio Blanco, por lo que se espera que sea el mes con mayor cantidad de pozos en el plan.

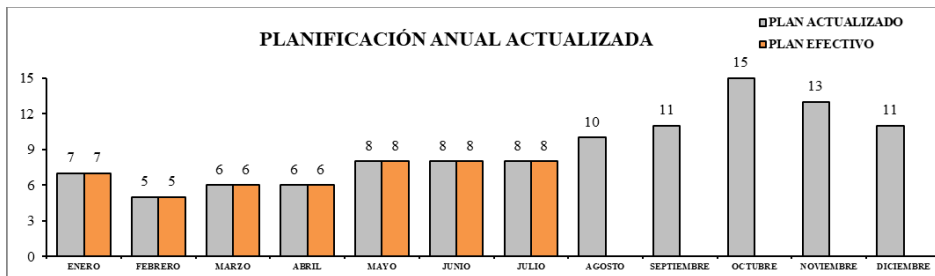


Figura 5.16: Planificación actualizada del plan de avance. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.

APLICACIÓN METODOLOGÍA LEAN MANAGEMENT PREACONDICIONAMIENTO EN MINA SUBTERRÁNEA

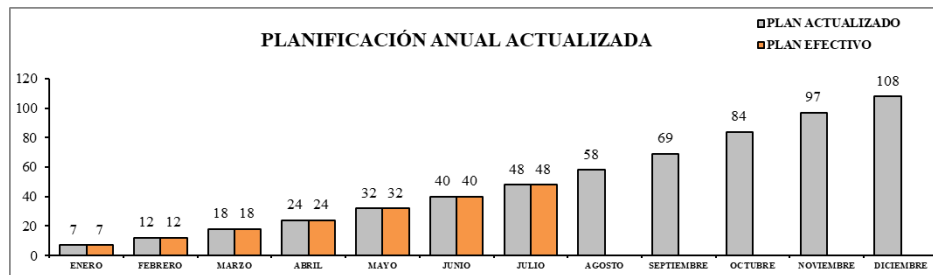


Figura 5.17: Planificación acumulada del plan de avance. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.

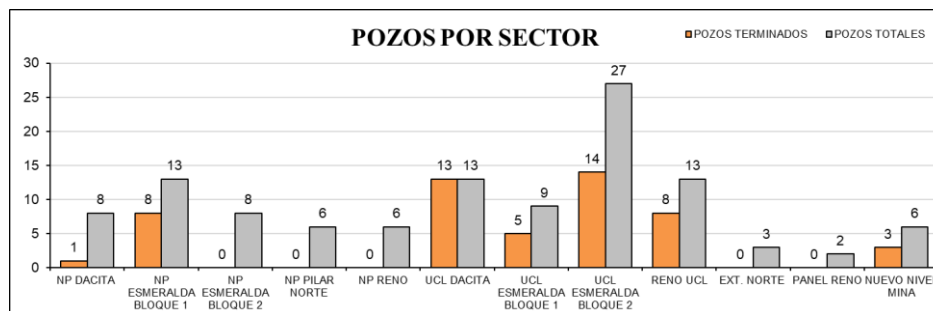


Figura 5.18: Pozos a fracturar por sector. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.

Tabla 5-11: Programación de avance por sector. Fuente: Unidad de Preacondicionamiento, 2019.

SECTOR	ACUMULADO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
NP DACITA	1	2	1	4			8
NP ESMERALDA BLOQUE 1	7	3	4	1			15
NP ESMERALDA BLOQUE 2	-				5	6	11
NP PILAR NORTE	-						6*
NP RENO	-				3	3	6
UCL DACITA	13						13
UCL ESMERALDA BLOQUE 1	5				4	2 + 2*	11
UCL ESMERALDA BLOQUE 2	14	1	4	7	1		27
RENO UCL	8	4					12
EXT. NORTE ESMERALDA	-			3			3
PANEL RENO	-		2				2
TOTAL	48	10	11	15	13	11+2*	108
NUEVO NIVEL MINA	3		1	1		1	6

Dado el nuevo plan de avance, se pospone la realización del fracturamiento en el sector de NP Pilar Norte para el periodo 2020 y existe la posibilidad que se puedan realizar más pozos en el nivel de hundimiento esmeralda bloque 1.

La actualización del plan permite planificar con anticipación los sectores a los cuales debe realizarse fracturas. Cabe destacar que el plan inicial consideraba un total de 119 pozos y que debido a la nueva configuración disminuyó a 108 pozos, pero con el compromiso de realizar fracturas en el NNM, completando un año con 114 pozos teóricos.

Para poder cumplir con el plan de avance es fundamental que los trabajos se realicen de forma continua y por eso se le dio énfasis nuevamente al fracturamiento a distancia. Al ser un procedimiento que ya se había realizado con anterioridad no presento mayores dificultades en su ejecución. La puesta en marcha es algo lenta debido a lo dañada que estaba la red por su poco uso durante un largo periodo de tiempo, pero una vez realizada la conexión se pudo concretar y efectuar fracturas desde el taller. A destacar que se hicieron fracturas en más de un área productiva y se planteó la posibilidad de efectuar fracturas del NNM desde el taller, pero que finalmente por protocolos de seguridad se congeló esa posibilidad.

5.5.10 Estudio de trabajo en paralelo a más de un pozo.

Con la disminución de la dotación de gente en los momentos que se realizaba fractura en el Nuevo Nivel Mina se planteó la posibilidad de fracturar 2 pozos en la Mina Esmeralda con una cuadrilla y desde una única sala de control. Por la falta de los procedimientos de trabajo y por protocolos de seguridad es que esta idea no se ejecutó, pero quedó en el aire si realmente es efectivo trabajar con la dotación actual o si puede aumentarse el rendimiento con una configuración de fracturas en paralelo manteniendo la gente que trabaja en la unidad.

Se plantea generar una simulación en el software *Arena simulation*, con el fin de determinar si al menos esta idea es viable. Desde la Superintendencia de Servicios Minería se pide que al menos se generen 3 simulaciones; como se efectúa el proceso actualmente, como sería si se trabaja con 2 bombas y con 3 bombas fracturando en paralelo.

La primera simulación se realiza con los parámetros asociados a cada bomba y servirán como control de la simulación, ya que sus valores deberían ser los más cercanos a la realidad de la unidad. Junto a esto, al realizar la configuración de 2 sectores debe realizarse con las 3 combinaciones posibles que son; Connico 1-2, 2-3, 1-3. Finalmente se ejecuta la combinación de las 3 bombas trabajando en simultáneo.

El alcance de este estudio es para un estudio de perfil, con el fin de determinar si existen escenarios donde esta configuración sea posible antes de invertir más recursos en este. Los parámetros por utilizar serán los entregados una vez se cumpla el periodo de implementación de los planes de acción.

Para concluir el proceso de implementación es importante entender que a medida que los planes se ejecutan, la misma filosofía *lean* se encarga de retroalimentar el proceso en búsqueda de la excelencia operacional. Aun así, esta metodología se suele trabajar en ciclos de tiempos limitados con el fin de generar espacios donde se pueda evaluar la eficacia de la implementación o, de ser necesario, abordar los problemas de rendimientos desde otra perspectiva.

6. RESULTADOS

En esta sección se presenta los resultados a través de los indicadores de desempeño y rendimiento de la Unidad de Preacondicionamiento.

6.1 Aspiración

El rendimiento de la unidad es el principal indicador del preacondicionamiento, el cual debe compararse tanto con la aspiración establecida al inicio del estudio como con situación inicial en que se encontró a la unidad.

Tabla 6-1: Resultados de rendimiento en base a los pozos y fractura. Fuente: Elaboración propia, 2019.

PERIODO	ASPIRACIÓN		REAL 1ER SEMESTRE		REAL 2DO SEMESTRE	
	POZOS	FRACTURA	POZOS	FRACTURA	POZOS	FRACTURA
SEMANA	7,9	295	1,5	62	3,5	127
MES	31,8	1182	6,7	269	14,3	511
RENDIMIENTO DE LA UNIDAD	100%		21%		44%	

Tabla 6-2: Elementos a considerar para el cálculo de rendimiento. Fuente: Elaboración propia, 2019.

ELEMENTOS QUE CONSIDERAR	BOMBA	PARAMETRO	ASPIRACIÓN	1ER SEMESTRE	2DO SEMESTRE
Disponibilidad Bombas	CONMICO 1	%	90%	-	72%
	CONMICO 2	%	90%	72%	78%
	CONMICO 3	%	90%	80%	89%
Tiempo entre fracturas	CONMICO 1	hh:mm	0:50	-	1:06
	CONMICO 2	hh:mm	0:50	1:10	1:02
	CONMICO 3	hh:mm	0:45	0:55	0:50
Traslado e instalación promedio	CONMICO 1	turnos	3,33	-	6,7
	CONMICO 2	turnos	3,25	11,1	6,5
	CONMICO 3	turnos	2,5	6,2	5,0
Inicio Primera Fractura (Primeras 2 horas)		%	90%	62%	66%
Inicio Última Fractura (Últimas 2 horas)		%	90%	52%	70%
% Turnos con Fracturas		%	72,1%	51,5%	63,9%

6.2 Eficiencia general de los equipos (OEE)

Se genera un nuevo OEE, esta vez con los parámetros obtenidos durante el segundo semestre de fracturamiento, que corresponde al tiempo de implementación de los planes de acción.

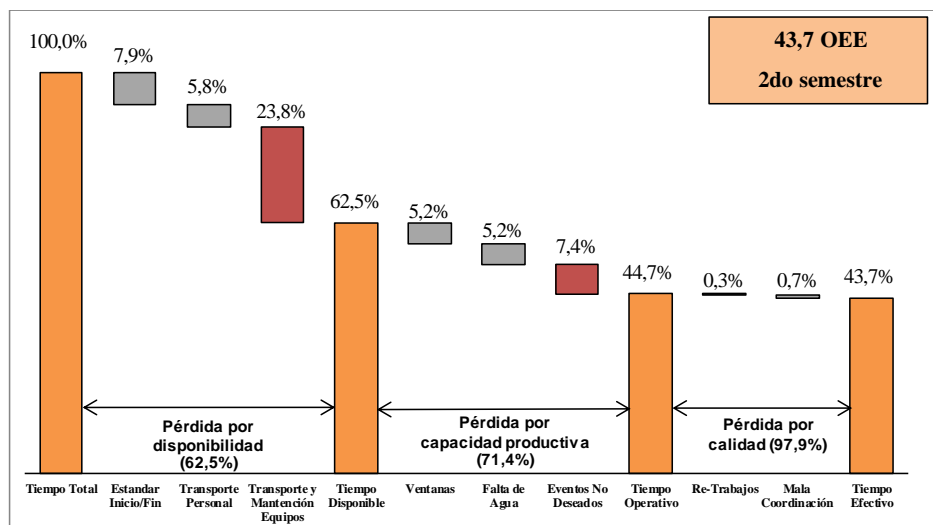


Figura 6.1: OEE del proceso de preacondicionamiento. Fuente: Elaboración propia, 2019

Tabla 6-3: Datos para generar el OEE del segundo semestre. Fuente: Elaboración propia, 2019

Tiempo Total	100,0%		
	% disponibilidad	% del tiempo total	% acumulado total
Estándar Inicio/Fin	7,9%	9,4%	92,1%
Transporte Personal	5,8%	7,9%	86,3%
Transporte y Mantenimiento Equipos	23,8%	40,2%	62,5%
Tiempo Disponible	62,5%		
	% desempeño	% del tiempo total	% acumulado total
Ventanas	8,3%	5,2%	57,3%
Falta de Agua	8,3%	5,2%	52,1%
Eventos No Deseados	11,9%	7,4%	44,7%
Tiempo Operativo	44,7%		
	% calidad	% del tiempo total	% acumulado total
Re-Trabajos	0,3%	0,1%	44,4%
Mala Coordinación	0,7%	0,3%	43,7%
Tiempo Efectivo	43,7%		

6.3 Resultados generales

Con relación al Tablero de Control N°1, con relación a la cantidad de fracturas y la hora de la primera y última fractura, se genera cambios con el plan de tareas a ejecutar, la puesta en marcha del fracturamiento a distancia y de los planes de coordinación entre áreas, logrando lo siguiente:

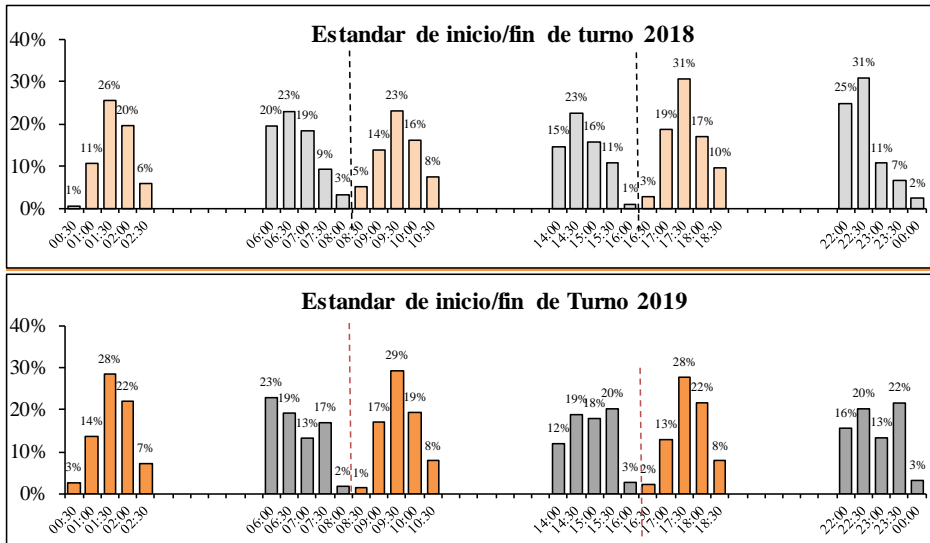


Figura 6.2: Comparación de tiempos entregados por tablero de control N°1 para periodo 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 6-4: Comparación de tiempos entre primeras y últimas fracturas por turno, periodo 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

PRIMERAS 2 HORAS	T°C	T°A	T°B
2019	67% ↑	67% ↑	65% ↑
2018	58%	58%	70%
ULTIMAS 2 HORAS	T°C	T°A	T°B
2019	72% ↑	69% ↑	71% ↑
2018	54%	51%	51%

En relación con los datos recolectados por el Tablero de control N°2 se obtiene al final de año, luego de ejecutar el plan de ejecución de trabajos diarios y pautas para el inicio de turno, lo siguiente:

Tabla 6-5: Indicadores Tablero de control N°2 para todo el año 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

PROMEDIO AÑO 2019								
Salida de Camionetas			Llegada a Posturas			Tiempo a Postura		
Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
0:42	8:44	16:43	1:01	9:02	16:59	0:19	0:18	0:16
Salida de Posturas			Llegada de Camionetas			Tiempo a Taller		
Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
7:31	15:36	23:29	7:46	15:51	23:45	0:15	0:15	0:16

Tabla 6-6: Mejor mes de tiempos para Tablero de control N°2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

OCTUBRE – 2019 (Mejor Mes)								
Salida de Camionetas			Llegada a Posturas			Tiempo a Postura		
Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
0:40	8:40	16:41	0:59	8:57	16:59	0:19	0:17	0:18
Salida de Posturas			Llegada de Camionetas			Tiempo a Taller		
Turno C	A	B	Turno C	Turno A	Turno B	Turno C	Turno A	Turno B
7:38	15:46	23:33	7:54	16:01	23:50	0:16	0:15	0:17

Para ver los resultados en la continuidad del trabajo se compara la frecuencia de fracturas entre el periodo 2018 y el 2019. Se destacan los principales baches, que representan los cambios de turno.

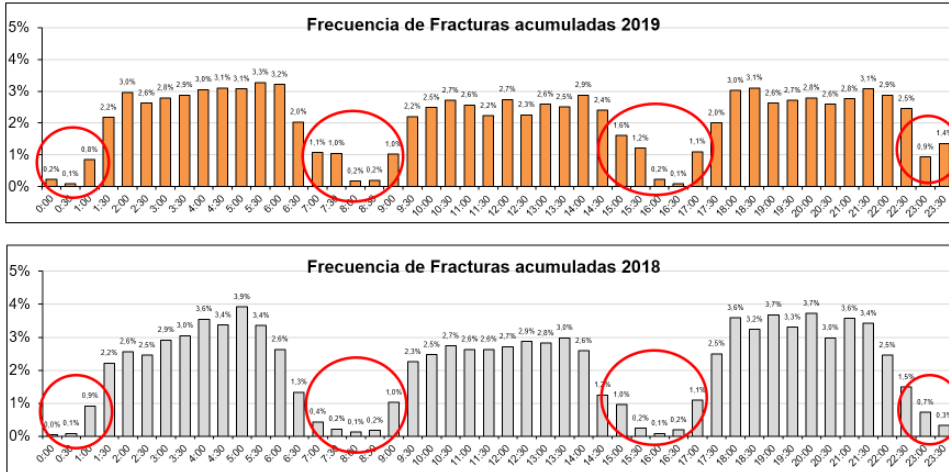


Figura 6.3: Comparación de fracturas acumuladas entre 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Por otro lado, se hace énfasis en las fracturas que se realizan a fin de turno, que vienen dadas con la puesta en marcha del fracturamiento a distancia.

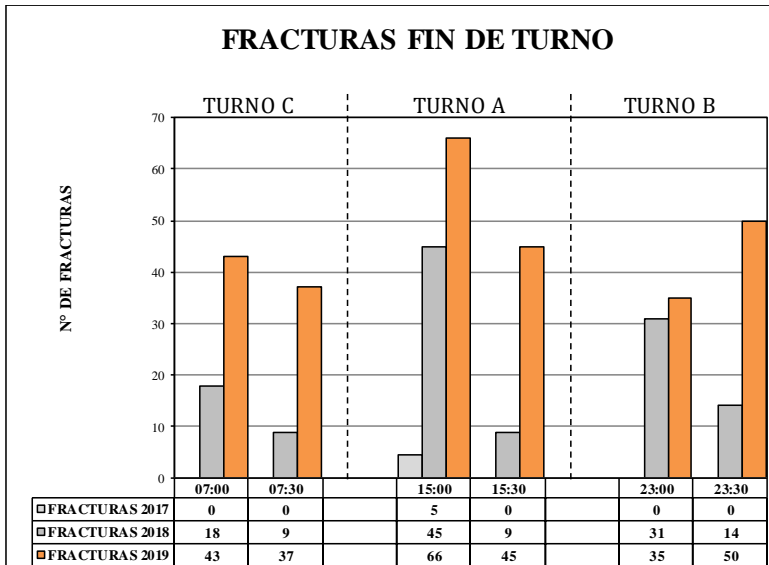


Figura 6.4: Comparación de fracturas acumuladas entre 2018 y 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

6.4 Plan anual de fracturación

Finalmente, todos los elementos anteriores se deben reflejar en el avance del plan, tanto mensual como anual, entregado del plan dado por la Gerencia Mina. Se cumple el plan establecido por la Gerencia Mina para el periodo 2019. Hay que recordar que los pozos fracturados en NNM no forman parte de este plan. Por otro lado, dado el rendimiento de la unidad es que en el mes de diciembre se fracturan 2 pozos extras para adelantar parte del plan 2020.

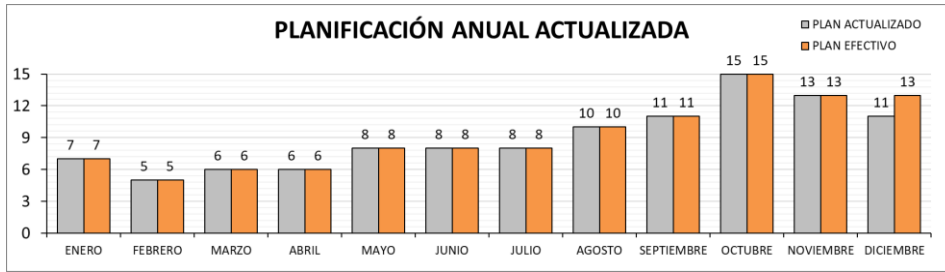


Figura 6.5: Plan anual por mes de los pozos a fracturados en 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

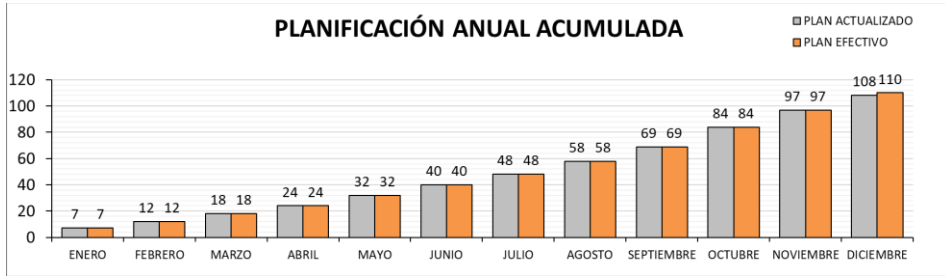


Figura 6.6: Plan anual acumulado de los pozos a fracturar. Fuente: Elaboración propia, 2019.

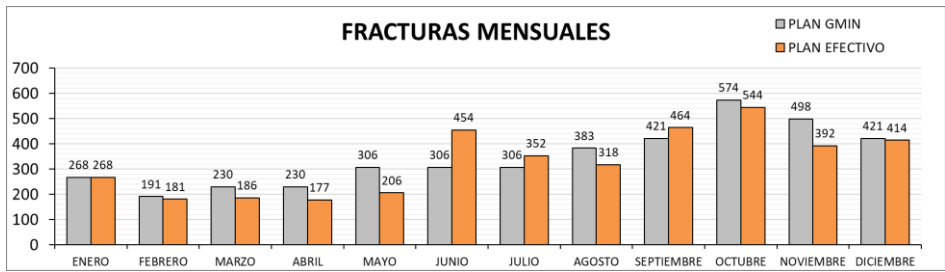


Figura 6.7: Fracturas realizadas por mes en el periodo el 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

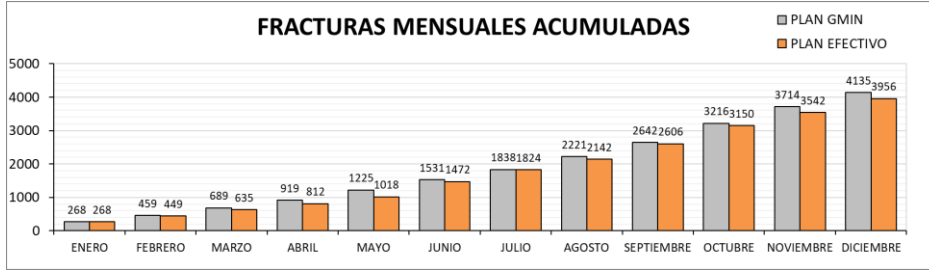


Figura 6.8: Fracturas acumuladas realizadas en el año 2019. Fuente: Elaboración propia, 2019.

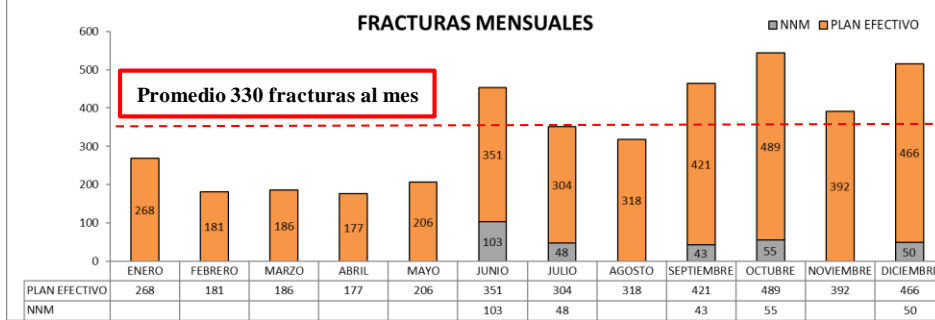


Figura 6.9: Fracturas por mes, separando el plan con NNM. Fuente: Elaboración propia, 2019.

6.5 Simulación en Arena Simulator

Desde la Gerencia Mina se pide contrastar la información calculada a través de una simulación en *Arena Simulator* determinar si la cantidad de fracturas realizadas en el año concuerdan con los estudios y cálculos realizados.

El flujo de la simulación se representa con 5 elementos clave que permiten estimar la realización de fractura. Además, se categoriza aquellas perdidas más comunes.

Tabla 6-7: Elementos clave de la simulación. Fuente: Elaboración propia, 2019

FRACTURAS TOTALES REALIZADAS	Es la suma de todos los eventos, ya que considera cada intento de fractura
FRACTURA EN POSTURA	Fracturas realizadas correctamente
EVENTO NO DESEADO	Evento que interrumpe y/o paraliza la fractura
FALTA DE AGUA	Veces que una fractura se debo o no se pudo ejecutar por escasez hídrica
MANTENCIÓN	Veces que se debe reparar algún equipo. Puede ser programada o de urgencia
TRASLADO DE EQUIPO	Cada traslado implica el término de un pozo y el movimiento del equipo a un nuevo pozo

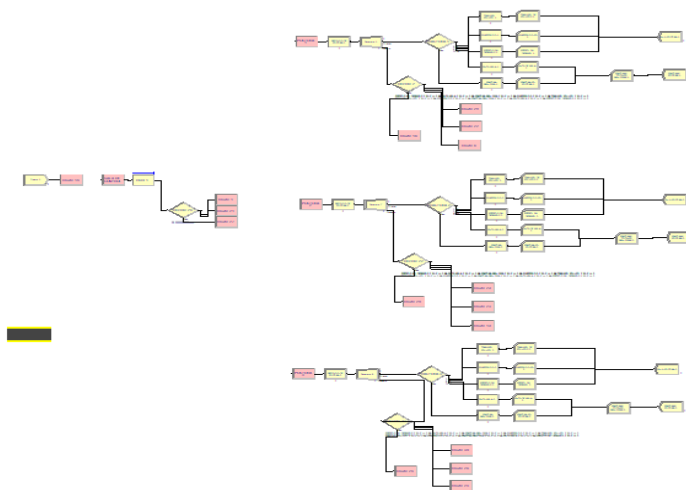


Figura 6.10: Flujo de tareas para la simulación. Fuente: Elaboración propia, 2019.

La simulación presenta las actividades de un turno normal, pero en un periodo de 1 año. El valor de fracturas que entrega solamente corresponde al turno estudiado, siendo este caso en particular el turno A.

Al simular cada bomba por separado se obtiene:

- Connico 1

Count	Value
EVENTO NO DESEADO 1	160.00
FALTA DE AGUA 1	397.00
FRACTURA EN POSTURA 1	1049.00
FRACTURAS TOTALES REALIZADAS 1	1446.00
MANTENCION PN 1	55.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 1	44.0000

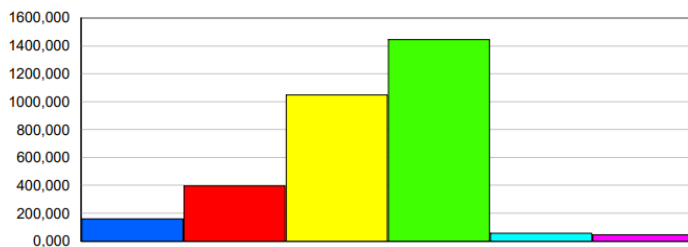


Figura 6.11: Resultados entregados por Arena para Connico 1. Fuente: Elaboración propia, 2019.

- Conmico 2

Count	Value
EVENTO NO DESEADO 1	205.00
FALTA DE AGUA 1	422.00
FRACTURA EN POSTURA 1	1137.00
FRACTURAS TOTALES REALIZADAS 1	1559.00
MANTENCION PN 1	47.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 1	51.0000

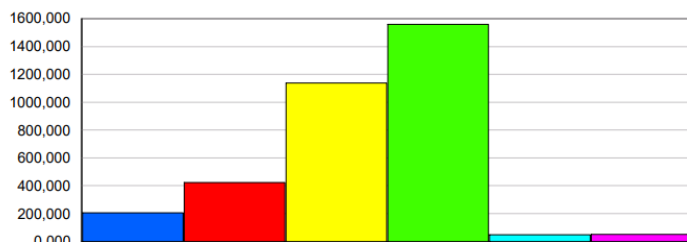


Figura 6.12: Resultados entregados por Arena para Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

- Conmico 3

Count	Value
EVENTO NO DESEADO 1	181.00
FALTA DE AGUA 1	410.00
FRACTURA EN POSTURA 1	1112.00
FRACTURAS TOTALES REALIZADAS 1	1522.00
MANTENCION PN 1	44.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 1	37.0000

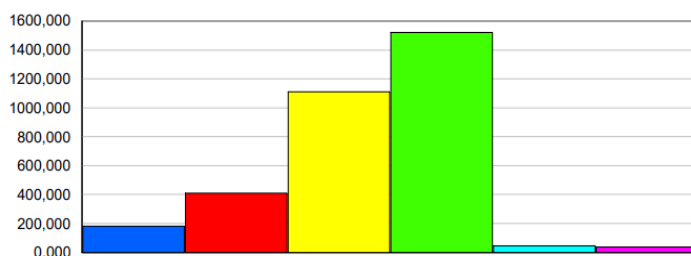


Figura 6.13: Resultados entregados por Arena para Conmico 3. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Para las distintas combinaciones se obtiene

- Conmico 1 (1) y Conmico 2 (2)

Count	Value
EVENTO NO DESEADO 1	82.0000
EVENTO NO DESEADO 2	129.00
FALTA DE AGUA 1	231.00
FALTA DE AGUA 2	223.00
FRACTURA EN POSTURA 1	634.00
FRACTURA EN POSTURA 2	599.00
FRACTURAS TOTALES	865.00
REALIZADAS 1	
FRACTURAS TOTALES REALIZADAS 2	822.00
MANTENCION PN 1	30.0000
MANTENCION PN 2	25.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 1	27.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 2	29.0000

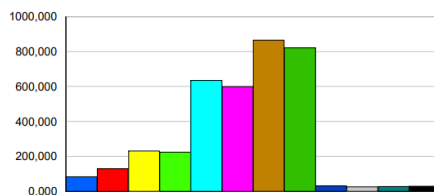


Figura 6.14: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 1 con la Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

- Conmico 1 (1) y Conmico 3 (2)

Count	Value
EVENTO NO DESEADO 1	127.00
EVENTO NO DESEADO 2	134.00
FALTA DE AGUA 1	273.00
FALTA DE AGUA 2	314.00
FRACTURA EN POSTURA 1	709.00
FRACTURA EN POSTURA 2	814.00
FRACTURAS TOTALES	982.00
REALIZADAS 1	
FRACTURAS TOTALES REALIZADAS 2	1128.00
MANTENCION PN 1	38.0000
MANTENCION PN 2	31.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 1	20.0000
TRASLADO DE EQUIPOS 2	45.0000

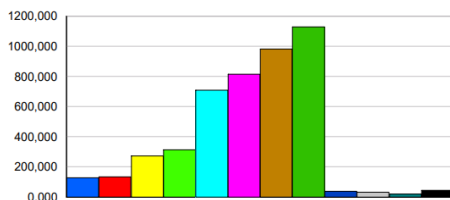


Figura 6.15: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 1 con la Conmico 3. Fuente: Elaboración propia, 2019.

- Conmico 3 (1) y Conmico 2 (2)



Figura 6.16: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 3 con la Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Se finaliza esta etapa con la evaluación de las 3 bombas funcionando en paralelo desde una única sala de control.

- Conmico 1 (1), Conmico 2 (2) y Conmico (3)

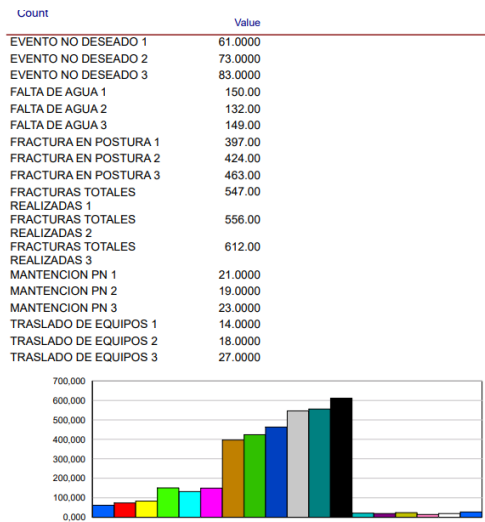


Figura 6.17: Resultados entregados por Arena para 2 sectores, combinando la bomba Conmico 3 con la Conmico 2. Fuente: Elaboración propia, 2019.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

Si bien algunos de los planes de acción no pudieron ser ejecutados, la mejora de rendimiento para la segunda parte del año es notable. Aunque las proyecciones para el segundo semestre eran más ambiciosas, si no existían herramientas que pudieran aportar para el aumento de rendimiento, el plan de avance actualizado quedaba como una idea más.

Al comparar el rendimiento de fracturas y pozos sobre la aspiración junto con el entregado por el OEE se debería obtener un valor bastante similar, idealmente igual. El tener que generar estos datos desde un registro de tareas puede provocar desviaciones de los valores reales, ya que existe la posibilidad que algunas interrupciones no queden anotadas y por consiguiente no se reflejen a la hora de estimar los tiempos o porcentajes de pérdida.

Dado que los valores aspiración vienen directamente de ideales teóricos, junto con que los datos para calcular el rendimiento son cuantificables al tratarse de fracturas y pozos, es que se una vital importancia a este valor y es el reflejo más fiel de cómo se encuentra la unidad, siendo un valor fácil de comparar.

Por otra parte, el OEE toma situaciones empíricas que no son del todo cuantificables pero que muestran cierta tendencia sobre algunas tareas. La forma de hacer que estas situaciones puedan expresarse en un rendimiento es a través de la probabilidad, ya que se intenta dar un porcentaje de ocurrencia a los hechos que generan demoras y pérdidas en la unidad. Esto ayuda a identificar de forma rápida los puntos críticos que perjudican a la unidad

Si se analizan los resultados entregados por los Tableros de Control se puede decir que los planes relacionados a los inicios de turno y plan de trabajos y pautas diarias tuvo los resultados esperados. Si bien aún no se logra bajar el tiempo de los estándares, ya se está cercano y no es tanta la diferencia como lo fue a principio de año. Otro punto para considerar es que se tuvo mejor acceso a la información de estos tableros, ya que se involucraron distintas figuras para cumplir tanto con el estándar como con la bajada de información.

Otro de los puntos que permiten revisar los tableros son los momentos de primera y última fractura del turno, reflejándose un aumento de las fracturas en las horas iniciales y finales de los turnos a comparación con el año 2018. Este apartado se beneficia de los planes de fracturamiento a distancia, ya que permite acercar los picos de la gráfica a la hora clave del cambio entre grupos.

Al revisar los resultados de reactivar las reuniones semanales, se observa un trabajo más coordinado entre áreas, con tiempos que suelen respetarse, salvo contadas excepciones, y que han permitido el tener continuidad al momento de realizar fractura. Si bien siguen existiendo dificultados en la utilización de espacios e instalación de los equipos, estas suelen resolverse en menor tiempo.

Con relación al plan de avance, se cumplió a cabalidad con el plan actualizado propuesto para abarcar el segundo semestre del año. La presencia de 3 posibles sectores permitió que en momentos donde no se podía ingresar a algún sector, sea por la condición que fuese, existieran alternativas para poder realizar fractura, reflejándose en un 64% de turnos fracturados, es decir que cada día 2 de los 3 turnos podía realizar al menos una fractura.

Si bien hay un llamado de atención porque se realizaron menos fracturas que las presupuestadas a inicio de año, esta diferencia se debe principalmente a la actualización sobre la bomba “Connico 3” en sus tiempos de ejecución y los halos de influencia, por lo que se realizan menos fracturas con esta bomba aun cubriendo la misma área planificada en el plan inicial. Además, el cálculo de fracturas ideales suele no tomar en consideración aquellos sectores donde se deben dejar pilares de seguridad o aumentar la diferencia entre fracturas para no desmoronar el macizo.

El punto final de los resultados fueron las simulaciones realizadas en *Arena Simulator*, generando una gran variedad de opiniones sobre los datos entregados. A destacar que al realizar el análisis de cada una de las bombas por separado entrega valores esperables para trabajos a un único pozo fracturado. Hay que recordar que lo entregado por el simulador corresponde a un año de fracturas de uno de los turnos, por lo que se puede considerar a estos valores como 1/3 de las fracturas en el año.

A su vez, al realizar la simulación con sectores productivos simultáneos se siguen presentando datos que pueden ser posibles dentro de la unidad, principalmente porque se encuentran bajo la aspiración y hasta bajo el rendimiento que tuvo la unidad en el segundo semestre. Aun así, la combinación entre las bombas Connico 2 y Connico 3 genera dudas principalmente porque estaría superando la barrera de las 6.000 fracturas en un año.

Si bien es una evaluación rápida de la situación planteada, la simulación se realiza junto a otros memoristas y con guías por parte del área de planificación minera.

8. CONCLUSIONES

La filosofía *lean* se basa en 5 principios fundamentales que son identificar el valor, representar el flujo, crear el flujo, facilitar el “pull” y buscar la perfección, siendo elementos cíclicos que permiten el constante crecimiento de la cadena de valor. Estos principios, junto a los 2 pilares principales que son el mejoramiento continuo y la participación de los trabajadores, permiten plantear una metodología de trabajo para mejorar el rendimiento del proceso de hidrofracturamiento, la cual está basada en la propia metodología *lean management*.

En Codelco la metodología *lean* fomenta las bases de lo que es la herramienta C+, que está compuesto por sistemas de gestión que permiten la mejora continua de una organización. Junto a esto podemos encontrar algunas herramientas como la herramienta OEE, el diseño de estándares operacionales y confirmación de procesos, la herramienta 5S, entre otros.

Estas herramientas nos permiten establecer y trabajar sobre los 5 puntos principales de la metodología. Se parte por un diagnóstico inicial donde se establece el máximo potencial y la aspiración de la unidad, además de establecer el punto de inicio para posterior comparación de la zona de trabajo. Luego se procede a analizar los puntos críticos del proceso que, junto con los indicadores de desempeño, nos permiten identificar que actividades merman la producción y afectan tanto la cadena productiva como de valor de la unidad PA.

Se procede a generar planes de acción que permitan mitigar las pérdidas del proceso, generar elementos que puedan favorecer al rendimiento o que puedan entregarle valor al proceso, además de buscar reducir el tiempo utilizado en actividades incidentales que no contribuyen al preacondicionamiento. Finalmente se implementan ellos planes de acción y se refleja el resultado en los distintos indicadores de desempeño y en los estándares de excelencia operacional. A medida que el sistema va tomando fuerza, se identifican claramente a los operadores que contagian a sus compañeros y son justamente estos lo que van ganando terreno y consideración para posibles reemplazos a la jefatura.

La metodología propuesta y usada en este estudio cumple con integrar y hacer parte de ella a la filosofía *lean management*. Además, permite mejorar el rendimiento del proceso de fracturamiento hidráulico de la Unidad de Preacondicionamiento, cumpliendo a cabalidad los planes establecidos por parte de la Gerencia Mina y de la Superintendencia de Servicios Mina.

9. RECOMENDACIONES

Dada la efectividad que han tenido las herramientas *lean* en la unidad de preacondicionamiento, es necesario que los estándares de trabajo se mantengan en el tiempo, con el fin cada vez hacer un trabajo más eficiente y no generar desperdicios en el proceso.

Si bien se genera una base de datos amplia, esta sigue sin ser del todo manejable por trabajadores y jefatura, principalmente porque la generación proviene de planillas físicas que consumen mucho tiempo en ser procesadas. A pesar de que toda la información se encuentra en un solo lugar, se debe optar por un sistema más integral y que no requiera mucho trabajo para mantener la información cerca.

Dado que Codelco ya tiene integrada la herramienta C+ como eje de transformación basada en la metodología *lean*, la invitación es a distintas áreas de la división a hacerse participe, a buscar y ejecutar las herramientas que permitan hacer de su proceso más eficiente y así poder generar un valor añadido a los trabajos realizados como división.

Además, se recomienda realizar un análisis más profundo a la posible ejecución de trabajos desde una sala de control común, en especial para los sectores donde las interrupciones por factores externos son bajas. Junto con esto, el fracturamiento a distancia debe buscar consolidarse para poder ser un elemento que aporte más seguido a las fracturas, ya que permite hacerlo de un lugar seguro y en horarios donde no suele existir interrupciones de otras obras.

10. REFERENCIAS

1. A. Brzovic, S. Rogers, G. Webb, J. P. Hurtado, N. Marin, P. Schachter, J. Alvarez & K. Baraona (2015) Discrete fracture network modelling to quantify rock mass preconditioning at the El Teniente Mine, Chile, *Mining Technology*, 124:3, 163-177.
2. Báez, F. y compañía. (2010). Preacondicionamiento del Macizo Rocoso. Gerencia Proyecto Minería Subterránea e Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia IM2.
3. Catamayo Barrios, J. H. (2017). Aplicación de la filosofía Lean en la preparación minera, Mina El Teniente, Codelco Chile (Memoria de magíster). Universidad de Chile.
4. Codelco El Teniente. (2019). Reunión con Directores de Excelencia Operacional: Inducción y seguimiento de la herramienta C+.
5. de Diego, Asier Toledano; Sierra, N. M.; y Arcía, S. J. (2009). Las claves del éxito de Toyota. LEAN, más que un conjunto de herramientas y técnicas. *Cuadernos de Gestion*, 9(2), 113–122.
6. Dirección de Comunicaciones, Gerencia de Sustentabilidad y Asuntos Externos de Codelco. (2011). El Teniente: una historia de más de un siglo.
7. Escuela de Organización Industrial. (2013). *Lean manufacturing: Conceptos, técnicas e implantación*.
8. Espíndola Landa, J.L. (2013). Efectos del fracturamiento hidráulico sobre una explotación por panel caving, Mina Reservas Norte Codelco Chile – División El Teniente (Memoria de título). Universidad de Santiago - USACH.
9. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo de Codelco El Teniente. (2013). Descripción de la técnica de pre-acondicionamiento (PA) mediante fracturamiento hidráulico (FH) [Documento interno]
10. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo de Codelco El Teniente. (2016). Fracturamiento hidráulico para la gestión de la fragmentación de la roca primaria en Mina El Teniente [Nota interna].

11. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo de Codelco. (2019). Informe de estudio de perfil: Proyecto Extensión Norte Rajo Sur.
12. Gómez, R., & Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del "block caving." Boletín Geológico y Minero, 130, 181-198.
13. Líderes de Cambio de Codelco. (2017). Academia C+ - Ruta Capacitación Equipo de Cambio - Material de Formación.
14. Liker, J. K. (2011). Toyota: Cómo el fabricante más grande del mundo alcanzó el éxito. Grupo Editorial Norma.
15. Medina, S. (2017). Fragmentación inducida por preacondicionamiento del macizo rocoso y su impacto en la productividad de Mina El Teniente (Memoria de título). Universidad de Santiago de Chile.
16. Sánchez-Ruiz, L., Blanco, B., & Pérez-Labajos, C. A. (2013). Lean Management: Un estudio bibliométrico.
17. Schachter V., P. (2013). Nota interna: Curvas de fragmentación in situ de la roca primaria.
18. Superintendencia de estudios geomecánicos de Codelco El Teniente. (2019). Informe Avance N°2 Prueba de Morfología FH Andes Norte - NNM GRMD-DGD-INF-003-2019 [Nota interna].
19. Superintendencia de Innovación. (2014). Diseño Fracturamiento Hidráulico – Proyecto Nuevo Nivel Mina (Código GRMD-SIN-NI-037-2014). División El Teniente, Codelco. [Nota técnica].
20. Torres Vega, P. (2016). Simulación de sistemas con el software Arena. Fondo Editorial, Universidad de Lima.
21. Uribe Neira, Pablo. 2019. Comunicación personal. Jefe de Unidad, Codelco Chile División El Teniente. Rancagua, Chile.

22. Womack, James y Jones, Daniel T (1997). *Lean Thinking*.

ANEXO DIAGNÓSTICO ADMINISTRATIVO

