

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA *KAIZEN* A LAS OPERACIONES EN LA
MINA EN LA EMPRESA DE EXPLOTACIÓN DE COBRE MINER S. A.**

DORAIDA HENAO RIVAS

MISAEEL RICARDO GELVES VARGAS

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN

MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN (MBA)

MEDELLÍN

2019

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA *KAIZEN* A LAS OPERACIONES EN LA
MINA EN LA EMPRESA DE EXPLOTACIÓN DE COBRE MINER S. A.**

**Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de magíster en
Administración (MBA)**

DORAIDA HENAO RIVAS¹

MISAEEL RICARDO GELVES VARGAS²

Asesor temático: Juan Esteban Escalante Gómez, DBA

Asesora metodológica: Beatriz Amparo Uribe Ochoa, M. Sc.

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN

MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN (MBA)

MEDELLÍN

2019

¹ dora910113@hotmail.com

² mgelves@miner.com.co

Contenido

Contenido	i
Lista de figuras.....	ii
Lista de gráficas.....	iii
Lista de tablas.....	iii
Resumen	1
Abstract.....	2
1. Introducción.....	3
2. Tema	4
3. Planteamiento del problema.....	4
4. Justificación.....	5
5. Objetivo General	7
6. Objetivos Específicos	8
7. Metodología.....	8
8. Marco teórico.....	9
8.1. Kaizen y la historia.....	9
8.2. Kaizen.....	11
8.3. KPI.....	15
8.4. El cobre.....	16
8.5. Qué es una mina y cómo se extrae el cobre.....	17
9. Problemática: KPI por intervenir.....	18
9.1. Operación unitaria: Perforación y voladura.....	21
9.1.1. Perforación.....	21
9.1.2. <i>Voladura</i>	28
9.1.2.1. Agentes de voladura.....	30
9.2. KPI del consumo eléctrico (kW).....	44
9.3. Consumo por actividad	46
9.4. Ventilación	47
9.5. Aire comprimido.....	52
10. Análisis de causa y efecto.....	53

11.	Propuestas de optimización de KPI	58
11.1.	Propuesta de plan de acción para optimización de eficiencia.....	58
11.2.	Propuesta de optimización del circuito de ventilación.....	59
12.	Conclusiones.....	62
13.	Referencias.....	63

Lista de figuras

Figura 1:	Sombrilla del kaizen.....	13
Figura 2:	Diseño de malla de perforación y voladura.....	22
Figura 3:	Errores de perforación. Espaciamiento inadecuado entre taladros	24
Figura 4:	Errores de perforación. Falta de paralelismo	24
Figura 5:	Errores de perforación. Irregularidad en longitud de taladros	25
Figura 6:	Errores de perforación. Falta diámetro en rimados.....	26
Figura 7:	Rotura radial como efecto de la transferencia de energía de detonación a paredes del taladro	28
Figura 8:	Efectos de la salida secuencial por retardos en minería subterránea.....	29
Figura 9:	Cartuchos de Emulind E	30
Figura 10:	Cartuchos de Indugel plus AP	31
Figura 11:	Anfo	32
Figura 12:	Cordón detonante	34
Figura 13:	Mecha de seguridad	34
Figura 14:	Detonador Exel LP	35
Figura 15:	Preparación de cebo.....	36
Figura 16:	Secuencia de salida de disparo en frente de avance	38
Figura 17:	Distribución y cantidad de explosivos en taladros	39
Figura 18:	Perforación mecanizada de frente mediante el uso de Jumbo DD 321 en minera El Roble	43
Figura 19:	Proceso de carguío de frente en labor de 3.5 x 3.5 m en minera El Roble	43

Lista de gráficas

Gráfica 1: Costos por tonelada extraída de mineral (en USD) en 2018 en operaciones en la mina, minera El Roble	19
Gráfica 2: Gráfica de rendimientos de porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura mes a mes en 2018 en operaciones en la mina, Minera El Roble.....	22
Gráfica 3: Flujograma de perforación de jumbo electrohidráulico en minera El Roble	26
Gráfica 4: Flujograma de perforación de jumbo electrohidráulico en minera El Roble	40
Gráfica 5: Gráfica de consumo eléctrico de los últimos seis meses de 2018 en operaciones en la mina en minera El Roble	45
Gráfica 6: Consumo energético por actividad	46
Gráfica 7: Consumo energético por ventilador.....	50
Gráfica 8: Consumo energético por compresores.....	52
Gráfica 9: Diagrama de espina de pescado de Ishikawa de la deficiencia en porcentaje de perforación	54
Gráfica 10: Diagrama de espina de pescado de Ishikawa de la deficiencia en porcentaje de voladura	55
Gráfica 11: Diagrama de espina de pescado de Ishikawa de la deficiencia en alto consumo energético.....	56

Lista de tablas

Tabla 1: Valores límites permisibles para gases contaminantes	48
---	----

Resumen

Este trabajo presenta una propuesta de mejora continua desarrollada en la mina de explotación de cobre Miner S. A., dedicada a la comercialización de concentrado de cobre y oro, ubicada en el municipio de Carmen de Atrato, Chocó, apoyada en la metodología *kaizen*.

En la primera parte se analizan los resultados de los indicadores claves de desempeño (KPI) de los últimos períodos de la operación en la mina, área que comprende los procesos de extracción, y se seleccionan los indicadores por intervenir, caracterizados por tener resultados que requieran gestión. El análisis se enmarca en una descripción detallada de los elementos que constituyen cada proceso con el fin de que se tenga la información detallada de los recursos que intervienen.

Los KPI seleccionados son el porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura y el consumo energético y se exponen las propuestas de mejora mediante el uso de la herramienta diagrama de Ishikawa o espina de pescado, puesto que permite identificar de fácil modo las causas de los problemas de rendimiento en los dos procesos seleccionados. Para lograr que este análisis fuese lo más completo posible y poder compartir la filosofía *kaizen* a las áreas de la organización se contó para su desarrollo con el apoyo de personal administrativo y operativo.

Palabras clave: *kaizen*, productividad, KPI procesos, minería, cobre.

Abstract

This work presents a proposal for continuous improvement developed at Miner S.A copper mine, this company is dedicated to commercializing copper and gold concentrate, Miner S.A is located close to El Carmen de Atrato town and it is supported by Kaizen Methodology.

In the first part of the work, results of the Key Performance Indicators (KPIs) of the last periods in the mine operation are analysed. An area that includes extraction process are selected for intervention and there are characterize by having results that require management.

Analysis is framed by a detailed description of elements that constitute each process in order to have detailed information about resources involved.

The selected KPIs are efficiency percentage of drilling and blasting process and energy consumption. After selecting these processes, proposals for improvement are presented by using of Ishakawa diagrams tool or fishbone. This tool allows easy identification of problem causes performance in both selected processes.

In order to make this analysis as complete as possible and being able to share the Kaizen Philosophy to each area of the organization, its development was supported by administrative and operative workforce.

Keywords: kaizen, productivity, KPI processes, mining, copper.

1. Introducción

El mundo competitivo actual exige la mejora de la productividad y las organizaciones de hoy se ven enfrentadas día a día al desafío de mantenerse competitivas en el mercado y de aumentar sus ganancias (Jiménez P. y Molina M., 2006).

Las industrias se han vuelto cada vez más conscientes de la importancia de la calidad y de los procesos de mejora continua para lograrlo; estos conceptos ofrecen numerosas opciones que buscan proporcionar las mejores respuestas a los problemas de administración de la industria que van, por ejemplo, desde cero defectos hasta círculos de control de calidad, *kaizen*, gestión de calidad total y *six sigma* (Vo, Kongar y Suárez Barraza, 2019).

La aplicación en el presente trabajo se hizo en minera El Roble, una empresa dedicada a la comercialización de concentrado de cobre y oro, que inició su explotación subterránea hace alrededor de 40 años y que ha ido incrementado la producción con la aplicación de nuevos métodos extractivos y maquinaria empleada. Desde noviembre de 2013 hasta la fecha, Aticomining tomó la administración general de la minera y planteó estrategias con el fin de generar sostenibilidad en la extracción del mineral y sus fines. Con el trabajo se pretende apoyar el avance de la estrategia con el fin de aprovechar el concepto de *kaizen* puesto que se debe entender que es un camino, un medio, y no un objetivo en sí mismo, sino que es una manera de hacer las cosas, una forma de gestionar la organización (Figuroa, 2009).

Los eventos en *kaizen* se definen como proyectos de mejora centrados y estructurados que utilizan un equipo multifuncional dedicado para mejorar un área de trabajo focalizado con metas específicas en un período acelerado (Letens, Farris y Van Aken, 2006). Se busca mejorar en forma continua los procesos con el propósito de eliminar el desperdicio de cualquier actividad que consume recursos y no genera valor, con enfoque, en lo primordial, en hacer cambios de bajo costo en poco tiempo (Herrala, 2000). Definido lo anterior, el trabajo busca plantear

propuestas de mejora en los resultados de los dos siguientes KPI: porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura y consumo energético en el área de operaciones en la mina después de aplicar la metodología *kaizen*.

2. Tema

Mejora continua e industria minera.

3. Planteamiento del problema

La explotación cuprífera en el mundo cerró para 2016 en 19,400 miles de toneladas y los líderes globales fueron Chile y Perú, con 5,500 y 2,300 miles de toneladas anuales, en su orden (Statista, 2018).

En Colombia, la exportación de concentrado de cobre la lleva a cabo la empresa Miner S. A. en la mina El Roble, una mina subterránea ubicada a tres km del municipio El Carmen de Atrato, Chocó, que desde 1990 hasta la fecha ha procesado cerca de 1.8 millones de toneladas de concentrado de mineral, con 2.6% de Cu y 2.63 g/t de Au (Lechner y Earnest, 2016).

En 2013 se inició el desarrollo del túnel del nivel 1880 y la producción entre 2013 y 2016 pasó de 450 a 820 t/día. La producción se ha ido incrementando a través de los años y, junto con ella, los métodos explotación y una mina totalmente mecanizada, cuya meta de producción para el cierre de 2018 es la extracción es de 1200 t/día y una proyección explotación a lo largo de seis años.

En este momento, el área de operaciones en la mina, que es el área hacia la que se enfocó la aplicación, está conformada por los procesos de explotación, relleno detrítico y servicios y cuenta con una flota de dos jumbos electrohidráulicos, dos *dumpers*, cuatro *scoops*, un *scaler*, un jumbo empernador, un robot lanzador de *shotcrete* y un *scissor lift*. Además, para la extracción del mineral y del material

estéril se cuenta con el apoyo de contratistas, que proveen una flota de cuatro volquetas de dobletrouque, dos *telehandler* y dos hurones que soportan el lanzado de *shotcrete* y una fuerza laboral de 205 empleados operativos, lo que posibilita la viabilidad del aumento de la producción para alcanzar los datos proyectados.

Las operaciones en minería subterránea son una serie de procesos complejos y sensibles, que necesitan máxima atención, lo que hace imprescindible la implementación de estrategias de mejora que impulsen la productividad hacia niveles más altos. La compañía tiene como objetivo de corto plazo la reducción de costos, mediante la optimización de recursos y el aumento de la producción, pero ello debe enmarcarse los esfuerzos en procesos ordenados y sistemáticos que impacten la competitividad de la organización. En la actualidad, muchos de los procesos necesitan ser intervenidos puesto que se evidencian improductividad y aumentos de costos.

4. Justificación

El cobre es un metal esencial en la aplicación de la tecnología contemporánea, conduce calor y electricidad de manera eficiente y es un material durable y resistente; tiene propiedades físicas y químicas, tales como resistencia mecánica, formabilidad, facilidad de unión, alta conductividad térmica, resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica (U. S. Environmental Protection Agency, 1994, pp. 1-12). Tiene aplicaciones en innumerables áreas, como equipos de aire acondicionado, acuicultura, arquitectura, arte, acuñación de monedas, diseño y fabricación industrial, sistemas eléctricos, energía y renovables, ganadería y agricultura, diseño de interiores, sector marítimo, sistemas de tuberías, telecomunicaciones y transporte (Instituto Europeo del Cobre, 2018).

Por todas las propiedades y usos mencionados, desde mediados de la década de los sesenta la demanda mundial de cobre refinado ha aumentado en más del 250%, lo que equivale de 5 a 20 millones de toneladas. Para garantizar que haya suficiente

cobre para responder a las futuras demandas de la sociedad, será necesario incrementar los niveles de recuperación y reciclaje, además de realizar inversiones considerables en la producción primaria, la minería (Instituto Europeo del Cobre, 2018).

Para el cierre de 2016, los países con mayor participación en el consumo mundial de cobre refinado fueron China (48%), Estados Unidos (8%) y Alemania (6%). China, en particular, tiene un consumo de cobre superior al de cada uno de los continentes, que representa casi el triple de lo que consume solo Europa y adquiere el 100% de la producción actual de Miner S. A., la organización de trabajo. Para analizar en cifras el aumento del consumo mundial de cobre refinado se debe saber que pasó desde 15,185 mil toneladas en el año 2000 hasta 22,523 mil toneladas en el año 2016, lo que significa un crecimiento anual de 11.6% (Rojas y Garay, 2017).

Este aumento de consumo ha impactado de manera directa al precio; el 28 de diciembre de 2017, el valor del cobre llegó al precio de USD7,312 la tonelada en la Bolsa de Metales de Londres, un nivel que no se veía desde hacía casi cuatro años y que marcó grandes expectativas en el sector (Barría, 2018).

Es así como, al tener en cuenta factores como el aumento de la demanda y el buen precio del mercado, se debe aprovechar al máximo el potencial de la mina Miner S. A., generar la mayor productividad posible y hacer el negocio sostenible en el tiempo porque el cobre es un recurso natural, por lo que no se ha determinado reserva exacta, pero sí se deben generar todos los esfuerzos posibles por maximizar los resultados de la extracción.

En este punto se resalta otra ventaja competitiva del cobre, que consiste en que, respecto a los sustitutos, el grafeno, por ejemplo, porque, a pesar de los avances en el desarrollo de este producto, su producción aún se encuentra en la escala de laboratorio, por lo que no existen estimaciones de sus costos de producción en grandes volúmenes; en este sentido, sería poco probable que en el corto o el

mediano plazo comenzará a utilizarse. Tampoco el aluminio, que posee la desventaja de no ser fuerte en su estado puro, por lo que debe ser aleado con cobre, manganeso, magnesio o silicio para adquirir dicha característica (Royal Society of Chemistry 2017). Lo anterior asegura que la demanda continuará, respaldada por la era tecnológica en la que se está la actualidad.

La proyección de la empresa Miner S. A. es duplicar la producción para el cierre de 2019 por medio de la reducción de los costos y el aumento de la productividad, pero la compañía se ha visto enfrentada a resultados no favorables en algunos de sus indicadores de desempeño y requiere cambios que encajan en la filosofía *kaizen*; es "un proyecto de mejora enfocado y estructurado, que utiliza un equipo multifuncional dedicado para mejorar un área de trabajo específica, con objetivos específicos, en un plazo acelerado" (Glover, Farris, Van Aken y Doolen, 2009).

Esta herramienta no es simplemente un paquete de mejoras desarrolladas e implementadas por expertos en la organización, sino que implica a todos, porque se alimenta de la experiencia y el conocimiento de cada uno (Kato y Art, 2010).

Dean y Bowen (1994) lo definen como una serie de prácticas que se establecen para conducir un cambio en la organización, que tiene un producto que pasa por un excelente momento en el mercado y que debe unir fuerzas por hacerse más productiva y cumplir los retos que le está poniendo el entorno.

5. Objetivo General

➤ Aplicar la metodología *kaizen* a las operaciones en la mina de la empresa Miner S. A. que generan impacto en los KPI del porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura y el consumo energético, con el propósito de reducir costos y aumentar productividad.

6. Objetivos Específicos

- Obtener los KPI del porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura y el consumo energético de los últimos períodos para determinar los problemas críticos por intervenir en la producción y los objetivos y las metas del proceso de mejora.
- Definir los recursos necesarios financieros, humanos e intangibles para la implementación de la metodología en la empresa Miner S. A.
- Definir el cronograma y las actividades para el desarrollo de la metodología.
- Realizar las actividades propuestas para el desarrollo de la metodología.

7. Metodología

La aplicación de la metodología *kaizen* se inició con una revisión de los KPI del último semestre de 2018 de la empresa Miner S. A.

Nagyova y Pacaiova (2009) definen los KPI como aspectos cuantificables (métricos) que reflejan los factores clave que las organizaciones deben monitorear y administrar para lograr el éxito. Los KPI son indicadores de la productividad de la compañía y en forma específica se tomaron para este estudio los KPI de operaciones en la mina, área de la empresa que comprende la primera fase de producción. De esa revisión se seleccionaron las dos operaciones más deficientes para el trabajo.

Después de la selección de las operaciones por intervenir se eligieron las personas de los equipos de trabajo organizadas en grupos de cinco integrantes y se estableció un cronograma de reuniones.

En pro de tener los mejores resultados, al inicio se ofreció un entrenamiento de la filosofía *kaizen* con los equipos constituidos, caracterizados por ser multidisciplinarios, en busca de un aporte de distintos enfoques, conocimiento y experiencia.

En seguida se seleccionaron la herramienta de mejoramiento continuo por usar y las actividades por desarrollar. La asignación de los recursos necesarios se determinó en conjunto con la gerencia de la empresa.

Para el cierre de 2018 se desarrollaron las actividades propuestas y para el primer trimestre de 2019 se aplicó la herramienta del diagrama de Ishikawa o de espina de pescado para el análisis de causas y efectos y para presentar propuestas de mejora para los KPI intervenidos, enmarcadas en la metodología *kaizen*.

8. Marco teórico

8.1. *Kaizen y la historia*

Imai (1986) refiere que Japón, en la época posterior a la Segunda Guerra Mundial, enfrentaba muchos problemas en su industria porque sus recursos naturales, las materias primas, la energía y los alimentos eran escasos. Con el fin de mejorar la situación se creó la JUSE (*Japanese Union of Scientists and Engineers* o Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros), se invitó a William Edwards Deming y a Joseph Juran a dictar varios seminarios y se logró crear nueva metodología para mejorar el sistema empresarial.

En 1949 exactamente se formó la JUSE, que se dio a la tarea de desarrollar y difundir las ideas del control de calidad en todo el país.

Daga Henry (2017, p. 14 y 15) describe: «Bajo este escenario Edward Deming en Agosto de 1950 en el Centro de Convención Hakone en Tokio expuso una elocuente conferencia llamada —Estadística de la Calidad del Productoll donde definió 14 principios gerenciales y el ciclo PDCA (del inglés Plan, Do, Check, Act) como una estrategia de mejora continua conocida hoy en día como espiral de mejora continua o ciclo de calidad basados en los conceptos ideados por Walter A. Shewhart. Esta

conferencia fue de gran inspiración para la audiencia conformada por los líderes empresariales de la industria manufacturera que en ese momento era una industria sinónimo de productos baratos y de mala calidad y con un total desconocimiento de las herramientas estadísticas de estándares internacionales.».

«Deming era uno de los grandes expertos de control de calidad y había desarrollado una metodología basada en métodos estadísticos. Ya en 1947 Deming había estado en el Japón como parte de una misión de observación económica, por lo que los japoneses ya lo conocían, facilitando su incorporación como instructor. Deming insistía en no describir funciones cerradas, suprimir objetivos numéricos, no pagar por horas, romper las barreras departamentales y dar más participación a las ideas innovadoras de los trabajadores» Scoppetta Angelo, Vásquez Pablo (2005. p. 35).

Kaoru Ishikawa tuvo también una participación determinante en el movimiento de control de calidad en el Japón. Introdujo el concepto de control de calidad en toda la compañía, el proceso de auditoría para determinar si una empresa era apta para recibir el premio Deming, los círculos de calidad y los diagramas de causa y efecto (Figueroa, 2009).

El legado de Deming, Juran e Ishikawa ha cruzado las fronteras y su reconocimiento mundial se hizo evidente en los años ochenta, con la transformación de Japón y su mérito de lo que se llamó el “milagro japonés”, la superación japonesa que en la década de 1960 posicionó al país como la segunda potencia mundial después de Estados Unidos (Figueroa, 2009).

En 1986, Masaaki Imai publicó en Estados Unidos el libro *Kaizen, La clave de la ventaja competitiva japonesa*, por lo que el término fue ampliamente conocido en Occidente y se tradujo como “mejoramiento continuo” que involucra a gerentes y trabajadores de la organización.

8.2. *Kaizen*

El concepto de *kaizen* es extenso, puesto que significa mejoramiento en la vida personal, social y de trabajo; de manera específica, cuando se aplica al sitio laboral, se define como mejoramiento progresivo, que involucra a toda la organización, desde el nivel más alto hasta el más bajo (Imai, 1998; Suárez-Barraza, Castillo-Arias y Miguel-Dávila, 2011). Dicha herramienta puede ser usada en todo aquello susceptible de ser mejorado: procesos, diseños, movimientos, materiales y ensambles (Mika, 2006). La esencia de la palabra *kaizen* engloba la totalidad de los procesos para la mejora continua en todas las escalas de las organizaciones.

El *kaizen* implica esfuerzos constantes para mejorar hasta lograr un estándar y los estándares solo existen para superarse por otros mejores; luego, esta filosofía se basa en la actualización y la revisión constantes (Cangro, 2010). Su base es la participación de personas de todos los procesos y áreas de la organización, con el propósito de trabajar para alcanzar mejoras graduales en el área de trabajo y en cada día laboral que transcurra (Suárez-Barraza et al., 2011).

El concepto ha sido definido por diversos autores que buscan brindar mayor claridad de su contenido teórico y en seguida se hace el recuento de algunos aportes relevantes.

Masaaki Imai (1989) lo define como una palabra que se puede entender como “mejoramiento o mejoramiento continuo en la vida social, familiar, personal y de trabajo” (p 25 y fue este mismo profesor quien introdujo el concepto de *kaizen* en Occidente.

Kai se puede entender como el hombre que es capaz de regar (cambiar) su “yo” interno, en forma de árbol y el *zen* puede ser regado de manera constante para que su tronco y sus raíces crezcan fuertes. La palabra *kaizen* se basa en dos ideogramas japoneses: *kai* tiene como significado **cambio** y *zen* significa **bueno**. En definitiva, expresa mejora continua o, como lo citan Lillrank y Kano (1989), es el principio de mejora continua.

Brunet y New (2003, p. 1428), citados por Suárez-Barraza y Miguel-Dávila (2011, p 4, definen al *kaizen* como “un mecanismo penetrante de actividades continuas, donde las personas involucradas juegan un rol explícito, para identificar y asegurar impactos o mejoras que contribuyen a las metas organizacionales”.

El profesor Masaaki Imai (1998) de nuevo indicaba que el *kaizen* significa mejoramiento continuo, pero mejoramiento todos los días, en cada momento, realizado por todos los empleados de la organización, en cualquier lugar de la empresa y que va desde pequeñas mejoras incrementales hasta innovaciones drásticas y radicales.

Para Suárez Barraza (2009, p. 63), las personas y las organizaciones deben estar en constante cambio y crecimiento segundo a segundo; como consecuencia, todas estas transformaciones deben llevar a una espiral de mejora e innovación.

Para Howell (2011, pp. 30-32), *kaizen* es un sistema de mejoramiento continuo en calidad, tecnología, procesos, cultura organizacional, productividad, seguridad y liderazgo. Como tal: “Cada persona es alentada o motivada a crear pequeñas sugerencias de mejoras de manera regular”. La simple idea de *kaizen* es la vigilancia y la conciencia, con la mira de buscar siempre las oportunidades para hacer las cosas mejor. ¿Es posible eliminar el desperdicio en nuestros procesos de negocios?, ¿es posible reducir costos?, ¿es posible reducir la reprocesamiento de trabajo?, ¿es posible hacer las cosas con mayor rapidez y con menos errores?, ¿es posible crear una cultura con cero defectos?, ¿es posible diseñar procesos libres de errores?, ¿es posible reducir el tiempo de ciclo en todas las actividades?, ¿es posible hacer las cosas de manera más inteligente? Las preguntas son muchas, pero la razón de todo esto es erradicar el desperdicio y desarrollar una cultura preventiva en la que las ideas provengan de todos, con el propósito de producir mejoramientos continuos y sostenidos (Atkinson, 2013; Rodríguez Álvarez, 2015, p. 20)

En la siguiente figura, Masaaki Imai (1986) utilizó la analogía de la sombrilla para representar de manera gráfica todo lo que englobaba el concepto *kaizen* en el mundo empresarial: es como una «sombrilla» que cubre todos los aspectos necesarios para que se pueda lograr la mejora continua de las organizaciones.

Figura 1: Sombrilla del kaizen



Fuente: Imai (1998, p. 47)

Imai (1986) explica que la administración en las empresas japonesas tiene dos componentes básicos: mantenimiento y mejoramiento. Las actividades relacionadas con el mantenimiento se dirigen a mantener los actuales estándares tecnológicos, administrativos y de operación. Por otro lado, el mejoramiento se refiere a las actividades orientadas a perfeccionar las normas y los estándares presentes con el objetivo de mejorar en forma permanente los procesos. También menciona que el mantenimiento quiere decir sostener normas mediante entrenamiento y disciplina, en tanto que el mejoramiento toma dos direcciones: *kaizen* e innovación. Por otra parte, existen técnicas para la resolución de problemas. Se usan cuando se dispone de datos y más tarde se analizan para resolver un problema particular. Para ello, se utilizan siete herramientas estadísticas para la resolución analítica de los problemas,

que son sencillas de administrar y utilizar: diagramas de causa y efecto, histogramas, gráfica de control, diagramas de dispersión o correlación, gráfica de tendencias y diagrama de flujo.

1. Diagrama de causa y efecto: conocido también como “de espina de pescado”, por la similitud con la forma del esqueleto de un pez, o como diagrama de Kaoru Ishikawa, en honor a su creador, que lo desarrolló en 1943 en Tokio. Tiene como fin permitir la organización de grandes cantidades de información, sobre un problema específico y determinar con exactitud las posibles causas y, por último, aumenta la probabilidad de identificar las causas principales. En su base está la idea de que un problema puede estar provocado por numerosas causas, lo que contrarresta la tendencia a considerar una sola de ellas (Romero y Díaz, 2010).

2. Histograma: es un gráfico de barras vertical que representa la distribución de frecuencias de un conjunto de datos. Útil cuando se tiene un amplio número de datos que es preciso organizar, para analizar con mayor detalle o tomar decisiones sobre la base de ellos. Transmite información sobre un proceso en forma precisa e inteligible y compara los resultados de un proceso con las especificaciones establecidas con anterioridad.

3. Gráfica de control: es una herramienta utilizada para distinguir las variaciones debidas a causas asignables o especiales a partir de las variaciones aleatorias inherentes al proceso.

Las variaciones aleatorias se repiten de manera casual dentro de los límites predecibles.

Las variaciones debidas a causas asignables o especiales indican que es necesario identificar, investigar y poner bajo control algunos factores que afectan al proceso (Gehisy, 2017a).

4. Diagrama Diagrama de dispersión o correlación: Este método es una representación gráfica de la variación conjunta de dos variables cuantitativas. Además, intenta establecer una causalidad entre ambas, aunque no puede probarla.

Los datos se muestran como un conjunto de puntos, cada uno con el valor de una variable que determina la posición en el eje horizontal y el valor de la otra variable determinado por la posición en el eje vertical. Además, un diagrama de dispersión se puede llamar también gráfico de dispersión (AEC, 2019).

5. Hoja de verificación o de chequeo: lista de comprobación a la hora de recoger datos. Las hojas de verificación se utilizan para organizar los hechos de manera que se facilite la recopilación de un conjunto de datos útiles sobre un posible problema de calidad. Son especialmente útiles a la hora de recoger datos de los atributos mientras se realizan inspecciones para identificar defectos (Gehisy, 2017b).

6. Diagrama de flujo: muestra la secuencia de pasos y las posibilidades de ramificaciones que existen en un proceso que transforma una o más entradas en una o más salidas. Los diagramas de flujo muestran las actividades, los puntos de decisión, las ramificaciones, las rutas paralelas y el orden general de proceso.

Los diagramas de flujo pueden resultar útiles para entender y estimar el costo de la calidad de un proceso, lo que se consigue mediante la aplicación de la lógica de ramificaciones del diagrama de flujo y sus frecuencias relativas para estimar el valor monetario esperado para el trabajo conforme y no conforme requerido para entregar la salida conforme esperada (Gehisy, 2017b).

7. Diagrama de Pareto: diagrama de barras verticales que se utilizan para identificar las pocas fuentes clave responsables de la mayor parte de los efectos de los problemas. Las categorías que se muestran en el eje horizontal representan una distribución probabilística válida, que cubre el 100% de las observaciones posibles (Gehisy, 2017b).

8.3. KPI

Los objetivos se utilizan en las organizaciones para definir un estado que se desea alcanzar. Según Pintzos, Matsas y Chryssolouris (2012), un objetivo es un atributo que se debe minimizar o maximizar, mientras que Barone, Jiang, Amyot y Mylopoulos (2011.) declaran los objetivos como una representación de un estado deseado de las cosas, que se definen durante la planeación estratégica y se

alcanzan durante la operación del negocio. Dichos objetivos se clasifican según el tipo de condición de meta deseada o la forma empleada para designarlos. La categorización es mejoramiento, mantenimiento o realización (Antón, 1997).

Los objetivos se deben monitorear para asegurar su cumplimiento. Los indicadores clave de rendimiento (KPI, por las siglas de la expresión en inglés *key performance indicators*) se utilizan para este fin, puesto que ofrecen criterios para determinar si los objetivos se están alcanzando (Barone et al., 2011.), al dar un panorama del rendimiento de las operaciones de negocio (Tsai y Cheng, 2011). Por esto, se necesita determinar los indicadores clave de rendimiento y su relación con los objetivos (Popova y Sharpanskykh, 2010), para así asegurar que lo que se quiere medir es lo que se está midiendo.

En el área de operaciones en la mina de minera El Roble S. A. en la actualidad se cuenta con KPI en cada uno de los subprocesos de la operación.

En la perforación y la voladura se mide eficiencia de ambas actividades, factor de potencia (kg/t), factor de carga (kg/m³), avance por disparo (ml/disparo) y porcentaje de sobreexcavación. En el subproceso de carguío y acarreo de mineral y de material estéril están involucrados los equipos de carguío *scoops* y en el acarreo las *dumpers*; los indicadores evaluados son número de toneladas de material movido por hora (t/h) y cantidad de llantas consumidas por hora. En sostenimiento se miden el lanzado de *shotcrete* en m³ de *shotcrete*/ml de avance, cantidad de perno y cantidad de malla instalada por metro lineal. El relleno detrítico cementado (RDC) controla el número de kg/m³ de cemento en purga y RDC como tal.

8.4. El cobre

Como lo relata el Instituto Europeo del Cobre (2018), desde que el cobre comenzara a utilizarse hace unos 10,000 años ha tenido un papel muy importante en la historia de la humanidad porque puede emplearse para obtener aleaciones y porque se puede reciclar una y otra vez sin perder propiedades.

Este mineral es esencial en las vidas de los seres humanos, tanto para la salud y el bienestar como en los hogares, en el transporte, en las telecomunicaciones o en la

industria. Y es que el cobre es un excelente conductor de la electricidad y el calor; es fuerte, dúctil y se une con facilidad mediante soldadura; además, es higiénico, fácil de alear y resistente a la corrosión. Algunos ejemplos de su uso son televisores, reproductores de DVD, iPads, móviles, lavadoras, neveras, aspiradoras, ordenadores, coches, aire acondicionado, autobuses, trenes de alta velocidad, sistemas de transporte suburbano y tranvías (Instituto Europeo del Cobre, 2018).

También en decoración y moneda; munición en cobre y latón.

Las sales y compuestos de cobre por sus características de baja toxicidad se usan en agricultura para evitar hongos, como insecticidas y también conservantes.

Algunos catalizadores en cierto tipo de reacciones también hacen uso de estos compuestos de cobre para pigmento en vidrios, cerámicas y esmaltes (Pero-Sanz, Fernández y Verdeja, 2018).

Los minerales de cobre se encuentran por toda la corteza terrestre. Se dan tanto en rocas ígneas como sedimentarias. Los diez km exteriores de la corteza terrestre contienen 33 g de cobre por cada tonelada de roca, pero, en algunos lugares, la actividad volcánica depositó, hace millones de años, cobre fundido en localizaciones concretas. En dichas áreas se explotan los yacimientos, puesto que contienen suficiente cobre para que la explotación sea rentable (Instituto Europeo del Cobre, 2018).

8.5. Qué es una mina y cómo se extrae el cobre

El Código de Minas (Congreso de Colombia, 2001) define "mina" como el yacimiento, formación o criadero de minerales o de materias fósiles, útiles y aprovechables en el sentido económico, ya se encuentre en el suelo o el subsuelo.

“Las minas pueden ser divididas siguiendo varios criterios. El más amplio tiene en cuenta si las labores se desarrollan por encima o por debajo de la superficie, dividiéndolas, respectivamente, en minas a cielo abierto y en minas subterráneas” (Murray, 2012, p 4).

Los principales procesos que componen esta etapa son (López Jimeno, 2003):

1. **Extracción:** son todos los subprocesos que intervienen en la extracción desde las minas en superficie o subterráneas hasta la planta de procesos. Entre los subprocesos de mayor importancia están la perforación, la voladura, el carguío y el acarreo del mineral. Los equipos, las técnicas y la rentabilidad varían dependiendo del método de explotación.
2. **Procesamiento:** son las operaciones unitarias que se llevan a cabo en las plantas metalúrgicas para lograr la reducción de tamaño por métodos físicos para liberar las partículas metálicas desde la roca y, además, el aumento de su concentración o contenido metálico mediante los subprocesos de flotación o lixiviación.
3. **Fundición:** consiste en la separación de los metales contenidos en los concentrados por un proceso pirometalúrgico, que consiste en ingresar el concentrado a altas temperaturas, de alrededor de 1.200 grados centígrados, que funde el concentrado y lo transforma de sólido a líquido; en este proceso los componentes se van separando y recombinando y forman un baño de dos capas con alto contenido de cobre.
4. **Refinación:** purificación de los metales producto de la fundición, para su transformación industrial; el objetivo del este proceso es obtener el metal en estado de pureza y se logra mediante técnicas de pirometalúrgica y electro obtención.

9. Problemática: KPI por intervenir

Con base en los datos históricos de los KPI de la unidad minera El Roble, se llevó a cabo la gestión de dos de los indicadores antes mencionados: el porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura y el consumo energético.

El primer KPI impacta en forma negativa el proceso productivo de la unidad puesto que las deficiencias en este indicador generan pérdida en los avances programados debido a disparos poco eficientes, sobrecostos en el uso de aceros de perforación, material de explosivos, reducción de los índices de productividad, aumento de la sobreexcavación de las labores, incremento en el empleo del sostenimiento, granulometría inadecuada y mayor riesgo para el personal por la presencia de bloques en techos y paredes de los tajos.

A continuación se muestra un ejemplo real en cuanto al dinero se deja de ganar al no realizar un disparo con el avance efectivo o la eficiencia de perforación y voladura deseada.

Gráfica 1: Costos por tonelada extraída de mineral (en USD) en 2018 en operaciones en la mina, minera El Roble

		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL GENERAL
OPERACIONES	MINA													
	EXPLORACIÓN													
	MATERIALES	2.9	2.5	4.1	3.9	3.1	2.7	3.1	3.5	2.9	3.4	3.3	2.2	37.63
	SERVICIOS	1.4	1.0	1.5	1.2	4.6	3.6	2.2	2.1	3.0	3.2	0.9	0.4	25.09
	PERSONAL	0.7	1.0	0.9	1.3	0.8	1.2	0.8	1.2	1.1	1.1	0.8	0.7	11.6
Total de OPERACIONES		5.0	4.4	6.4	6.4	8.5	7.6	6.2	6.7	7,0	7.7	5.0	3.3	74.32

Fuente: elaboración propia

Por ejemplo, para el mes de octubre se cuenta con un costo de USD7.7/t y un total de 24,982 t reportadas para ese mes como rotas.

En el mencionado se reportaron 96 disparos, con inclusión de avances especiales por estabilidad del frente y selladas, etc., para los que hubo un avance mensual de 263.7 m, cuyo disparo promedio fue de 2.75 m.

Al tener presente la sobreexcavación de 11.2%, si la efectividad de las voladuras fuera del 90% y con avances de 3.3 m se obtendría un resultado promedio 27,742 t rotas (este tonelaje se castiga con un 10 % menos, debido a que influyen algunas operativas y del macizo rocoso que no permiten hacer perforaciones de la longitud deseada).

Como resultado final se obtuvo que el costo en explotación (materiales, personal y servicios) por tonelada extraída sería de USD6.93/t, por lo que se observa una optimización del 10% en relación con los costos operativos, lo que conduce como resultado una extracción mayor de 2,760 t/mes.

Si se tiene presente que una tonelada de concentrado de Cu tiene un valor de USD1,365 y que el tratamiento de 850 t de mineral bruto genera 116 t de concentrado de cobre, se concluye que de las 2,760 toneladas rotas que se están dejando de extraer de las operaciones unitarias de perforación y voladura se generarían 376 toneladas de concentrado de cobre, por lo que la compañía está dejando de ganar USD513,240/mes.

Además, otro de los grandes retos que tiene la actividad minera es ser sostenible mediante el empleo de políticas integrales que reduzcan el impacto ambiental de las operaciones. Aquí se encuentra el otro KPI por intervenir, el consumo energético; por su naturaleza, el negocio minero es un alto consumidor de energía eléctrica para las diferentes operaciones unitarias que se llevan a cabo, pero debe optimizar su uso para mitigar impactos financieros y ambientales. El área de operaciones en la mina tuvo un costo operativo promedio en 2018 de USD65.3/t, de los cuales la energía de la mina tuvo un costo promedio de USD2.7/t.

En la actualidad, el área de operaciones en la mina tiene un consumo promedio mensual de 400.000 kW, en el que el mayor gasto energético lo generan los

ventiladores ubicados en el interior de la mina, que sostienen la atmosfera necesaria para el desarrollo de la operación; en segundo lugar del gasto están los compresores, que apoyan las operaciones mediante el servicio de aire comprimido para los diferentes procesos, tales como lanzado manual de *shotcrete*, perforación manual con *jackleg*, perforaciones de taladros largos y apoyo al proceso de relleno detrítico cementado.

Se describen las operaciones para lograr analizar el entorno de los KPI.

9.1. Operación unitaria: Perforación y voladura

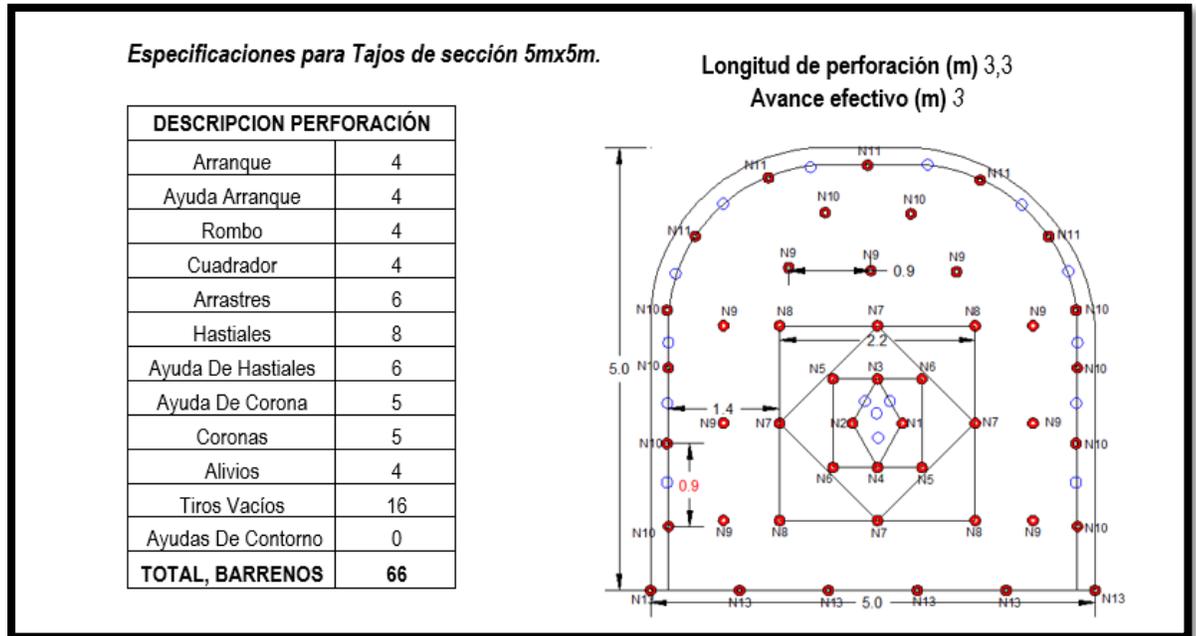
9.1.1. Perforación.

Es el primer proceso en la generación del avance en minería. La perforación se fundamenta en la percusión, la rotación, el empuje y el barrido, mediante una sarta de perforación (barras y brocas) cuya acción de golpe y fricción produce agrietamiento y rotura en la roca (taladros). Los taladros con posterioridad se llenan de una sustancia explosiva para la generación de los avances (López Jimeno, 2003)

En minera El Roble, la perforación se efectúa en forma mecanizada o manual; el primer método se lleva a cabo mediante la perforación con jumbo electromagnético y en la actualidad la unidad minera cuenta con dos jumbos, DD 311 y DD 321, de dos brazos y uno, en su orden. En menor proporción se hacen perforaciones manuales mediante el uso de las perforadoras manuales *jackleg*.

Antes del inicio de la perforación de los frentes se deben elaborar y marcar las mallas de perforación y voladura, que son la forma en que se distribuyen los taladros de una voladura, para cuyo efecto se consideran, en lo fundamental, la relación de *burden*, el espaciamiento, la dirección con la profundidad de taladros y la calidad de la roca. A continuación, se muestra un ejemplo de la una malla de perforación utilizada en minera El Roble para un tajo de 5 x 5 metros.

Figura 2: Diseño de malla de perforación y voladura



Fuente: información interna de minera El Roble

El área de operaciones en la mina se trazó como objetivo para los avances por disparo un valor de 3 metros después de una perforación con longitud de 3.3 metros para una eficiencia del 91%. Es necesario intervenir este proceso, que corresponde al KPI de eficiencia de perforación y voladura puesto que, aunque, en la gráfica 2 se muestra que en los últimos tres meses el logro se alcanzó con 91 % de eficiencia, las perforaciones están siendo inferiores a los tres metros.

Gráfica 2: Gráfica de rendimientos de porcentaje de eficiencia de la perforación y la voladura mes a mes en 2018 en operaciones en la mina, Minera El Roble



Fuente: elaboración propia

Variables de la perforación que influyen en los avances.

La perforación es de vital importancia a la hora de realizar un buen avance de la voladura, por lo que el fin de eliminar cualquier posibilidad de obtener como resultado un disparo de mala calidad y alto costo (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Hebert, 2013).

- Mercado de malla de perforación: una vez se definan las mallas de perforación y voladura, que van ancladas a los diferentes parámetros tales como secciones, calidad del macizo, diámetro de perforación, etc. Es de considerable significación el mercado de la malla en los frentes por perforar con el fin de darle la facilidad al perforista en cuanto a mantener la simetría y el espaciamiento entre taladros por perforar y, en el proceso de carguío, de garantizar una adecuada distribución de la carga explosiva. La figura 3 muestra la falta de espaciamiento entre taladros de una perforación; la consecuencia de este error incide en la presencia de sobretamaños una vez se realice la voladura.

El marcado de malla permite asegurar la sección de la labor, la reducción en los costos asociados a la fragmentación adecuada y el menor daño en el macizo rocoso, representado por la sobrerrotura.

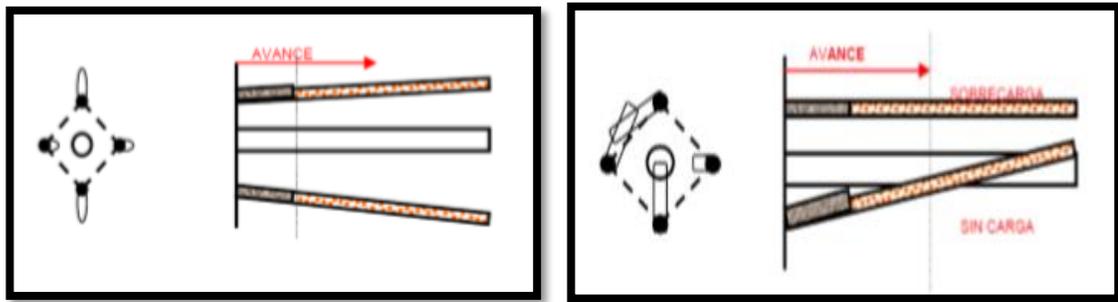
Figura 3: Errores de perforación. Espaciamiento inadecuado entre taladros



Fuente: EXSA (2004, p. 77)

- Paralelismo: en la figura 4 se muestra un error de perforación debido a la falta y el uso de guidores en los frentes en perforación. El paralelismo es un factor preponderante en el logro de la efectividad del avance, toda vez que tal práctica evita la interconexión entre taladros del arranque y con ello el posible “soplo” de la voladura, la deficiencia en la granulometría del material arrancado y el avance de los frentes, además, las desviaciones en la inclinación de los taladros en la corona y contorno generan sobreexcavación en techo y hastiales. De igual forma, se debe mantener un paralelismo en los taladros denominados “arrastres o pateros” puesto que este tipo de fallas produce en los pisos de las labores los denominados “caballos” o montículos, que influyen en daños mecánicos en los equipos.

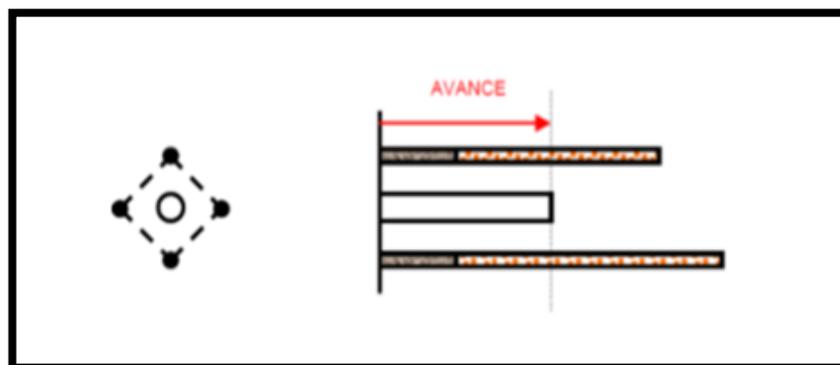
Figura 4: Errores de perforación. Falta de paralelismo



Fuente: EXSA (2004, p. 77)

- Irregularidad en longitud de taladros: se presenta al no realizar la totalidad de la perforación de los frentes a una misma longitud, como se muestra en la figura 5. Este parámetro influye en forma notable en la eficiencia de la perforación y la voladura y en ella es de gran importancia la pericia del perforista; como ayuda para mejorar el control del parámetro se demarcan, de ser necesario, las barras de perforación en el desarrollo del proceso, con el fin de garantizar avances o KPI establecidos en las diferentes unidades mineras.

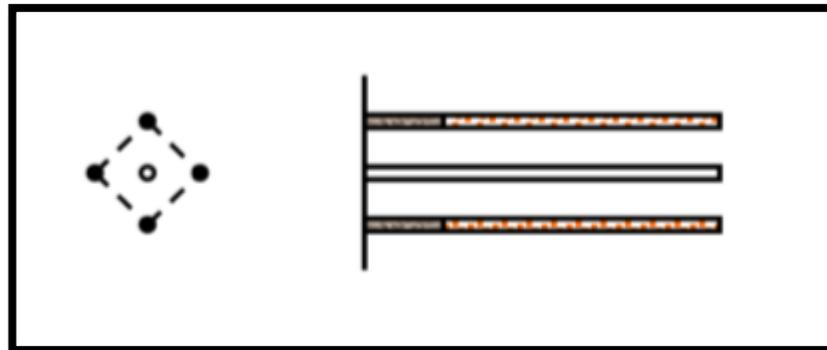
Figura 5: Errores de perforación. Irregularidad en longitud de taladros



Fuente: EXSA (2004, p. 77)

- Diámetro de perforación: la figura 6 ilustra un error de perforación con un diámetro inadecuado de los taladros de alivios; los diámetros de perforación en los taladros de alivio son de vital importancia debido a que, una vez disparado el frente, puede no generarse la cara libre óptima necesaria para la secuencia de salida de los demás taladros cargados. Además, en los taladros de producción el diámetro de perforación constante y correcto es de gran ayuda a la hora del carguío del frente y del confinamiento del explosivo en el taladro, para con ello obtener un mejor trabajo de la energía liberada de la carga explosiva.

Figura 6: Errores de perforación. Falta diámetro en rimados



Fuente: EXSA (2004, p. 76)

Gráfica 3: Flujograma de perforación de jumbo electrohidráulico en minera El Roble

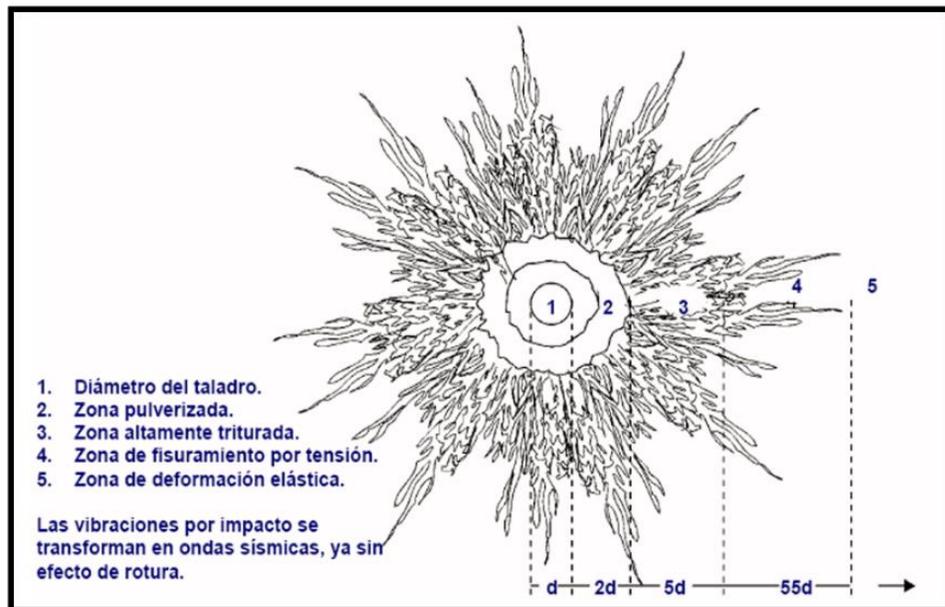
9.1.2. Voladura.

Calderón Navarro (2015) afirma:

Es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: Fragmentación y Desplazamiento del material. Es la técnica más versátil y efectiva para la rotura de rocas y explotación de minerales (p. 89).

Para llevar a cabo el proceso de avance de frentes en la unidad minera El Roble se emplean los siguientes agentes y accesorios de voladura:

Figura 7: Rotura radial como efecto de la transferencia de energía de detonación a paredes del taladro

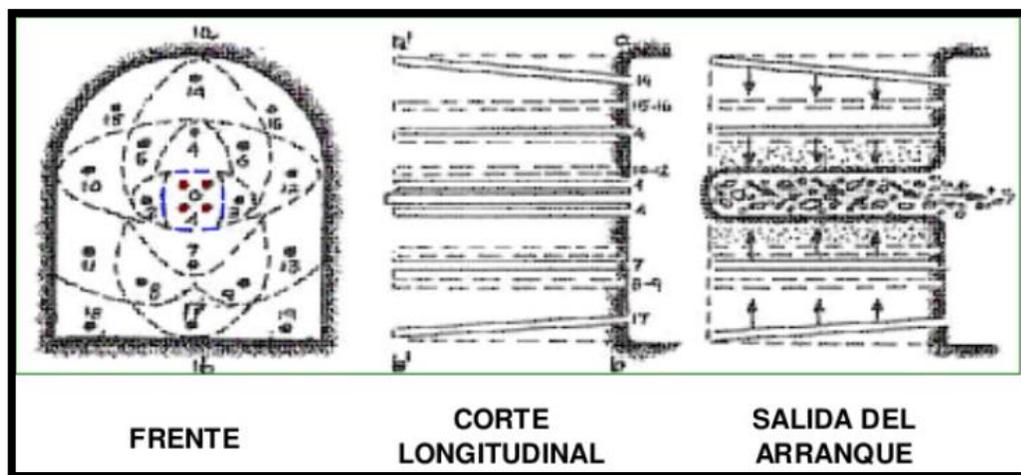


Fuente: EXSA (2004, p. 20)

En figura 7 se ilustra cómo, cada vez que se cargan los taladros con explosivos y se procede a la ejecución del disparo, se generan zonas de las altas concentraciones de energía liberadas por la reacción del material explosivo confinado en los taladros perforados, lo que produce el arranque de material *in situ*, que, el caso de minera El Roble, es mineral de cobre y material estéril.

La figura 8 ilustra, mediante las vistas de frente y longitudinal, la perforación de un frente de explotación con la distribución de explosivos y accesorios de voladura con microrretardos (numeración), que son los encargados dar el orden de salida a los taladros, con el fin de garantizar un buen disparo y adecuados avances.

Figura 8: Efectos de la salida secuencial por retardos en minería subterránea



Fuente: EXSA (2004, p. 142)

Para llevar a cabo el proceso de avance de frentes en la unidad minera El Roble se emplean los siguientes agentes explosivos y accesorios de voladura, que se usan luego de la realización de estudios basados las propiedades de los explosivos tales como fuerza, velocidad de detonación, densidad y gravedad específica, presión de detonación, sensibilidad, resistencia al agua y emanaciones de gases, además de

considerar la disponibilidad en el mercado colombiano y las condiciones geomecánicas del macizo en el que se van a utilizar con el fin de no afectar, en sentido negativo, la estabilidad de las labores subterráneas, así también los parámetros hidrogeológicos.

9.1.2.1. Agentes de voladura.

son mezclas que no llevan intrínsecamente ingredientes explosivos. A continuación, se muestran los agentes de voladura utilizados en la unidad:

Emulind E

Figura 9: Cartuchos de Emulind E



Fuente: Indumil (2016, p. 108)

El *Emulind E* es un agente de voladura de alta potencia y sensible al detonador común # 8, compuesto, en lo esencial, de nitrato de amonio, nitrato de sodio y una fase de aceites combustibles y emulsificantes.

Se emplea por lo común en la industria minera en la que hay predominancia de rocas de duras a semiduras con presencia de agua; además, se utiliza en obras civiles.

Indugel plus AP

Figura 10: Cartuchos de Indugel plus AP



Fuente: Indumil (2016, p. 100)

De acuerdo con Indumil (2016),

Es un explosivo de alta potencia tipo hidrogel aluminizado, con sustancias gelificantes, que evitan la segregación de los ingredientes oxidantes y combustibles sensibilizados en la mezcla; sensibles al detonador común número 8, con excelente resistencia al agua, alta energía específica, produce humos clase 1. No contiene nitroglicerina. Diseñado para voladuras en pequeños diámetros, en rocas duras y semiduras con presencia de agua. Sus aplicaciones más comunes son explotación de minerales, obras de construcción, demolición de edificios e infraestructura civil y en voladuras subterráneas, con adecuada ventilación en ausencia de gas grisú y polvo de carbón.

En minera El Roble, este agente de voladura se utiliza en voladuras controladas, en las que se cargan los taladros del contorno en la malla de perforación y voladura, como se muestra en la figura 5. Su empleo se realiza en gran medida en los avances en chimeneas o verticales y en los efectuados con broca de perforación de 38 mm, mediante perforación con jumbo o *jackleg*.

ANFO:

Figura 11: Anfo



Fuente. Indumil (2016, p. 96)

Es un agente de voladura de alto poder explosivo, compuesto de una mezcla de nitrato de amonio (90 a 97%) y un combustible derivado del petróleo (10 a 3%). Se emplea por lo común en minería (en rocas blandas a semiduras) y obras civiles.

El *Anfo* representa seguridad en la manipulación y bajo costo; además, por su granularidad permite ser cargado en forma manual o neumática en los barrenos (Indumil, 2016).

En minera El Roble, su utilización es recurrente en taladros largos; se inyecta mediante un *anfoload* neumático, que garantiza un confinamiento ideal del explosivo en la columna del taladro.

Accesorios de voladuras.

Son una diversa gama de productos explosivos o pirotécnicos, utilizados en el proceso de voladuras en las diferentes industrias con el fin de que el proceso resulte más eficiente y productivo.

Los accesorios más utilizados en la unidad minera El Roble son:

Cordón detonante (de diferentes gramajes: de 3, 6, 12 y 38 g), mecha de seguridad, detonadores *de Exel LP* y electrónicos.

Cordón detonante.

De acuerdo con Indumil (2019),

Explosivo que consta de un núcleo constituido por un alto explosivo: Pentrita (PETN) protegido por papel, capas de hilo y PVC para garantizar resistencia a la humedad, tracción y abrasión. Es utilizado como accesorio de voladura, iniciador e intercomunicador de barrenos entre sí para trabajos de corte y voladuras especiales. Es empleado como línea principal de transmisión, puede iniciar cualquier cantidad de líneas adicionales conectadas con nudo hasta formar una malla. Este producto está diseñado como elemento transmisor de una onda detonante desde un punto a otro o de una carga explosiva a otra. Posee excelente resistencia al agua, siempre y cuando se preserve su revestimiento plástico. El cordón detonante de 38 g/m se utiliza específicamente en explosivo precorte y recorte en tonelería.

Figura 12: Cordón detonante



Fuente: Indumil (2016, p. 116)

Mecha de seguridad.

Figura 13: Mecha de seguridad



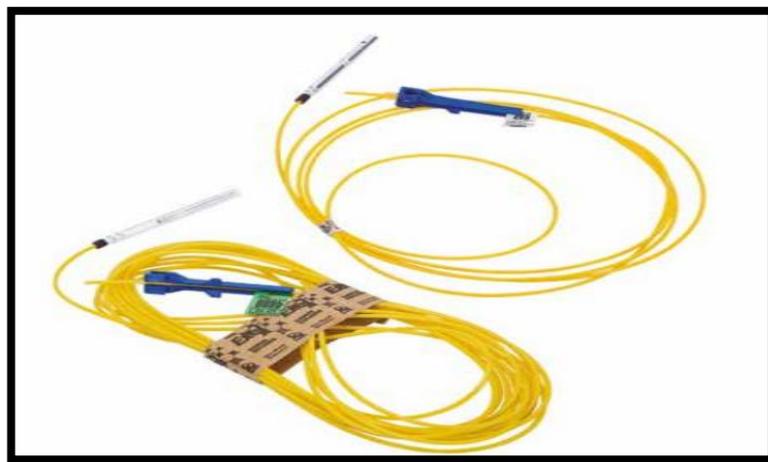
Fuente: Indumil (2016, p. 118)

Según Indumil (2019), es un

Explosivo accesorio de voladura conformado por un núcleo de pólvora negra recubierto de papel, varias capas de hilo de algodón, asfalto y una capa de PVC para garantizar impermeabilidad, flexibilidad y resistencia a la abrasión. Este accesorio transmite una llama o fuego, a una velocidad conocida y constante para iniciar un detonador común, que explota y se encarga de sensibilizar los explosivos que estén en contacto con él. Se emplea como medio de iniciación del detonador numero 8 fijado en uno de sus extremos. La mecha de seguridad tiene un tiempo de combustión por unidad lineal requerido para protección de la persona explosivista que realiza la iniciación de la voladura. Sensible bajo ciertas condiciones al golpe, fricción, chispa o fuego.

Detonador exel lp.

Figura 14: Detonador Exel LP



Fuente: Indumil (2016, p. 122)

Para Indumil (2016), se trata de una

Serie de detonadores no eléctricos de alta potencia, con largos tiempos de retardo y serie de 15 períodos con rangos de 0 a 9600 ms. La cápsula es de fondo (fuerza 12), que viene ensamblada al tubo de señal de color amarillo. Provee una serie de tiempos aplicables a voladuras de desarrollo subterráneo, principalmente túneles, entre otros, dado el alto rango de tiempos.

Variables en la voladura que influyen en los avances.

Cebado.

Como se muestra en la figura 15, el cebo es aquella porción de la carga que contiene el dispositivo de disparo y que sirve para iniciar la carga entera de explosivo en los taladros; además cumple la función de dar la secuencia de salida al disparo. Su preparación consiste en insertar el fulminante del *Exel* en el cartucho de *Emulind*, que luego se inserta en el taladro.

Figura 15: Preparación de cebo



Fuente: información interna de minera El Roble

Grado de acoplamiento.

Es la relación entre el diámetro del taladro y el diámetro de la carga explosiva. Su importancia consiste en que cuanto mayor sea el contacto directo entre el explosivo y la roca, los gases liberados en la explosión tendrán un mayor poder rompedor, lo que garantiza el buen desempeño de la voladura.

En minera El Roble, los taladros se disponen con broca de 45 a 51 mm y los cartuchos explosivos tienen un diámetro de 38 mm.

Grado de confinamiento.

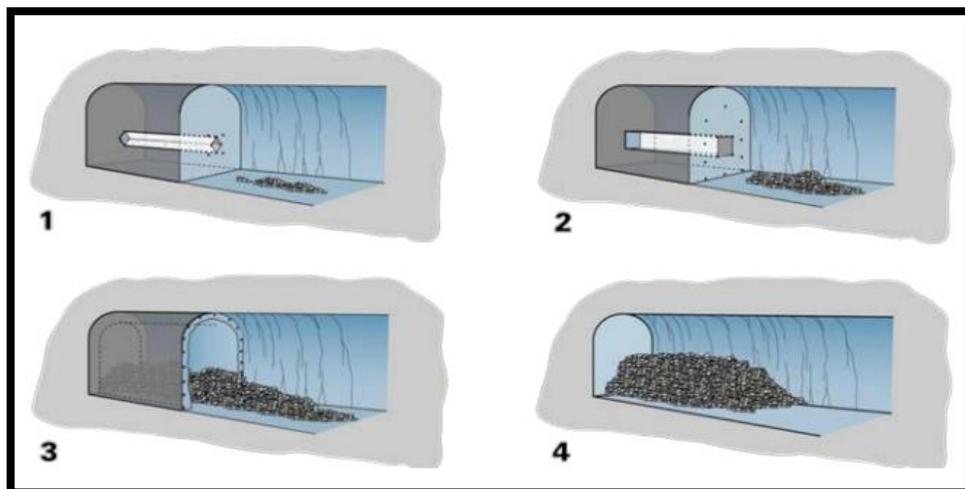
Consiste en uso de un taco inerte en la primera porción del taladro, previo carguío con el cebo y el agente explosivo. El objetivo del confinamiento es mejorar el resultado de la voladura mediante la concentración, la alta presión y la temperatura de los gases en los taladros. En la unidad minera El Roble, en la actualidad se utilizan barras encartuchadas con relaves de 38 mm de diámetro como material inerte, que se “retacan” o “atacan” con taqueros de madera o PVC para garantizar el confinamiento adecuado del explosivo y de los tacos inertes.

Secuencia de salida.

Es una de las variables más sensibles para lograr un buen desempeño de una voladura, puesto que los taladros deben detonarse de tal manera que se mantenga una secuencia ordenada, con el fin de generar las caras libres necesarias para la salida de cada taladro. La secuencia en los taladros se logra mediante el retardo en los detonadores ubicados en los cebos antes mencionados. Un error en este proceso puede hacer que la voladura no salga o se “sople” (pérdida total del proceso) o se corte (pérdida parcial del proceso). La figura 2 muestra una malla de perforación y voladura, en la que en puntos rojos se demarcó una numeración, que corresponde al orden o la secuencia de salida de los taladros en la ejecución del disparo.

En la siguiente figura se aprecia la adecuada secuencia de iniciación de las voladuras; la imagen 1 muestra cómo se genera la cara libre mediante el “arranque” ubicado en el centro de la sección. En la imagen 2 se amplía la secuencia del disparo por medio de la ampliación de la cara libre. En la imagen 3 se aprecia la salida de los taladros del rombo y el cuadrador y en la imagen 4 salen los taladros del contorno y de los arrastres.

Figura 16: Secuencia de salida de disparo en frente de avance



Fuente: Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Hebert (2013, p. 176)

Densidad y distribución de cargas.

Esta variable está en función de la longitud y los diámetros de los taladros, del tipo de roca para disparar y de las dimensiones y las propiedades del explosivo. En general, se busca una fragmentación uniforme del material por romper. El uso inadecuado de esta variable puede generar problemas en la totalidad del disparo, si la carga en los taladros es poca; caso contrario se presenta si hay un exceso de carga; la voladura se produce mediante rotura en las labores y, por ende, se origina un sobre costo, no solo en el explosivo, sino también en el sostenimiento que se debe emplear para el saneo de la labor.

En la figura 17 se muestran la distribución y la densidad del material explosivo por utilizar, con base en la malla de perforación y voladura antes expuesta en la figura 2.

Figura 17: Distribución y cantidad de explosivos en taladros

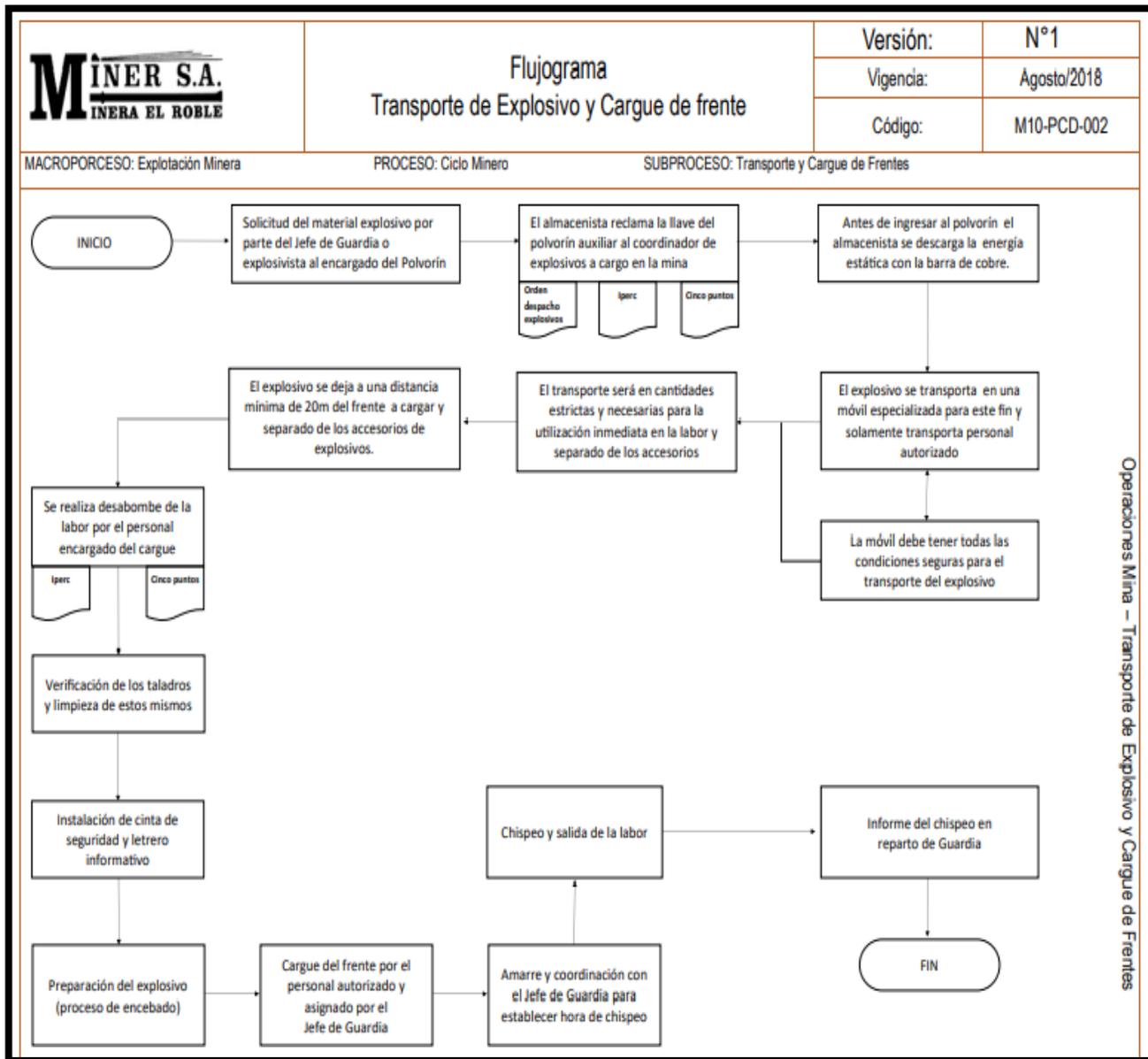
EMULIND-E 38 MM	UNIDADES	306	
INDUGEL AP 26 mm	UNIDADES	65	
CORDON 3 g/m	M	53	
CORDON 12 g/m	M	0	
DETONADORES	UNIDADES	46	
DETALLE TIROS	NÚMERO DE BARRENOS (unidades)	ENCARTUCHADO 38mm (cartuchos)	ENCARTUCHADO 26mm (cartuchos)
ARRANQUE	4	12	0
AYUDA ARRANQUE	4	11	0
ROMBO	4	10	0
CUADRADOR	4	9	0
ARRASTRES	6	12	0
HASTIALES	8	0	5
AYUDA DE CORONA	5	6	0
AYUDAS DE HASTIALES	6	6	0
CORONAS	5	0	5
ALIVIOS	4	0	0
TIROS VACIOS	16	0	0

Fuente: información interna de minera El Roble

Amarre.

Una vez se culmina la adecuada distribución de los agentes explosivos y accesorios en los frentes (carguío del frente), se precede al amarre, que consiste en enganchar el *fanel* o *exel* al cordón detonante con un ángulo de 90°, con el fin de garantizar la adecuada iniciación y secuencia de la voladura. Cabe anotar que una vez se conectan los exeles al cordón detonante, a este último se le colocan dos mechas de seguridad, a las que se les conoce el tiempo en el que se consumen. Este procedimiento pone en sobre aviso a disparador, que deberá retirarse a un sitio seguro en el tiempo indicado.

Gráfica 4: Flujograma de perforación de jumbo electrohidráulico en minera El Roble



Fuente: información interna de minera El Roble

En resumen, para llevar a cabo los avances de las labores en minera El Roble se cumplen los siguientes pasos, que están soportados en los procedimientos escritos de trabajo seguro, con el fin de garantizar no solo la productividad del proceso sino también la seguridad del personal vinculado en cada proceso.

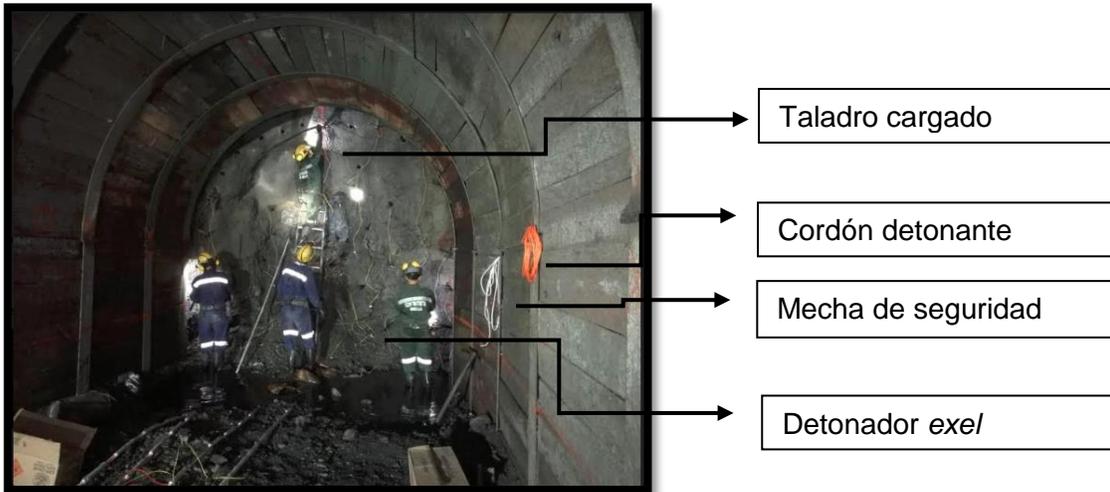
- Una vez culminado el proceso de sostenimiento de los frentes, de acuerdo con las recomendaciones geomecánicas y los estándares de sostenimientos existentes, se procede al marcado del frente con la dirección y el gradiente.
- Se instala el equipo de perforación para llevar a cabo la barrenación de los taladros, que más tarde se cargaran con explosivos; como antes se mencionó, las perforaciones se llevan a cabo en forma manual o mecanizada y la última es la más utilizada.
- Una vez culminada la perforación del frente, se procede al transporte de los explosivos (agentes y accesorios explosivos) desde el polvorín ubicado en interior de la mina hasta los frentes por disparar; dicho movimiento se realiza mediante una camioneta acondicionada de manera única y exclusiva para la actividad en mención.
- De antemano se conocen la malla de perforación y voladura estándar y, de acuerdo con previa inspección del frente objetivo, se toma la decisión de modificarla. Una vez el explosivo ha llegado al frente, el personal de apoyo enceba la carga de fondo o iniciador (unión de un cartucho de 38 mm más detonador de *exe/*) y se procede a la distribución de los *exe/*es, como se muestra en la fotografía adjunta en la parte inferior.
- Una vez terminada la distribución se procede al carguío de los taladros con la carga explosiva (agente de voladura); se debe tener cuidado de dejar espacio para el retacado, que se hace con cartuchos llenos de material de relave. El último paso mencionado es de vital importancia, puesto que da confinamiento a la carga explosiva y, por ende, un mayor avance en el proceso de voladura.
- Una vez se culmina con el retacado de todos los taladros, se inicia a la instalación o el enganche del cordón detonante a los detonadores *exe/*es, para más tarde proceder al amarre de la mecha de seguridad al cordón detonante.
- Una vez culminado el proceso del carguío del frente, se coordina con la supervisión la orden de disparo, para lo que se deben tener en cuenta los horarios ya estipulados.

Figura 18: Perforación mecanizada de frente mediante el uso de Jumbo DD 321 en minera El Roble



Fuente: información interna de minera El Roble

Figura 19: Proceso de carguío de frente en labor de 3.5 x 3.5 m en minera El Roble



Fuente: elaboración propia con base en información interna de minera El Roble

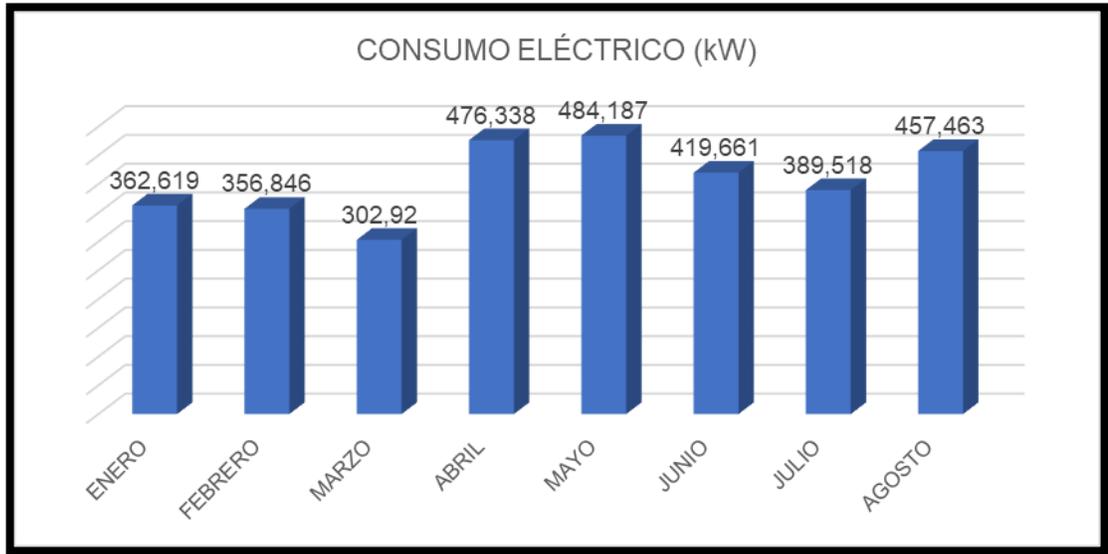
9.2. *KPI del consumo eléctrico (kW)*

Este indicador muestra el consumo energético por hora en el área de operaciones en la mina. La energía eléctrica es fundamental para el normal funcionamiento de las diferentes actividades en operaciones en el interior de la mina; entre una de las importancias de la energía eléctrica en las operaciones mineras subterráneas está la de garantizar una atmósfera respirable en la mina para la ejecución de las diferentes actividades; en minera El Roble tal fin es llevada a cabo por medio de 14 ventiladores de diferentes capacidad (desde 15 HP hasta 75 HP de potencia), que conforman el circuito de ventilación para los diferentes niveles de las labores subterráneas. Un punto importante para recalcar es la utilización de equipos mecanizados, que en muchas ocasiones son altos consumidores de energía; entre los más importantes están las maquinas electrohidráulicas, como, por ejemplo, los jumbos frontonero y empernador, el robojet, las bombas de agua, algunas otras máquinas y, además, el servicio de aire comprimido (compresores).

Este indicador busca mantener un control del uso eficiente de la energía puesto que se evidenció un alto costo por el uso irracional del servicio.

En la gráfica 4 se observa cómo este indicador ha venido al alza; sus picos se encuentran en los meses de abril y mayo, pero siempre se mantiene constante a lo largo del tiempo, sin ninguna variación considerable.

Gráfica 5: Gráfica de consumo eléctrico de los últimos seis meses de 2018 en operaciones en la mina en minera El Roble



Fuente: elaboración propia

Lo habitual es tener un consumo promedio de 403,307.625 kW/mes, que, con un costo medio de \$360/kW, equivale a \$145,190,745 destinados a este ítem cada mes, al año por este concepto representa costos para la compañía por valor de \$1,742,288,940. Este es uno de los KPI potencialmente optimizables que pueden brindar grandes ahorros mediante un consumo energético eficiente, de modo que se logre evitar el derroche y utilizar la mejor disposición de este recurso.

9.3. Consumo por actividad

Como antes se mencionó, el área de operaciones en la mina está compuesta de diferentes subáreas que, a su vez, realizan diferentes actividades con el fin de cumplir la extracción del material de interés del proyecto. Entre dichas labores se encuentran las de perforación de frentes, instalación de sostenimiento, lanzado de *shotcrete*, ventilación, iluminación y demás actividades de apoyo a la operación.

Gráfica 6: Consumo energético por actividad



Fuente: elaboración propia

En la gráfica 6 se pueden observar los consumos energéticos de las diferentes actividades llevadas a cabo en el área de operaciones en la mina, lo que permite identificar cuáles son los puntos en los que se pueden obtener oportunidades de mejora en optimización de costos.

Se observa que la actividad con mayor consumo está relacionada con el circuito de ventilación, cuyo uso representa el 69% del total, que, en promedio, equivale a 278.650 kW mensuales, que, a una tarifa de \$360/kW, constituye un pago promedio

de \$100,313,670, razón por la que es de suma importancia analizar dicho ítem, con el fin de optimizar y generar un ahorro considerable.

El segundo elemento que impacta en forma notable es la generación de aire comprimido para el desarrollo normal de diferentes actividades de apoyo a la operación, que representa el 13%, equivalente a 53.211 kW mensuales, por valor de \$19,156,109.

El tercer aspecto que representa un valor considerable hace referencia al sistema de bombeo de aguas residuales en la mina, que representa el 11%, equivalente a 44.681 kW, con un costo de \$16,085,282 mensuales.

El consumo eléctrico generado por los equipos *trackless* utilizados en la operación minera, tales como los jumbos electrohidráulicos, cuya función es portar los taladros en el frente que luego se cargan con explosivos y se disparan para la generación de los avances en roca, el *robojet*, cuyo objetivo principal es lanzar *shotcrete*, que le da soporte al macizo rocoso, y el *bolter*, que se encarga de la instalación final de sostenimiento, con el propósito de completar el reforzamiento en la cavidad rocosa, no representan un consumo considerable, a pesar de realizar los mayores trabajos en la mina.

De los ítems antes mencionados, se analizaron en profundidad los dos principales, es decir, se revisaron la ventilación y los compresores utilizados en la generación del aire comprimido que consume la operación.

En lo referente al bombeo y los equipos, se dejaron para que más adelante se profundice en este aspecto en otro posible proyecto desarrollado en la compañía.

9.4. Ventilación

Toda explotación minera subterránea, por realizarse a través de excavaciones en el interior del macizo rocoso, debe garantizar una atmósfera adecuada para la respiración de las personas, puesto que por lo común el ser humano, en su estado ideal, respira de manera natural en superficie, en la que se encuentra una

composición del aire de 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% de otros gases, por lo que es de suma importancia que la atmósfera de trabajo del personal que se encuentre en las diferentes labores sea similar a la encontrada en superficie.

El decreto 1886 de 2015, mediante el que el Gobierno Nacional expidió el reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas (Presidencia de la República, 2015), estableció parámetros mínimos de ventilación que toda explotación minera debe cumplir, entre los que se encuentra que deben suministrarse caudales de aires por diferentes motivos, con el fin de garantizar que todas las labores a las que el personal tenga acceso; que los lugares en los que se localice maquinaria deben estar recorridos de manera permanente por un volumen de aire suficiente, capaz de mantener limpia la atmósfera de trabajo; para ello se tienen en cuenta los siguientes requerimientos:

- Personal.
- Equipos.
- Gases.
- Explosivos.
- Factor de seguridad.

En el artículo 39 del reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas, se establecieron los valores límites permisibles para gases contaminantes en la atmósfera de cualquier labor subterránea, que se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla 1: Valores límites permisibles para gases contaminantes

GAS	FÓRMULA	TLV-TWA(PPM)	TLV- STEL(PPM)
Dióxido de carbono	CO ₂	5000	30,000
Monóxido de carbono	CO	25	-
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	1	5
Anhídrido sulfuroso	SO ₂	-	0.25
Óxido nítrico	NO	25	-
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	0.2	-

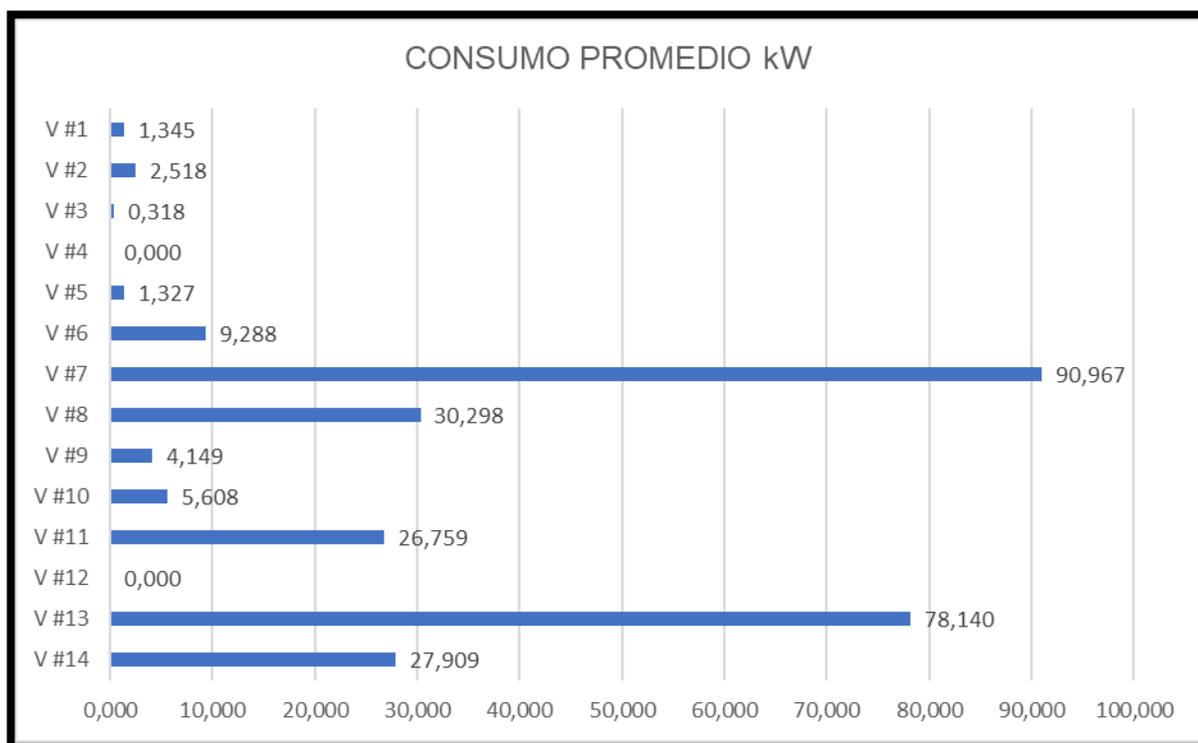
Notas: TLV = *threshold limit value* (valor límite permisible); TWA = *time weighted average* (nivel de exposición permisible); STEL = *short time exposure limit* (límite de exposición de corta duración); PPM = número de partes por millón

Fuente: elaboración propia con base en Presidencia de la República (2015, artículo 39)

Para dar cumplimiento a la normatividad vigente en seguridad minera colombiana y con el fin de brindar el confort adecuado al personal que labora en las instalaciones de la compañía, se tiene establecido un circuito de ventilación ideal, que garantice una atmósfera apropiada para el normal desarrollo de las actividades; se encontró que en la actualidad se asegura una entrada de aire de 277,117 pies cúbicos por minuto, que cubre la necesidad en los diferentes frentes de explotación, lo que se logra a través de 14 ventiladores de diferentes capacidades con los que cuenta la compañía, dispuestos en zonas estratégicas que permitan un óptimo circuito de ventilación.

El consumo promedio de la ventilación en la mina representa el 69%, por lo que se desglosa por ventiladores el consumo generado por cada uno de ellos.

Gráfica 7: Consumo energético por ventilador



Fuente: elaboración propia

- Ventilador 7.

Localizado en el nivel 1812, con un consumo promedio de energía de 90,967 kW, equivalente al 33% del consumo total del sistema de ventilación, y un costo promedio mensual de \$32,748,120.

- Ventilador 8.

Localizado en el nivel 1813, con un consumo promedio de energía de 30,298 kW, equivalente al 11% del consumo total del sistema de ventilación, y un costo promedio mensual de \$10.907.280.

- Ventilador 11.

Localizado en el nivel 1797, con un consumo promedio de energía de 26,759 kW, equivalente al 10% del consumo total del sistema de ventilación, y un costo promedio mensual de \$9.633.240.

- Ventilador 13.

Localizado en el nivel 2000, con un consumo promedio de energía de 78,140 kW, equivalente al 28% del consumo total del sistema de ventilación, y un costo promedio mensual de \$28.130.400.

- Ventilador 14

Localizado en el nivel 1767, con un consumo promedio de energía de 27,909 kW, equivalente al 10% del consumo total del sistema de ventilación, y un costo promedio mensual de \$10.047.240.

Estos cinco ventiladores evidencian un consumo energético de 254,0748 kW mensuales, equivalente al 91% del consumo total dispuesto para toda la ventilación de la mina.

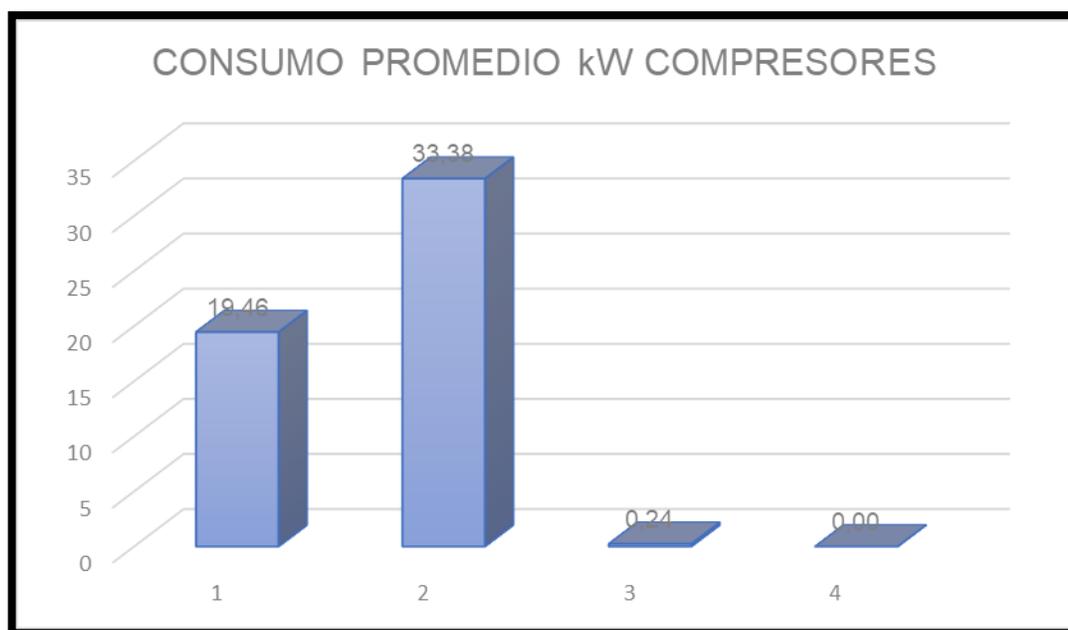
Cabe resaltar que, de estos cinco ventiladores, los más críticos son los números 7, 8 y 13, por hacer parte de circuito de ventilación principal, que se encarga de evacuar todo el aire viciado generado en la mina y debe estar prendido la mayor parte del tiempo. Los demás ventiladores hacen parte del sistema de ventilación secundaria, que se encarga de inyectar aire fresco a los frentes de explotación y

que se pueden regular de acuerdo con la actividad que se esté desarrollando en cada momento.

9.5. Aire comprimido

Para la realización de actividades complementarias a la operación se requiere el uso del aire comprimido, que es una masa de aire con una densidad mucho más alta que la atmosférica, lo que genera, a través de su liberación, la energía suficiente y necesaria para la puesta en marcha de diversos elementos que funcionan a base de ella. En la mina El Roble se cuenta con una planta de generación de aire comprimido, localizada en el nivel 1910 en superficie, compuesta por cuatro compresores, con una capacidad instalada de 3.600 pies cúbicos por minuto.

Gráfica 8: Consumo energético por compresores



Fuente: elaboración propia

De los cuatro compresores disponibles en la unidad minera, por lo general se encuentra encendidos dos de ellos y los demás están en disponibilidad. En promedio, durante el día, se consumen 17 horas de compresor, que es una cantidad alta, si se tiene presente que los turnos tienen un tiempo efectivo de trabajo de nueve horas y este servicio se utiliza en ocasiones puntuales como apoyo a la operación.

Con la aplicación de *kaizen* y la metodología de causa y efecto (o espina de pescado) se buscó identificar las principales causas que hacen que exista un incremento en el costo energético por el alto uso del aire comprimido (Romero Bermúdez y Díaz Camacho, 2010); una vez identificada la causa raíz se plantearon planes de acción, con responsables y plazos establecidos, con el objetivo de lograr la reducción del costo mediante la optimización del proceso, como se aprecia en la gráfica 10.

10. Análisis de causa y efecto

Mediante esta herramienta se determinaron las causas principales de los KPI en estudio: eficiencia en el porcentaje de perforación y voladura y consumo energético, que se expusieron en páginas anteriores.

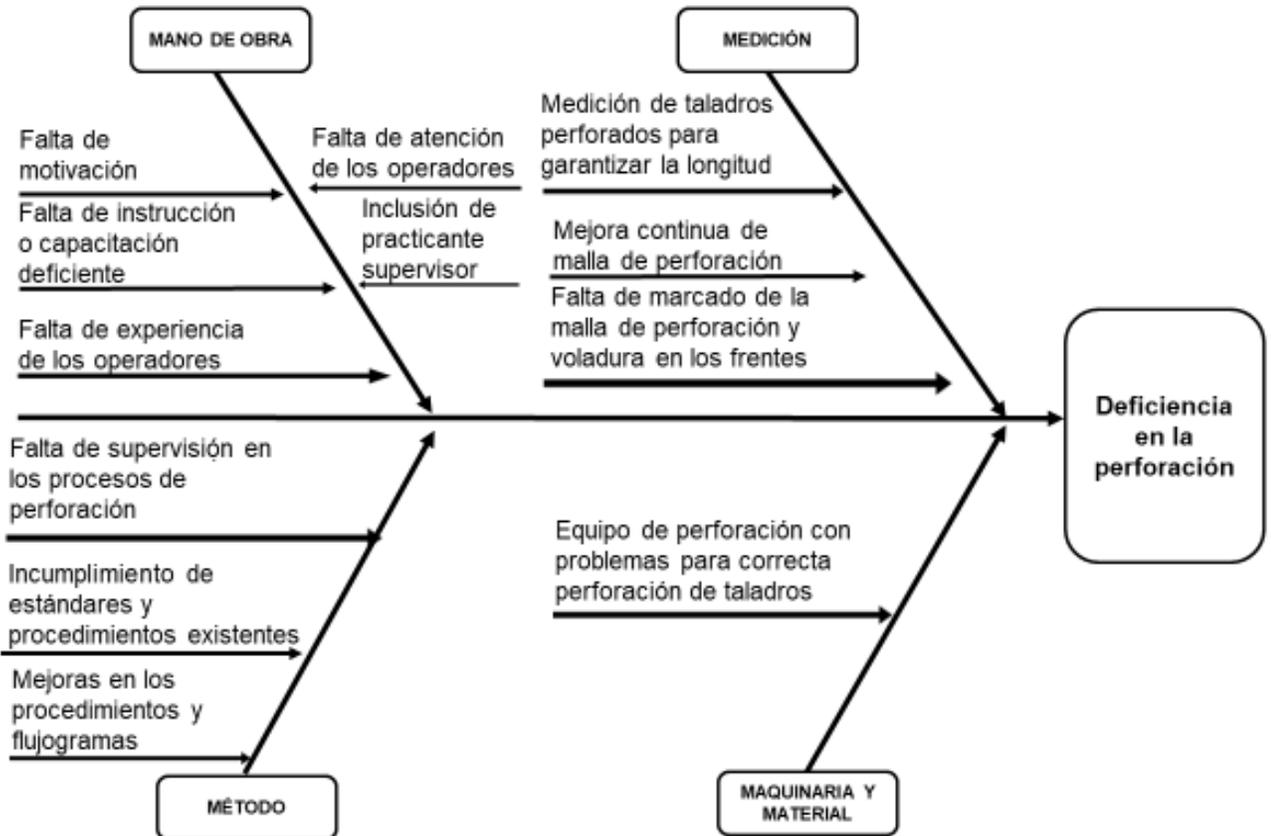
Con la utilización del diagrama de causa y efecto, o diagrama de Ishikawa, se identificaron y se clasificaron las causas más importantes, que se exponen a continuación.

En las gráficas 9, 10 y 11 se muestran las causas principales que dan como resultado una deficiencia en los procesos de perforación y voladura y en el consumo energético; para el análisis de las causas se consideraron variables tales como mano de obra, medición, métodos y materiales y máquinas. Después del análisis se propone una serie de actividades en el área de mina con el fin de contrarrestar las

pérdidas en los procesos que se evidenciaron mediante la realización del presente proyecto para con ello minimizar los deterioros en la rentabilidad de la organización.

Gráfica 9: Diagrama de espina de pescado de Ishikawa de la deficiencia en porcentaje de perforación

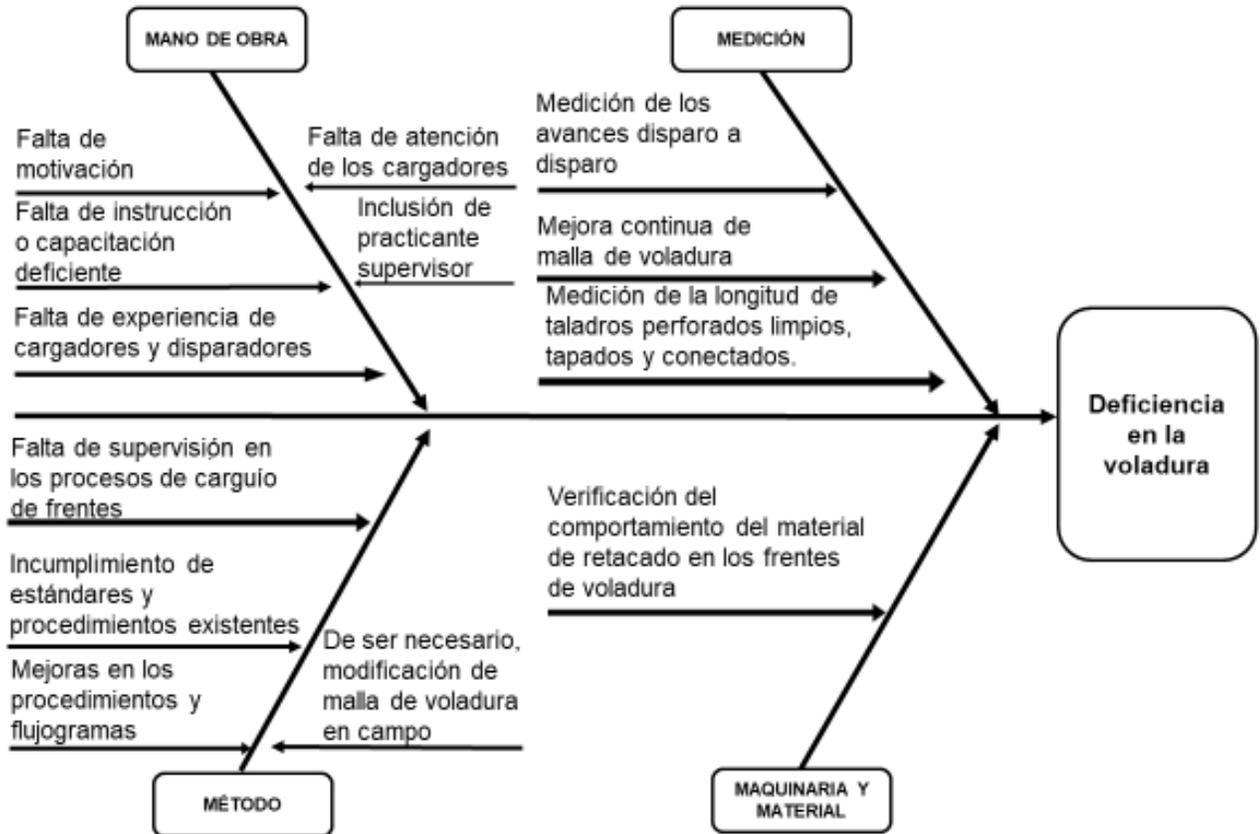
DIAGRAMA DE ESPINA: CAUSAS Y EFECTO



Fuente: elaboración propia

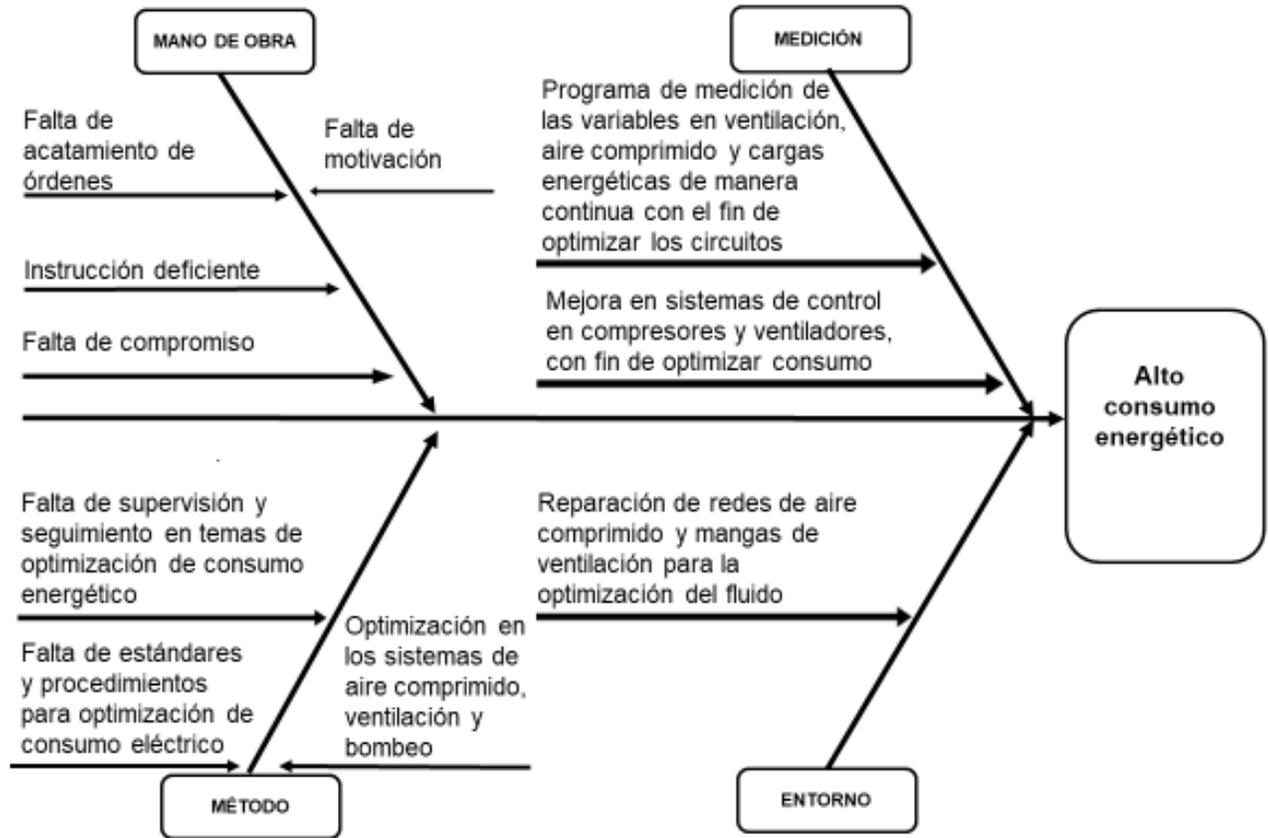
Gráfica 10: Diagrama de espina de pescado de Ishikawa de la deficiencia en porcentaje de voladura

DIAGRAMA DE ESPINA: CAUSAS Y EFECTO



Gráfica 11: Diagrama de espina de pescado de Ishikawa de la deficiencia en alto consumo energético

DIAGRAMA ESPINA: CAUSAS Y EFECTO



Fuente: elaboración propia

11. Propuestas de optimización de KPI

Una vez finalizado el análisis de los diferentes KPI identificados en dos de los procesos más importantes del área de operaciones en la mina, que tienen considerable impacto económico en la operación, se procedió a proponer varias alternativas de optimización del uso eficiente de parámetros o variables relacionadas con los porcentajes de perforación y voladura y con el consumo energético de la operación, tanto en el circuito de ventilación, como en el uso de aire comprimido en la operación.

11.1. *Propuesta de plan de acción para optimización de eficiencia*

Con el objetivo de obtener mejoras en los procesos de perforación y voladura se plantearon las siguientes propuestas, en las que se apunta, en lo fundamental, a un cambio de cultura del personal involucrado mediante la metodología *kaizen* y mayores jornadas de capacitaciones en el proceso de perforaciones y voladura, tales como:

- Capacitación sobre metodología *kaizen* al personal involucrado: dirección de minas, superintendente de mina, asistente de superintendencia de mina, jefes de turnos, supervisores de zona, operadores y ayudantes de jumbo y líderes y ayudantes en carguío de frentes.
- Capacitación sobre la importancia de la optimización y el mejoramiento de los indicadores de perforación y voladura al personal involucrado: dirección de minas, superintendente de mina, asistente de superintendencia de mina, jefes de turnos, supervisores de zona, operadores y ayudantes de jumbo y líderes y ayudantes en carguío de frentes.
- Capacitación a jefes de turnos, supervisores de zona, operadores y ayudantes de jumbo sobre el objetivo de tres metros en eficiencia de perforación y voladura, así como sobre la importancia del marcado de la malla de perforación y voladura, el uso de guidores para conservación del paralelismo y la dirección de

los taladros, la uniformidad en la longitud de la perforación de los frentes y la conservación y la limpieza de los taladros, con el fin de desarrollar un buen proceso de carguío y, por ende, de mejorar el avance esperado.

- Programa de capacitación a la supervisión y al personal encargado del proceso de carguío de frentes, referente a las propiedades de los explosivos y la seguridad en manipulación de agentes y accesorios explosivos.
- Programa de capacitación a la supervisión y los cargadores y los disparadores en técnicas correctas de encebado, distribución de explosivos en el frente, carguío, retacado, amarre del cordón detonante a *exeles* y desde el cordón detonante a la mecha de seguridad. Además, en técnicas correctas para la eliminación de tiros cortados o fallados.
- Vinculación de dos practicantes en ingeniería de minas, con el fin de soportar los procesos de perforación y voladura en la medición de la longitud de taladros perforados y cargados, así como también la evaluación y el seguimiento de los frentes disparados.
- Continuo diseño de mallas de perforación y voladura al tener en cuenta la clasificación de masas de rocas (RMR o *rock mass rating*) y otras variables geomecánicas de los frentes que se van a disparar durante la semana.
- Exigencia a los jefes de guardia y supervisores acerca del cumplimiento de la utilización de los recursos implementados para perforación y voladura.

11.2. Propuesta de optimización del circuito de ventilación

Para la reducción de costos referente al consumo energético en el sistema de ventilación de la mina, se plantearon varias propuestas, que podrían aplicarse a la unidad minera con el fin lograr una mejora y la disminución del número de kW consumidos es este aspecto.

En sus inicios, el circuito de ventilación de la mina fue diseñado para una temporada en el que la unidad se encontraba en uno de sus puntos máximos, puesto que se venían realizando las tres fases principales de toda operación; se estaba avanzando la rampa principal, que es la vía de mayor importancia de toda unidad minera; por donde, por ella entra la mayor parte de los servicios brindados a la operación y por ella sale toda la extracción de mineral y también el desmonte producidos. Por otro lado, se avanzaron de manera acelerada y concentrada los ingresos al cuerpo de mineral y al mismo tiempo se debía cumplir la producción diaria necesaria para que fuera rentable la empresa; todo lo anterior obligaba a tener un gran caudal de aire limpio que entrara en la mina para garantizar una atmósfera adecuada de trabajo.

- PROPUESTA # 1

La producción diaria de la operación es de 850 toneladas, para lo cual se dispone de cuatro volquetes para garantizarla, con capacidad de alrededor de 20 toneladas, disponibles las 24 horas del día; sin embargo, por lo general se presta apoyo en las horas de la mañana a otras áreas de la mina, como geología, para garantizar el abastecimiento de mineral en la planta de procesado, y a la de proyectos, para las obras de construcción de la nueva planta de relaves. Todo ello obliga a iniciar la extracción desde cerca de las 2:00 p. m., tiempo en el que los requerimientos de aire fresco bajan y no son tantos.

Es conveniente aprovechar este espacio para bajar la capacidad utilizada de ventilación, a través del ventilador # 7, que se ubica en el nivel 1812, zona intermedia de la operación, que ayuda a la extracción del aire viciado de la parte más profunda de la mina, que es la que mayor consumo presenta.

Se propone realizar apagado del ventilador # 7 de 08:00 a. m. a 2:00 p. m., es decir, alrededor de seis horas diarias, lo que representa un ahorro de 1,119 kW al día, con costo de \$402,840, con lo que se lograría al mes una reducción en promedio de \$12,080,000 y una anual de \$144,960,000, solo en este ventilador.

- PROPUESTA # 2

Se tomó en cuenta que en meses anteriores se desarrolló un proyecto especial en el nivel 2000, que fue la del mecanismo principal por el que se evacúa todo el aire viciado de la operación de la parte baja hacia la superficie, que tuvo que ser intervenida para el reforzamiento del sostenimiento en zonas puntuales. Por razones de seguridad, se hizo necesario apagar el ventilador principal de la mina durante el tiempo que se estuviesen realizando labores en el área; estas paradas se llevaban a cabo desde inicio de turno (7:30 a. m.), sin que se afectase la ventilación en la mina.

Se propone realizar el apagado de dicho ventilador desde las 08:00 a. m. hasta las 02:00 p. m., es decir, cerca de seis horas al día, lo que representa un ahorro de 1,119 kW al día, con costo de \$402,840, con lo que se logra al mes una reducción en promedio de \$12,080,000 y una anual de \$144,960,000, solo en este ventilador.

- PROPUESTA # 3

Se propone fabricar e instalar una puerta retráctil en el nivel 1812, con el fin de garantizar que el ventilador principal de 250 mil pies cúbicos por minuto realice el trabajo para el que fue instalado, de modo que extraiga el aire viciado de la mina, con lo que se eliminarían los ventiladores # 7 y 8, ubicados en el nivel 1812, de 60,000 y 30,000 pies cúbicos por minuto, en su orden.

El ahorro obtenido con esta optimización del circuito de ventilación sería el siguiente: ventilador # 7, 90,967 kW al mes (32.748.120) y ventilador # 8, 30,298 kW al mes (\$10,907,280), para un total aproximado de \$43,655,400 al mes, lo que equivale a \$523,864,800 al año en reducción por concepto de energía.

PROPUESTA # 4

Se analizará ciclo de minado por labores, con el fin de optimizarlo y de minimizar el uso de ventiladores. En el análisis propuesto se espera ahorrar por lo menos dos horas por turno en uso de ventilador en labores. Se generaría un ahorro adicional de \$10,796,112.

12. Conclusiones

- La metodología *kaizen* es aplicable a cualquier tipo de empresa, su implementación se lleva a cabo con una mínima inversión financiera y de personal y depende en gran medida de la decisión y la actitud de los directivos y participantes por trabajar en la mejora continua de las organizaciones.
- Con base en las productivas experiencias en la aplicación de la metodología *kaizen*, se recomienda continuar con la aplicación en la unidad minera El Roble mediante la ampliación del alcance en pro de seguir identificando e interviniendo tareas que contribuyan al mejoramiento de los procesos; el trabajo continuo y constante sobre la organización implantará la filosofía en la compañía.
- Luego de seleccionar y analizar los KPI, porcentaje de eficiencia de la perforación y voladura y del consumo energético, se identificaron, por medio de la herramienta del diagrama de espina de pescado, problemas críticos que afectan los resultados y se plantearon unas soluciones. Estos ejercicios generan un impacto positivo en los costos de operación.
- *Kaizen* alberga una serie de principios, técnicas y herramientas que son aplicables a minera El Roble; con este primer estudio se observó que brindan transformaciones continuas e incrementales, que ayudan al cumplimiento de metas

y objetivos y que llegan también a impactar la estrategia de la compañía si se desarrollan de manera completa.

13. Referencias

Anton, A. I. (1997). *Goal identification and refinement in the specification of software-based information systems* (disertación doctoral, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA).

Asociación Española de la Calidad AEC, 2019. Diagrama de dispersión.
Recuperado de <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/diagrama-de-dispersion>

Atkinson, P. (2013). *"Creating culture change: kaizen and performance improvement"*. *Operations Management*, 10-16.

Barone, D., Jiang, L., Amyot, D., y Mylopoulos, J. (2011). Composite indicators for business intelligence. En M. Jeusfeld, L. Delcambre & T. W. Ling (Eds.), *Conceptual modeling–ER 2011* (pp. 448-458). Berlín y Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-24606-7_35

Barnaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., y Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Departamento

de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Laboratorio de Tecnologías Mineras. Recuperado de oa.upm.es/21848/1/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf

Cangro, Richard. (2010). Mentoring trough Kaizen. *Illinois Music Educator*, 71(2): 88.

Congreso de Colombia (2001). *Ley 685, de 15 de agosto de 2001, por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Congreso de Colombia. Recuperado de http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0685_2001.html

Barría, C. (2018, 3 de enero). Por qué se está disparando el precio del cobre en el mundo y qué efectos puede tener en Chile y Perú. *BBC*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-42518125>

Calderón Navarro, M. A. (2015). *Optimización de las prácticas de perforación y voladura en el avance y producción de la minería de mediana escala (unidad minera Macdesa)* (trabajo de grado, Ingeniería de Minas, Universidad del Centro de Perú, Facultad de Ingeniería de Minas, Huancayo). Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3182>

Daga Chamorro H. C. (2017) *Aplicación del ciclo de Deming para aumentar la productividad del área de chancado en una minera que extrae oro, Perú 2016* (trabajo de grado, Ingeniería Industrial, Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería Industrial, Perú) Recuperado de

http://181.224.246.201/bitstream/handle/UCV/21889/Daga_CHC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Dean, J.W. Jr. y Bowen, D.E. (1994). *Management Theory and Total Quality: Improving Research and Practice through Theory Development*. Academy of Management Review, St Paul. MN; West.

EXSA (2004). *Manual práctico de voladura de rocas*. Lima: EXSA. Recuperado de <https://es.slideshare.net/AlfredoPangue/manual-practico-de-voladura-exsa>

Figueroa, J. L. (2009, 24 de enero). Kaizen. La clave del cambio. Parte I. *Fundytec*. Recuperado de http://fundytec.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=4

Gehisy (2017a, 22 de mayo). El gráfico o diagrama de control. *Calidad y ADR*. Recuperado de <https://aprendiendocalidadyadr.com/grafico-o-diagrama-de-control/>

Gehisy (2017b, 13 de marzo). Las 7 herramientas básicas de calidad. *Calidad y ADR*. Recuperado de <https://aprendiendocalidadyadr.com/7-herramientas-basicas-calidad/>

Glover, W. J., Farris, J. A., Van Aken, E. M., y Doolen, T. L. (2009). Critical success factors for the sustainability of Kaizen human resource outcomes: an

empirical study. *International Journal of Production Economics*, 132(2), 197-213, 42-65. doi: 10.1016/j.ijpe.2011.04.005

Herrala, T. (2000). Much Ado About Muda, *Business West*, 10499822, 16 (10). 53.

Howell, V. W. (2011). "Kaizen Events". *Ceramic Industry*, 30-32.

Industria Militar de Colombia, Indumil (2019). *Catálogo general. Productos militares*. Bogotá: Indumil. Recuperado de: https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2016/03/Catalogo_general.pdf

Imai, M. (1986). *Kaizen. The key to Japan's competitive success*. Nueva York; NY: McGraw-Hill.

Imai, M. (1998). *Kaizen: la clave de la ventaja competitiva japonesa*. Ciudad de México: CECSA.

Instituto Europeo del Cobre (2018). *Instituto Europeo del Cobre*. Bruselas: Instituto Europeo del Cobre. Recuperado de <http://copperalliance.es>

Jiménez P, I. M., y Molina E., J. M. (2006). Propuesta de medición de la productividad en minería de oro vetiforme y reconocimiento de estándares productivos sostenibles. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 19, 73-86.

Recuperado de

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/722/11305>

Kato I., & Art, S. (2010). *Toyota Kaizen methods: six steps to improvement*. Nueva York, NY: Productivity Press.

Lechner, M. J., & Earnest, D. F. (2016). *Amended updated mineral resource estimate, El Roble copper-gold project, Chocó Department, Colombia*. Vancouver: Atico Mining Corporation. Recuperado de http://atico-mining.com/_resources/technical-reports/2016-04-11_El_Roble_Technical_Report

Letens, G., Farris, J. & Van Aken, E. M. (2006). Development and application of a framework for the design and assessment of a Kaizen event program. En *Proceedings of the 2006 American Society for Engineering Management Conference*, Huntsville, AL. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/285600216_Development_and_Application_of_a_Framework_for_the_Design_and_Assessment_of_a_Kaizen_Event_Program

Lillrank, P., & Kano, N. (1989). *Continuous improvement-quality control circles in Japanese industry*. Michigan: Center for Japanese Studies.

López Jimeno, C. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de

http://bibliogeo.ing.ucv.ve/DB/bfiegucv/EDOCS/SRed/2011/10/T041500002027-0-Manual_de_perforacion_y_voladura_de_rocas-000.pdf

Mika, G. (2006). *Kaizen event implementation manual*. Dearbon, MI: Society of Manufacturing Engineers.

Murray, B. (2012, 7 de junio). Etapas del proceso productivo de una mina. En *Curso de minería para periodistas*. Santiago de Chile : SONAMI. Recuperado de <http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/04/01.-Etapas-del-Proceso-Productivo-de-una-Mina.pdf>

Nagyova, A., y Pacaiova, H. (2009). Cómo construir manual para indicadores clave de rendimiento-KPI. En B. Katalinic (Ed.), *DAAAM International Scientific Book* (pp. 135-143). Viena: DAAAM International. doi: 10.2507/daaam.scibook.2009.15

Pero-Sanz, J.A., Fernández González, D., & Verdeja L. F (2018) *Fundiciones Férrreas. Materiales para Ingeniería*. (1ª edición) Madrid. Pedeca Press Publicaciones.

Pintzos, G., Matsas, M., & Chryssolouris, G. (2012) Defining manufacturing performance indicators using semantic ontology representation. *Procedia CIRP*, 3, 8-13. doi: 10.1016/j.procir.2012.07.003

Popova, V., & Sharpanskykh, A. (2010). Modeling organizational performance indicators. *Information Systems*, 35(4), 505-527. doi: 10.1016/j.is.2009.12.001

Presidencia de la República (2015). *Decreto 1886, de 21 de septiembre de 2015, por el cual se establece el reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas*. Bogotá: Presidencia de la República. Recuperado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=65325>

Rojas, D., Garay, V. (2017) *Informe tendencias del mercado del cobre*. Chile: Comisión chilena del cobre.

Rodríguez Álvarez, C. A. (2015). *Metodología de implementación de kaizen y 7 desperdicios para TABLEMAC S. A. - Planta de Yarumal* (trabajo de grado, Maestría en Administración, Universidad EAFIT, Escuela de Administración, Medellín). Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/xmlui/handle/10784/8300>

Romero Bermúdez, É., y Díaz Camacho, J. (2010). El uso del diagrama causa-efecto en el análisis de casos. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (México)*, 40(3-4), 127-142. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=27018888005>

Royal Society of Chemistry (2017). *Royal Society of Chemistry*. Cambridge, Reino Unido, y Londres : Royal Society of Chemistry. Recuperado de www.rsc.org

Scoppetta López. A. M. y Vásquez Castro Pablo Fidel (2005) Diseño de un programa de mejoramiento continuo para el proceso productivo de las empresas agrícolas del Magdalena Cía. Ltda. Con base en el sistema gerencias de bajo costo Gemba Kaizen (trabajo de grado, Administración de Empresas, Universidad del Magdalena, Facultad de Ciencias Empresariales y Económicas, Santa Marta, 2005) Recuperado de <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/bitstream/123456789/289/1/ME MORIA%20DE%20GRADO.pdf>

Statista (2018). Ranking de los principales países productores de cobre a nivel mundial en 2017 (en miles de toneladas métricas) (2018). *Statista*. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/635359/paises-lideres-en-la-produccion-de-cobre-a-nivel-mundial/>

Suárez Barraza, m. F. (2009). El Kaizen-GP: la aplicación y la sostenibilidad de la Mejora Continua de Procesos en la gestión pública, México, DF: miguel Ángel Porrúa editorial.

Suárez-Barraza, M. F., Castillo-Arias, I., y Miguel-Dávila, J. Á. (2011). La aplicación del Kaizen en las organizaciones mexicanas. Un estudio empírico. *Revista de Globalización, Competitividad y Gobernabilidad*, 5(1), 60-74. Recuperado de www.redalyc.org/pdf/5118/511851326007.pdf

Suárez-Barraza, M. F., y Miguel-Dávila, J. Á. (2011). *Implementación del kaizen en México: un estudio exploratorio de una aproximación gerencial japonesa en el contexto latinoamericano*. 21(41), 19-37. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/35367/35732>

- Tsai, Y.-C., & Cheng, Y.-T. (2011). Analyzing key performance indicators (KPIs) for e-commerce and internet marketing of elderly products: a review. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 55(1), 126-132. doi: 0.1016/j.archger.2011.05.024
- Vo, B., Kongar, E., & Suárez Barraza, M. F. (2019). Kaizen event approach: a case study in the packaging industry. *International Journal of Productivity and Performance Management*. doi: 10.1108/IJPPM-07-2018-0282
- U. S. Environmental Protection Agency (1994). *Extraction and beneficiation of ores and minerals, volume 4. copper*. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency