

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis para proyecto de chimenea de ventilación
mediante equipo Alimak para una unidad minera en
Huancavelica**

Francesco Arancibia Agostinelli

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Arequipa, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Felipe Gutarra Meza
Decano de la Facultad de Ingeniería
Guido Mario Cuadros Ramírez
DE : Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 4 de Abril de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Análisis para proyecto de chimenea de ventilación mediante equipo Alimak para una unidad minera en Huancavelica

Autores:

1. Francesco Arancibia Agostinelli – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 19 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI ☒ NO ☐
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N° de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): SI ☐ NO ☒
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI ☐ NO ☒

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ASESOR

Ing. Guido Mario Cuadros Ramírez

AGRADECIMIENTOS

A cada uno de mis tutores de la filial de Arequipa y Huancayo, que compartieron de forma muy generosa sus conocimientos y aprendizajes hacia mi persona para poder mejorar mis herramientas y habilidades en el proceso de mi carrera profesional.

Al Ing. Guido Mario Cuadros Ramírez, por su apoyo, disponibilidad, asesoría y orientación durante la investigación de mi tesis.

A todas las personas que se tomaron el tiempo para ayudarme en mi trabajo de tesis, que han sido muy importantes para la adquisición de mis conocimientos.

A mi familia, principalmente a mi esposa, hermano y mamá.

DEDICATORIA

A mi esposa Carolina e hija Micaela, por su amor infinito y comprensión en esta etapa, siempre estuvieron en mis pensamientos y corazón.

A mi padre Luis Alberto, por ser mi ángel de la guarda y ejemplo de vida.

A mi madre Jeanette, por su cariño y apoyo en todo momento en las buenas y malas.

A mi hermano Luis, por enseñarme que sí se puede y que cuando uno persiste siempre logra sus objetivos.

ÍNDICE

ASESOR	i
AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.1.1 Problema general	3
1.1.2 Problemas específicos.....	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Justificación e importancia	4
1.4 Delimitación del proyecto.....	5
1.4.1 Delimitación temporal.....	5
1.4.2 Delimitación espacial.....	5
1.5 Hipótesis	6
1.5.1 Hipótesis general.....	6
1.5.2 Hipótesis específicas	6
1.6 Variables	6
1.6.1 Descripción de variables	6
1.6.2 Operacionalización de variables	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes de la investigación	8
2.1.1 Antecedentes internacionales	8
2.1.2 Antecedentes nacionales	9
2.2 Bases teóricas.....	12

2.2.1	Objetivo de construcción de chimeneas.....	12
2.2.2	Tipos de chimeneas.....	13
2.2.3	Métodos de construcción de chimeneas.....	13
2.2.4	Alturas máximas de construcción de chimeneas.....	13
2.2.5	Método convencional de construcción.....	14
2.2.6	Método mecanizado con jaula trepadora Alimak.....	14
2.2.7	Alcances sobre el diseño de chimeneas mecanizadas con equipo Alimak.....	16
2.2.8	Ventilación subterránea.....	17
2.2.9	Condiciones del aire en mina.....	18
2.2.10	Atmósfera de mina.....	19
2.3	Definición de términos básicos.....	26
2.3.1	Ventilación subterránea.....	26
2.3.2	Ventilación principal.....	26
2.3.3	Ventilación secundaria.....	26
2.3.4	Ventilación auxiliar.....	26
2.3.5	Requerimiento de aire.....	27
2.3.6	Caudal de aire.....	27
2.3.7	Equipo Alimak.....	27
2.3.8	Perforación.....	28
2.3.9	Voladura.....	28
2.3.10	Sostenimiento.....	29
CAPÍTULO III.....		30
METODOLOGÍA.....		30
3.1	Método y alcance de la investigación.....	30
3.1.1	Método general y método específico.....	30
3.1.2	Alcance de la investigación.....	30
3.2	Diseño metodológico de la investigación.....	30
3.3	Población y muestra.....	31
3.3.1	Población.....	31
3.3.2	Muestra.....	31
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	31
3.4.1	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	31
3.4.2	Instrumentos de recolección de datos.....	31
3.5	Instrumentos de análisis de datos.....	32
CAPÍTULO IV.....		33
DIAGNÓSTICO, ANÁLISIS Y RESULTADOS.....		33
4.1	Breve descripción de la empresa y sus procesos.....	33

4.2	Diagnóstico de la situación actual.....	33
4.3	Resultados del tratamiento y análisis de la información (tablas y figuras).....	35
4.3.1	Proyecto de construcción de chimenea RC N°3	35
4.3.2	Procedimientos de trabajo con el equipo Alimak STH-5E en la construcción de la chimenea RC N°3.....	35
4.3.3	Rendimientos de perforación y voladura	47
4.3.4	Análisis de costos unitarios.....	48
4.3.5	Evaluación del sistema de ventilación actual.....	51
4.3.6	Simulación del sistema de ventilación	56
4.3.7	Valorización de la producción con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3	69
4.3.8	Tiempo de construcción del proyecto de la chimenea Raise Climber N°3	71
4.4	Prueba de hipótesis	74
4.4.1	Hipótesis general.....	74
4.4.2	Hipótesis específicas	75
4.5	Discusión de resultados.....	78
CAPÍTULO V		80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		80
5.1	Conclusiones.....	80
5.2	Recomendaciones	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		82
ANEXOS		86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variables	7
Tabla 2.	Características de trabajo del equipo Alimak STH-5E.	16
Tabla 3.	Composición del aire seco.	20
Tabla 4.	Gases presentes en la minería.	21
Tabla 5.	Factor de producción de acuerdo con el consumo de madera.	24
Tabla 6.	Velocidad mínima.	25
Tabla 7.	Mediciones de ingreso y salida de aire.	33
Tabla 8.	Parámetros del circuito de ventilación actual.	34
Tabla 9.	Resumen de potencia del circuito de ventilación.	34
Tabla 10.	Mapeo geomecánico.	42
Tabla 11.	Parámetros de construcción para el diseño de chimenea.	43
Tabla 12.	Parámetros de perforación.	43
Tabla 13.	Parámetros de voladura.	44
Tabla 14.	Distribución de carga explosiva por taladros.	46
Tabla 15.	Rendimientos de perforación.	47
Tabla 16.	Rendimientos de voladura.	47
Tabla 17.	Costos operacionales en traslado del equipo Alimak STH-5E a interior mina.	48
Tabla 18.	Costos operacionales en montaje de equipo Alimak STH-5E a interior mina.	48
Tabla 19.	Costos operacionales en el desmontaje del equipo Alimak STH-5E.	49
Tabla 20.	Costos unitarios chimenea método convencional Jack leg.	50
Tabla 21.	Descripción de los parámetros de ventilación en la mina caso de estudio.	51
Tabla 22.	Cálculo de requerimiento de aire por personal.	51
Tabla 23.	Cálculo de requerimiento de aire por consumo de madera.	52
Tabla 24.	Cálculo de requerimiento de aire por temperatura.	52
Tabla 25.	Cálculo de requerimiento de aire por equipos con motor petrolero.	53
Tabla 26.	Cálculo de requerimiento de aire por fugas.	53
Tabla 27.	Cálculo de requerimiento de aire total.	54
Tabla 28.	Ubicación de las estaciones de monitoreo de entrada y salida de aire.	54
Tabla 29.	Balance de aire en mina.	55
Tabla 30.	Descripción de estaciones secundarias.	56
Tabla 31.	Correlación de modelo Ventsim.	57
Tabla 32.	Resultados de simulación de modelo Ventsim situación actual.	58
Tabla 33.	Resumen de resultados circuito de ventilación actual.	61

Tabla 34.	Parámetros de ventilación y calor en el sistema de ventilación con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3.....	62
Tabla 35.	Resumen de resultados circuito de ventilación considerando CH RC3.....	66
Tabla 36.	Estudio de cobertura de aire en niveles de producción.	67
Tabla 37.	Estudio de cobertura de aire en tajeos de explotación y avance.	68
Tabla 38.	Valorización de la producción en la situación actual de la mina.	69
Tabla 39.	Valorización de la producción con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3.	70
Tabla 40.	Resumen de valorización de producción de personal en ambas situaciones de estudio	70
Tabla 41.	Determinación del número de días de excavación de la CH RC3.	71
Tabla 42.	Descripción de los plazos de construcción de la CH RC3 por etapas.....	72
Tabla 43.	Resumen del circuito de ventilación actual.....	74
Tabla 44.	Resumen del circuito de ventilación con la CH-RC3.	75
Tabla 45.	Cobertura de aire en los niveles de producción.	76
Tabla 46.	Cobertura de aire en los tajeos de explotación y labores de avance.	76
Tabla 47.	Valorización de producción inicial.	77
Tabla 48.	Valorización de la producción posterior a la construcción de la CH-RC3.	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Componentes de la jaula trepadora Alimak STH-5E.....	15
Figura 2.	Caudal inducido por presión natural.....	17
Figura 3.	Ciclo de perforación con equipo Alimak.....	29
Figura 4.	Montaje de equipo Alimak STH-5E.....	36
Figura 5.	Perforación con equipo Alimak STH-5E.....	37
Figura 6.	Voladura con equipo Alimak ATH-5E.....	38
Figura 7.	Ventilación con equipo Alimak STH-5E.....	39
Figura 8.	Desatado con equipo Alimak STH-5E.....	40
Figura 9.	Representación de la recuperación de carriles del sistema Alimak.....	41
Figura 10.	Desmontaje final del equipo Alimak STH-5E.....	41
Figura 11.	Diseño de la malla de perforación y voladura de la chimenea RC N°3.....	45
Figura 12.	Representación balance de aire mina.....	55
Figura 13.	Input de datos de entrada en software de simulación.....	57
Figura 14.	Resultados simulación ventilación situación actual.....	58
Figura 15.	Resultados simulación calor situación actual.....	59
Figura 16.	Resultados simulación contaminantes situación actual.....	59
Figura 17.	Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-1 situación actual.....	60
Figura 18.	Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-2 situación actual.....	60
Figura 19.	Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-3 situación actual.....	61
Figura 20.	Sistema de ventilación con construcción de la chimenea Raise Climber N°3. 62	
Figura 21.	Resultados simulación ventilación situación luego de la chimenea RC3.	63
Figura 22.	Resultados simulación calor situación actual luego de la chimenea RC3.....	63
Figura 23.	Concentración en partes por millón.....	64
Figura 24.	Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-1 situación luego de la chimenea RC3.....	64
Figura 25.	Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-2 situación luego de la chimenea RC3.....	65
Figura 26.	Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-2 situación luego de la chimenea RC3.....	65
Figura 27.	Relación de cobertura de aire por niveles.....	67
Figura 28.	Relación de coberturas de aire por labor, elaboración propia.....	68

Figura 29.	Representación de la comparación de la valorización en ambas situaciones de estudio EM-3.	71
Figura 30.	Primera parte del diagrama Gantt en el desarrollo del proyecto de construcción de la CH RC3.	73
Figura 31.	Primera parte del diagrama Gantt en el desarrollo del proyecto de construcción de la CH RC3.	73
Figura 32.	Producción (TM/HH) para cada situación de estudio.	74

RESUMEN

En la minería subterránea, la acumulación de gases nocivos como nitroso y metano, junto con la generación de polvo por actividades como el traslado de equipos y voladuras, eleva la temperatura en los ambientes de trabajo, superando los límites permitidos por las normativas nacionales. Este estudio evalúa la viabilidad de implementar chimeneas Raise Climber con equipos Alimak en una unidad minera de Huancavelica, para mejorar la ventilación, reducir temperaturas y aumentar la seguridad y productividad. El objetivo es analizar los beneficios de este sistema en términos de productividad, seguridad, costos y tiempo de dispersión de gases de voladura. La metodología incluyó un análisis técnico-económico del proyecto, calculando el costo por metro de avance y el impacto en la ventilación y productividad del personal. Los resultados muestran que la construcción de la chimenea con equipo Alimak es viable, con un costo unitario de \$1,141.14 por metro lineal y una reducción del tiempo de dispersión de gases de voladura de 90 a 60 minutos. Además, el sistema mejoró el caudal de aire y redujo las temperaturas, aumentando la productividad en un 15% en extracción de tajos y un 21% en labores de desarrollo. En conclusión, la implementación del equipo Alimak en chimeneas mejora significativamente las condiciones laborales, la seguridad y la eficiencia operativa, justificando la inversión por sus beneficios en productividad y salud de los trabajadores.

Palabras claves: chimenea de ventilación, producción, costo, sistema de ventilación, cobertura de aire.

ABSTRACT

In underground mining, the accumulation of noxious gases such as nitrous and methane, together with the generation of dust from activities such as moving equipment and blasting, raises the temperature in working environments, exceeding the limits allowed by national regulations. This study evaluates the feasibility of implementing Raise Climber chimneys with Alimak equipment in a mining unit in Huancavelica to improve ventilation, reduce temperatures and increase safety and productivity. The objective is to analyse the benefits of this system in terms of productivity, safety, costs and blasting gas dispersion time. The methodology included a technical-economic analysis of the project, calculating the cost per metre of advance and the impact on ventilation and personnel productivity. The results show that the construction of the chimney with Alimak equipment is viable, with a unit cost of \$1,141.14 per linear metre and a reduction in blast gas dispersion time from 90 to 60 minutes. In addition, the system improved airflow and reduced temperatures, increasing productivity by 15% in pit extraction and 21% in development work. In conclusion, the implementation of Alimak equipment in chimneys significantly improves working conditions, safety and operational efficiency, justifying the investment for its benefits in productivity and health of workers.

Keywords: ventilation chimney, production, cost, ventilation system, air coverage.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación estudia la viabilidad técnico y económica del proyecto de construcción de una chimenea Raise Climber ejecutada con la jaula trepadora Alimak STH-5E, en una unidad minera en la región de Huancavelica; a fin de mejorar la producción de los colaboradores en los frentes de avances y tajeos de explotación a partir de la optimización de las condiciones de ventilación y ambiente por la construcción de dicha labor, simulado a partir del software especializado en ventilación Ventsim Design 5.4.

La implementación de chimeneas Raise Climber utilizando equipos Alimak, tiene como objetivo facilitar la eliminación de aire viciado en las áreas de trabajo mineras. Esto resultará en la disminución de las elevadas temperaturas, las cuales a menudo superan los 30°C en los entornos de trabajo, en las labores minera de la unidad minera de estudio. En consecuencia, se espera que la productividad de los trabajadores mejore, ya que los períodos de descanso requeridos debido al estrés térmico experimentado en las condiciones actuales se reducirán. Por otro lado, la optimización del sistema de extracción de aire viciado mediante la construcción de chimeneas de ventilación Alimak contribuirá a la disminución de la concentración de gases peligrosos y partículas generadas por las actividades de perforación y voladura, las cuales representan un riesgo significativo para la salud de los empleados. Además de ello, se espera que se reduzca el tiempo de espera por ventilación en áreas sin acceso directo al flujo de aire fresco y en las labores de explotación minera en general.

Para el desarrollo de la investigación se aplicó la técnica de investigación proyectiva, lo que permitió analizar la situación para dar una mejor solución posible al problema, además de optar por un tipo de investigación básica, usando información ya existente en relación con las variables de estudio presentadas.

La estructura de la investigación está conformada por cinco capítulos, de los cuales en el capítulo I se describe el planteamiento y formulación del problema de investigación, se define los objetivos del estudio, se desarrolla la justificación e importancia del trabajo, se delimita el proyecto, se elabora la hipótesis de investigación, y se identifican las variables e indicadores de estudio; en el capítulo II, se presentan los antecedentes de la investigación, y se desarrollan las bases teóricas que fundamentan el estudio desarrollado; en el capítulo III se describe la metodología de investigación utilizado en el desarrollo del estudio; en el capítulo IV se presentan los resultados de la investigación y la discusión sobre los mismos; finalmente en el capítulo V se desarrollan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó en la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del problema

En las operaciones mineras subterráneas, la ventilación adecuada es un elemento crucial para garantizar la seguridad y la productividad. La acumulación de gases nocivos como CO₂, metano y gases nitrosos, junto con el polvo generado durante las actividades de perforación y voladura, representa un riesgo constante para los trabajadores, pudiendo ocasionar accidentes graves, incluyendo muertes por gaseamiento (35). Además, según Herbert (32) las altas temperaturas, que en algunos casos superan los 30 °C, ralentizan la productividad y afectan la salud del personal.

En las operaciones mineras subterráneas, la ventilación adecuada es un elemento crucial para garantizar la seguridad y la productividad. Los datos del análisis de accidentes mortales entre 2012 y 2016 revelan que factores como intoxicación y asfixia representan un riesgo significativo, con 13 muertes registradas en este periodo. Las estadísticas muestran que los trabajadores más vulnerables son aquellos con menor experiencia, ya que el 57% de los accidentes mortales involucran personal con menos de 2 años de servicio (34). Específicamente, en los grupos ocupacionales de ayudantes, perforistas y operadores de equipos, se concentra el mayor número de fatalidades, lo que subraya la importancia de sistemas de ventilación eficientes y capacitación exhaustiva en seguridad minera. Los accidentes por intoxicación, energía eléctrica y caídas de personas evidencian la necesidad de implementar soluciones integrales que mejoren las condiciones de trabajo en espacios subterráneos.

Para contrarrestar estas condiciones adversas, las unidades mineras cuentan con sistemas de ventilación diseñados para introducir oxígeno fresco desde la superficie mediante ventiladores y extraer los gases tóxicos a través de mangas hasta las áreas profundas. Sin embargo, la efectividad de estos sistemas depende en gran medida de la presencia de chimeneas estratégicamente ubicadas, que permitan la ventilación adecuada y la extracción del aire contaminado. Las chimeneas convencionales presentan limitaciones en cuanto a longitud y capacidad, reduciendo su funcionalidad en operaciones mineras de mayor escala.

En este contexto, el uso de plataformas trepadoras Alimak para la construcción de chimeneas subterráneas se perfila como una solución tecnológica eficiente y segura. Según Yucás (29), esta tecnología, aunque económica y adaptable, requiere personal altamente capacitado para su operación, lo que incrementa los costos operativos. Asimismo, en terrenos geológicamente

inestables, pueden surgir dificultades durante la instalación y el desmantelamiento, extendiendo los tiempos de ejecución del proyecto. No obstante, Rogel (30) subraya que las plataformas Alimak, al ser desmontables y reutilizables, representan una inversión estratégica que trasciende el ámbito de un solo proyecto, ofreciendo un valor significativo a largo plazo.

A nivel nacional, Aguilar (31) señala que la implementación de plataformas Alimak mejora aspectos clave como los avances por disparo, los costos de construcción, el tiempo de ejecución, el sostenimiento geomecánico y las estadísticas de seguridad. Sin embargo, para maximizar estos beneficios en la unidad minera de Huancavelica, es necesario analizar factores específicos como la longitud y el área de excavación de la chimenea, el diseño de la cámara de estación y la proximidad de los sumideros, tal como menciona López (33). Estos factores son esenciales para garantizar un armado y ajuste adecuado de la plataforma Alimak, especialmente frente a las complejas condiciones geológicas de la región.

La implementación de chimeneas construidas mediante el equipo Alimak en la unidad minera de Huancavelica no solo facilitará la conexión eficiente de los niveles subterráneos, sino que también optimizará el transporte de personal y materiales a zonas elevadas, permitiendo realizar labores de perforación y voladura con mayor seguridad. Además, el sistema reducirá riesgos geomecánicos asociados al desprendimiento de rocas y otros problemas relacionados con el terreno. Pese a las ventajas indicadas, es fundamental analizar las problemáticas asociadas al uso de esta tecnología, considerando tanto los retos operativos como los costos, para garantizar una ejecución eficiente y sostenible del proyecto.

1.1.1 Problema general

¿Cómo influye el uso del equipo Alimak en el proyecto de construcción de chimeneas de ventilación en una unidad minera de Huancavelica?

1.1.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son los beneficios en términos de productividad y aumento del caudal de aire que genera la implementación del equipo Alimak en la construcción de chimeneas de ventilación en una unidad minera de Huancavelica?
- b) ¿Qué costo unitario por metro de avance se obtiene al utilizar el equipo Alimak en la construcción de chimeneas en una unidad minera de Huancavelica?
- c) ¿Qué impacto tiene la construcción de chimeneas con el equipo Alimak en la reducción del tiempo necesario para dispersar los gases de voladura en una unidad minera de Huancavelica?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la influencia del uso del equipo Alimak en el proyecto de construcción de chimeneas de ventilación en una unidad minera de Huancavelica, considerando su impacto en la eficiencia del sistema de ventilación y la productividad de las operaciones subterráneas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar los beneficios en términos de productividad y aumento del caudal de aire asociados a la implementación del equipo Alimak en la construcción de chimeneas de ventilación en una unidad minera de Huancavelica.
- Evaluar el costo unitario por metro de avance en la construcción de chimeneas utilizando el equipo Alimak en una unidad minera de Huancavelica.
- Determinar el tiempo requerido para dispersar los gases de voladura mediante la construcción de chimeneas con el equipo Alimak en una unidad minera de Huancavelica.

1.3 Justificación e importancia

La presente investigación tiene como propósito evaluar la efectividad del uso de equipos Alimak en la construcción de chimeneas Raise Climber en una unidad minera de Huancavelica, proponiendo una solución eficiente y segura para proyectos de ventilación en operaciones subterráneas. La construcción de chimeneas mediante el uso de equipos Alimak permite optimizar el sistema de ventilación, favoreciendo la extracción de aire viciado de las labores subterráneas y reduciendo significativamente las altas temperaturas que superan los 30°C. Este control térmico contribuye directamente a mitigar el estrés térmico en los trabajadores, aumentando su productividad y reduciendo los tiempos de descanso.

Además, la implementación del equipo Alimak mejora la eficiencia en la dispersión de gases nocivos, como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado, que son subproductos de las operaciones de perforación y voladura. La reducción de estas concentraciones minimiza los riesgos ocupacionales para la salud de los colaboradores y mejora las condiciones de trabajo en los frentes de avance y las labores ciegas.

Desde el punto de vista operativo, el equipo Alimak incrementa la seguridad en la construcción de chimeneas al reducir los riesgos asociados a trabajos verticales, como el desprendimiento de

rocas. La tecnología de este equipo permite controles más estrictos y operaciones más seguras en comparación con métodos tradicionales.

La viabilidad económica de la construcción de chimeneas con el equipo Alimak también se analiza en esta investigación, evidenciando que el costo proporcional de inversión se justifica por los beneficios obtenidos: mayor productividad, mejores condiciones de ventilación, reducción de tiempos de espera y un ambiente laboral más seguro.

En conclusión, este estudio es relevante porque aborda un problema crítico en las operaciones mineras subterráneas, como lo es la ventilación, y propone una alternativa tecnológica que optimiza tanto los procesos como las condiciones de trabajo, contribuyendo al desarrollo sostenible y eficiente de las operaciones mineras.

1.4 Delimitación del proyecto

Las limitaciones para la investigación han sido aspectos temporales que vienen a ser datos que se pudieron recolectar durante un periodo de tiempo. Características propias de la unidad minera y su requerimiento de caudal de acuerdo con la profundidad donde se realizan las labores; además, los equipos y personal presentes, ya que en base a estos es que se requiere determinado flujo de aire.

1.4.1 Delimitación temporal

La delimitación temporal de la presente investigación, correspondiente al desarrollo y construcción de la chimenea Raise Climber que se realizará en un periodo 5 meses, iniciando en el mes de noviembre 2023; considerando tiempos adicionales en la movilización y montaje de la indumentaria Alimak para adecuarse al plan de minado de este periodo.

1.4.2 Delimitación espacial

La delimitación espacial de la presente investigación será la chimenea Raise Climber N°3, que conectará los niveles 440 y 490 a una unidad minera en Huancavelica.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

La implementación del equipo Alimak en el proyecto de construcción de chimeneas de ventilación en una unidad minera de Huancavelica mejorará significativamente la eficiencia del sistema de ventilación, la productividad operativa y las condiciones de trabajo subterráneas.

1.5.2 Hipótesis específicas

- La construcción de chimeneas con el equipo Alimak optimizará el sistema de ventilación en la unidad minera de Huancavelica al incrementar la productividad y el caudal de aire.
- El costo unitario por metro de avance asociado con el equipo Alimak será más competitivo frente a los métodos convencionales, justificando la inversión mediante beneficios en seguridad, tiempo y productividad.
- El uso del equipo Alimak permitirá dispersar los gases de voladura de manera más rápida, reduciendo significativamente los tiempos de espera y mejorando las condiciones de seguridad en la unidad minera.

1.6 Variables

- a) Variable independiente: proyecto de chimenea de ventilación con equipo Alimak
- b) Variable dependiente: optimización de las operaciones por la construcción de chimeneas.

1.6.1 Descripción de variables

- Proyecto de chimenea de ventilación con equipo Alimak: define el desarrollo chimenea Raise Climber respecto a los costos operativos, tiempo de construcción y el rendimiento de avance.
- Optimización de las operaciones por la construcción de chimeneas: tiene un enfoque respecto a la mejora en las condiciones de las labores de la unidad minera en Huancavelica como: caudal de aire (CFM), eficiencia, presión de ventilación y la temperatura de bulbo seco.

1.6.2 Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Tipo de variable	Nombre de variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Intrumento
Independiente	Proyecto chimenea ventilación equipo Alimak de de con	Consiste en la construcción de un ducto vertical, inclinado o ascendente, de sección circular o rectangular, que conecta dos labores en niveles distintos o con la superficie. Incluye el uso del equipo Alimak para facilitar el avance y optimizar el proceso constructivo (1).	Construcción de chimenea con equipo Alimak	Tiempo total de construcción (meses)	Cronograma de construcción, MS Project
				Rendimiento de avance (m/día)	Reportes operativos, hojas de cálculo (Excel)
			Costos operativos	Costos operativos(S/.)	Reportes financieros, hojas de cálculo (Excel)
				Costos unitarios(Soles/m.)	Reportes financieros, hojas de cálculo (Excel)
Dependiente	Optimización de las operaciones por la construcción de chimeneas de	Se refiere a los beneficios operativos percibidos tras la construcción de chimeneas, manifestados en la mejora de la ventilación, reducción de riesgos, aumento de rendimientos y menor tiempo en actividades críticas(2).	Condiciones de ventilación	Caudal de aire requerido(CFM)	Simulaciones y monitoreo (Ventsim, sensores de flujo)
				Eficiencia del sistema de ventilación (%)	Reportes técnicos, software Ventsim
				Presión estática del aire (inH ₂ O)	Sensores de presión, reportes operativos
				Temperatura bulbo seco (°C)	Sensores de temperatura, reportes ambientales
			Condiciones ambientales	Temperatura bulbo húmedo (°C)	Sensores de temperatura, reportes ambientales
				Tiempo de dispersión de gases nocivos (min)	Reportes de monitoreo ambiental, simulaciones Ventsim

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Rincón y Forero (9) en proyecto de investigación “Análisis comparativo de las tecnologías modernas en los sistemas de ventilación en túneles para proyectos de infraestructura vial a nivel nacional e internacional”, tuvo como objetivo poner a prueba y dar a conocer las nuevas tecnologías en ventilación interna para los túneles, revisando materiales científicos y documentos relacionados a la infraestructura y arquitectura de las zonas aledañas. Lograron concluir que a la ciudad de Colombia le falta la implementación de nuevas tecnologías dentro de los túneles, para poder mejorar la ventilación de algunos centros de trabajo, así como el correspondiente mantenimiento de los mismos.

Burbano y Flores (10) en su investigación “Propuesta de estabilidad de la chimenea El Quinde de la concesión minera Selva Alegre”, tuvo como objetivo de proponer nuevas formas para la estabilidad de la chimenea “El Quinde”, proponiendo diferentes alternativas. Se recopilaron datos geomecánicos del mármol y material volcánico, así como información proporcionada por la empresa. La estabilidad de la chimenea es deficiente debido a las numerosas discontinuidades y parámetros geométricos. Se recomendó construir una nueva chimenea con un sostenimiento mínimo y aplicar el método GIN para consolidar e impermeabilizar. La calidad del macizo rocoso se clasifica como regular y se identifican áreas de calidad mala. El análisis cinemático muestra un factor de seguridad mínimo y posible colapso inminente de la chimenea. Los esfuerzos y la inestabilidad se deben a las características del contacto entre el mármol y el material volcánico. Las condiciones geológicas locales determinan la profundidad y ubicación de los pozos de inyección. La continuidad de las discontinuidades será crucial para la dosificación de la lechada, y la ubicación de los pozos estará limitada por la chimenea y la extracción de mineral.

Zaldumbide y Villalba (11) en su investigación “Diseño del circuito de ventilación de la Mina Bonanza, operada por la empresa Exportadora Aurífera S.A, EXPAUSA, ubicada en el Distrito Minero Ponce Enríquez”, tuvo como objetivo el diseño de un circuito de ventilación en la Mina Bonanza, encontrándose ubicada a 710 y 580 msnm, teniendo 10 km para las tareas mineras y un sistema de ventilación sin terminar. Al finalizar el trabajo se pudo comprobar que la temperatura promedio es de 24,9°C y el nivel de oxígeno es de 20,2%, permitiendo que los

trabajos se realicen sin ningún problema; asimismo, se encontró que las dimensiones para las tareas mineras de ventilación no propician una adecuada circulación del aire, teniendo que aumentar el diámetro, por último el sistema presentado puede disminuir la resistencia de la mina, aumentando el área de labores e instalar una correcta ventilación con el cual se cumple el requerimiento de aire, para las labores.

Finalmente, Medina (12) realizó el trabajo de investigación que llevó el nombre de “Estudio comparativo técnico-económico de diseño de chimenea, caso chimenea Mina Pajonales (Manual-Alimak-Raise Boring)”, en donde se realizaron estudios técnicos con el objetivo de identificar metodologías de elementos diferenciadores, así como la obtención de experiencias tanto nacional como internacional acerca de la construcción de chimeneas. Seguidamente se efectuó un análisis de riesgos y, por último, una evolución que permitió evidenciar la metodología más viable económicamente. Se logró obtener que, siguiendo los métodos de perforación por Raise Boring y Alimak, se obtuvieron factibilidades técnicas aceptables descartando de este modo la metodología convencional. En cuanto al tiempo de construcción, utilizando la metodología Alimak presenta 17 días, mientras que la Raise Boring tan solo 8 días. En cuestión de costos, Alimak presenta un promedio por metro de 2.279.00 dólares mientras que RB presenta un costo superior de 2.570 dólares.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Aguirre y Mallqui (1) en su investigación "Influencia en la construcción de la chimenea 081 con Alimak para el mejoramiento del sistema de ventilación de las labores del nivel 4230 compañía minera Kolpa S.A. - Huachocolpa Huancavelica 2018", tuvo como objetivo, determinar si en la fabricación de una chimenea 081 con materiales de Alimak mejora en el caso de un método por el cual mejore la circulación del aire para los trabajos en el nivel cuatro mil doscientos treinta. Contó con una investigación de tipo aplicada, empleando un método en el cual no tenga un diseño de tipo experimental y el sistema científico (descriptivo-correlacional), dentro del nivel descriptivo explicativo. Los resultados evidenciaron una correlación positiva media entre los costos en el caso de la operación singular, el sistema de circulación de aire y el índice de seguridad. En conclusión, la chimenea que se quiere realizar su estructura con Alimak mejora significativamente la circulación del aire y otros gases, aumentando la cobertura y reduciendo la cantidad de ventiladores utilizados. Los costos de construcción son óptimos, reflejando ahorros mensuales significativos. El proyecto tiene un costo total de US \$ 901,468.17 y se ejecuta en 6 meses.

Ollachica y Ollachica (2) en su investigación “Optimización en la construcción de chimenea en la veta animas mediante el método de perforación Raise Boring en la minera Bateas SAC,

Caylloma”, planeó construir una chimenea de ventilación en la zona Animas, con una longitud de 160 m y diámetro de 2.10 m. Sin embargo, la presencia de un terreno el cual estaría ocupando la dimensión 33.3 m plantea desafíos en la construcción. Para abordar la problemática presente, el autor propuso darle estabilidad al terreno mediante taladros de sostenimiento y darle a la estructura un suministro de cemento lechoso. Posteriormente, se utilizó el sistema de Raise Boring para la perforación y para la fabricación de la estructura de la chimenea. El enfoque permitió completar la chimenea en 107 días, con un costo de \$887,554.80, sin incidentes ni problemas sociales. Los registros geomecánicos fueron importantes para tomar decisiones durante la perforación, y se logró optimizar la construcción al evitar el movimiento de tierra y minimizar los impactos sociales y ambientales.

Aburto (3) en su investigación “Eficiencia del equipo Alimak STH-5E en los costos de construcción de chimeneas en la empresa minera Sierra Antapite S.A.C - 2019”, tuvo como idea principal ver una mejora significativa mejorando su eficiencia, determinándola, en el caso de la indumentaria Alimak STH-5E, la cual está causando un aumento en el costo de las fabricaciones de las chimeneas, en la empresa mencionada en el documento. Se utilizó una metodología de investigación la cual se está aplicando, tiene una idea de diseño preexperimental y teniendo un grado aplicativo, por lo que la muestra en el caso de toda la estructura construida de las chimeneas realizadas por el año 2019. Se podría decir que en el implemento en la instrumentaría Alimak se pudo ver que ha reducido los tiempos operativos y aumentar el avance diario; lo que se traduce en una mayor eficiencia en el costo por metro lineal de avance. Además, el equipo Alimak ofrece seguridad, versatilidad y costos; los cuales, si se compara con otros tipos construcción de chimeneas este es más bajo. En general, su uso ha optimizado la construcción de chimeneas, evitando movimientos de tierra y minimizando problemas sociales y ambientales.

Ramírez y Rico (4), realizaron el trabajo de investigación titulado “Proyecto de diseño de chimeneas para mejorar la ventilación en la Unidad Minera Pallasca. En este estudio, se describieron los factores que afectaban negativamente al método por el cual se hace la circulación de aire o gases en las obras mineras. Además, se analizaron los costos de construcción de las chimeneas y se realizó un modelamiento utilizando el software de AutoCAD. Entre los factores que influían directamente en una ventilación deficiente, se identificaron la alta altitud, que alcanzaba los 3600 m.s.n.m., y la presencia de polución y gases. Para superar esta problemática, era necesario suministrar 5 m³/min de aire. En cuanto a los costos, se tuvieron en cuenta los precios de equipos, que variaron entre 20.00 y 1200.00 dólares, como también se da en el gasto que se realiza con la mano de obra y transporte, estimado en 910.00 dólares. También se consideraron los gastos asociados con la madera y el sostenimiento,

la perforación y el volumen, alcanzando un total de 75.00 dólares por jornada. Para llevar a cabo el modelamiento en AutoCAD, se tomaron en cuenta aspectos como la longitud de la chimenea y sus discontinuidades, lo que permitió obtener una visualización detallada de la estructura y calcular el volumen del material de manera eficiente.

Navarro (5), en su trabajo “Aplicación del sistema Raise Climber ascendente para optimizar el avance de construcción de chimeneas en U. M. Orcopampa-Buenaventura 2020”, llevó a cabo una optimización que puede ser en la fabricación de las chimeneas Unidad Minera Orcopampa-Buenaventura, empleando el método utilizado de Raise Climber ascendente. Su investigación incluyó una planificación detallada en el caso de una mejora en la velocidad de construcción de las estructuras de ventilación, definiendo parámetros de construcción de línea base y proponiendo el uso Raise Climber como un mejor método. Navarro evaluó los beneficios de esta mejora y comparó los parámetros de construcción, como el tiempo y el avance, con el método convencional. Se demostró que el sistema Raise Climber logró una mejora del 51.87% en la eficacia de la construcción. Utilizando un método estadístico, se determinó que se ahorraron 1.68 de dimensión por guardia con el cual tuvo un valor de gasto 471.00 soles. El estudio demostró que el uso del método Raise Climber no solo aumenta la eficiencia del proceso de en la fabricación de la estructura, sino que también reduce los costos y los riesgos de accidentes.

Taipe (6), realizó el trabajo de investigación titulado “El Sistema de Ventilación Subterránea para cubrir los Requerimientos de aire en la Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C.”, el cual tuvo como objetivo la mejora del sistema de ventilación cubriendo la necesidad del aire, con proyección en del hoy hacia el mañana en el caso de la sociedad minera en mención. Para ello, realizó la determinación de los parámetros del aire actual y futuro, se determinó la presión óptima del aire y la resistencia de fluidez de este. Se consideró las entradas de aire en caudal obteniendo valores de 209 691 cfm cuando el requerido es de 206 251 cfm; por lo cual, este logra tener un porcentaje de cobertura 102%. Se realizó un modelo en simulación utilizando el software Ventsim Visual Advanced obteniendo valores de variación en cuanto a la densidad de flujo de 2,7%, en cuanto a la presión barométrica se obtuvo una variación del 1%, en cuanto al promedio de labores de ingreso de aire una variación del 9% y, por último, el promedio de labores de salida de aire con una variación del 3%. En cuanto al circuito de extracción se tiene que presentar una pérdida de 28,394 cfm; por ello, se menciona que dicho circuito presenta diversas posibilidades de recirculación.

Aguilar (7), realizó el trabajo de investigación titulado “Jaula trepadora alimak para mejorar la construcción de la chimenea Raise Climber 46 - NV.2870 - unidad minera San Andrés de

minera Aurífera Retamas S.A. Año 2021”. En su investigación, determinaron los procedimientos y se caracterizó el macizo rocoso para la elaboración de la chimenea. Los estándares de seguridad cumplían con los índices adecuados según el programa establecido. La caracterización del macizo rocoso según Bieniawski 89 fue la siguiente: Granodiorita RMR=39, Microdiorita RMR=41, Pórfido granítico=38. La implementación de la jaula trepadora Alimak optimizó las operaciones en la unidad minera, mejorando los costos, el tiempo de construcción y la eficiencia de sostenimiento, entre otros aspectos.

Díaz (8) realizó el trabajo de investigación titulado “Diseño de infraestructura para mejorar el circuito de ventilación de la veta rosa - zona norte en consorcio minero horizonte, Pataz 2018”. En ella, se detallaron las condiciones actuales dando a entender que es necesario un requerimiento del caudal de aire limpio de 263,249 cfm en lugar de la Veta Rosa específicamente en el distrito norte. Sin embargo, la velocidad actual que circula en el caso del aire a penas de 134,200 cfm, lo que deja el cual tiene una desventaja en el caso del caudal 126,473 cfm, representando una cobertura de aire del 52%. Para alcanzar una cobertura de aire del 100%, se ha propuesto llevar a cabo el llamado proyecto el cual se enfoca en la estructura de ventilación del lugar de la veta Rosa. Este proyecto incluye la construcción de la troncal 2, una Chimenea Alimak de 595 m en un rango de NV2650 a NV2140, destinada a la para la salida del aire el cual se vacía, además de la ya existente troncal 1. Con esto se propuso la instalación de ventilaciones para permitir la circulación de aire limpio en la parte superior de la veta, utilizando una Chimenea Alimak de 420 m en el rango de NV2500 a el punto NV2240. De esa forma, se implementó del trabajo, logrando un ingreso de aire fresco con un caudal de 29,822 cfm, el cual tendría un porcentaje de ingreso en el caso de aire de cobertura del 103%.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Objetivo de construcción de chimeneas

En las minas subterráneas, la construcción de chimeneas cumple un papel fundamental para garantizar una adecuada ventilación y funcionalidad de las operaciones mineras. Los principales objetivos de las chimeneas son:

- Delimitar los tajos destinados para la explotación minera.
- Funcionar como medio de ventilación dentro de las áreas de trabajo subterráneas.
- Actuar como pase de servicio, facilitando el transporte de agua, aire y otros materiales.
- Servir como vías de acceso y comunicación entre niveles (14).

2.2.2 Tipos de chimeneas

Existen varios tipos dentro de ellos se encuentran:

- Por su forma: rectangulares, circulares y cuadradas.
- Por la sección: simples de 4'x4', dobles de 4'x8' y triple de 4'x12'.
- Por su longitud: corta de 50 m, largas de 51 a 100 m y de gran longitud de > de 100m (14).

2.2.3 Métodos de construcción de chimeneas

Normalmente, el método la construcción de las chimeneas está estrechamente guiado al sistema de minado convencional, teniendo en consideración:

- Método convencional para la construcción: que se realiza por medio de ciertos puntales para el avance, ayudado por una superficie la cual es de madera y la maquinaria que es un equipo perforador STOPER.
- La mecanización se realiza mediante el método el cual sirve para la construcción: que deriva en la construcción por medio de una superficie trepadora y un instrumentaría de Raise Borer. (14)

2.2.4 Alturas máximas de construcción de chimeneas

Para determinar la altura tope permitida de una chimenea se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- a) Chimenea convencional: Según lo indicado en el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería (DS N° 055), precisa sobre las chimeneas comunes que tienen una altura que excede de 20m, deben tener incorporados dos compartimientos independientes, los cuales serán empleado por el personal que transita y también tendiendo una función de echadero. Se debe de tener en cuenta que las medidas superiores de 50m, en cuanto longitud, tienden a ser de mayor presupuesto y por lo general son de bajo rendimiento, teniendo que realizar mantenimientos constantes en el área de echadero. Debido a ello, cuando se desea implementar más de 50m se suele poner chimeneas mellizas, que son simples, pero están separadas con un aproximado de 10 a 15m, teniendo una comunicación cada 20m promedio de un compartimiento (14).

- b) Chimeneas mecanizadas: este tipo de chimeneas llega a alcanzar tamaños superiores a los 100m en cuanto a longitud, teniendo limitadas las longitudes debido al tipo de impulso que se utiliza por la maquinaria. En el caso de la estructura trepadora el cual es ayudada por un propulsor neumático = 200m. El soporte en T, el cual tiene un impulso de energía eléctrica = 1,000m, para más de 1,000m se emplea el impulso de propulsión Diesel -hidráulica (14).

2.2.5 Método convencional de construcción

El proceso de construcción de chimeneas se caracteriza por la colocación de puntales en la línea de avance, utilizando una máquina neumática STOPER, donde se implementan diversas tablas de soporte como base estructural. La longitud típica de una chimenea alcanza los 50 m, requiriendo estudios de seguridad específicos para extensiones mayores, con un sistema de aire comprimido que emplea mangueras de hasta 30 m con 1" de diámetro, y tuberías de 1" para distancias superiores. Adicionalmente, se procede al recubrimiento de tubos de agua y aire con maderas, protegiéndolos de posibles impactos de rocas generados durante las voladuras (14).

2.2.6 Método mecanizado con jaula trepadora Alimak

Descripción del equipo Alimak STH-5E

La maquinaria Alimak está caracterizada por ser un tipo de plataforma/jaula, que realiza la tarea de subir por medio de una cremallera que se encuentra empotrada contra la superficie del muro, que gracias a sus ventajas, como: económico, flexible y velocidad, es empleada en las excavaciones de chimeneas. Su uso puede ser por medio de sistemas hidráulicos, neumáticos o Diesel, por ello es empleada en la minería subterránea con más frecuencia (14).

El equipo Alimak STH-5E es una superficie hecha de acero, tiene la característica de ser trepadora, y por medio de la transmisión, la cual se da el desplazamiento de los carriles guías curvados y rectos, hace que el aire y el agua pasen a través de los servicios que son guiados por el carril puedan darle cualquier tamaño, como también su forma (14).

Consta con un sistema de seguridad que está compuesto por cinco (05) frenos de seguridad, el sistema de carril guía y los componentes estructurales de jaulas y plataformas, los cuales garantizarán la integridad del personal y los equipos durante las excavaciones, asegurando de esta manera la ejecución responsable, segura y de calidad de la obra encomendada (14).

En la figura siguiente (ver figura 01) se describen las partes de la jaula trepadora Alimak STH-5E, donde: “A” representa a los elementos que conforman el carril guía del equipo, “B” expone

a los implementos que conforman de forma básica la superficie trepadora (unidad propulsora, armazón, plataformas de trabajo, techo protector y jaula para obreros), “C” representa al tambor enrollador automático de manguera o cable, “D” a la central múltiple agua como también de aire “E” al sistema eléctrico como telefónico, “F” a la bomba de alta presión para suministro de agua, y “G” al sistema trepador de los servicios de emergencia (14).

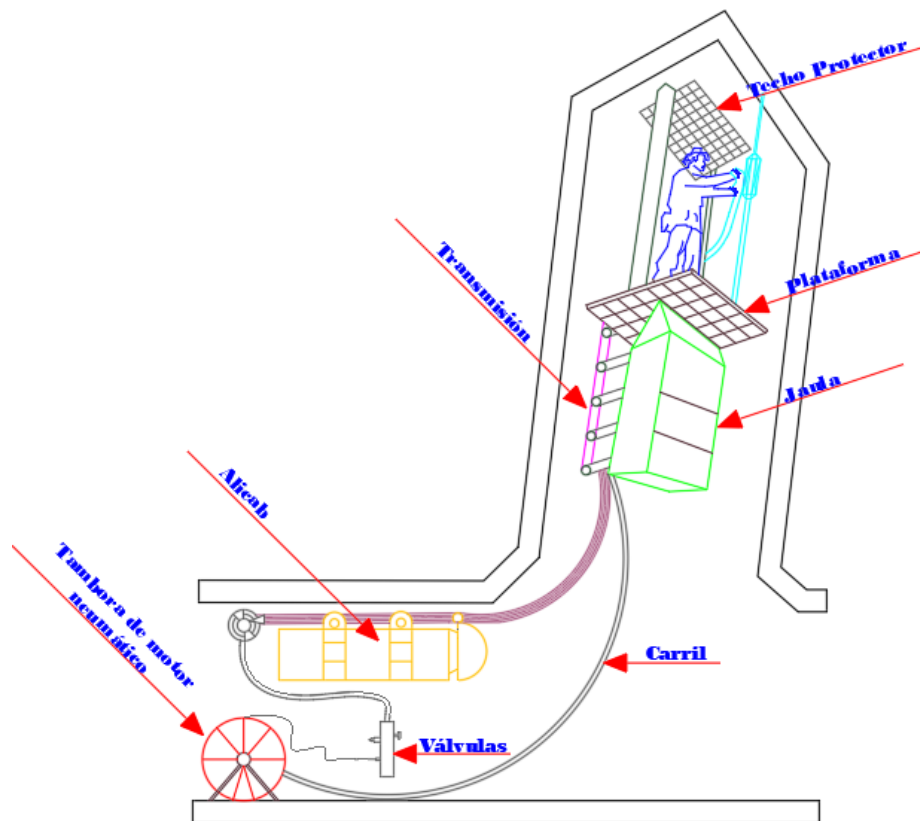


Figura 1. Componentes de la jaula trepadora Alimak STH-5E.

Información técnica de la jaula trepadora Alimak STH-5E

Es una máquina mecánico-eléctrica que se desplaza utilizando propulsión mediante energía eléctrica de 440V. Funciona a través de un sistema de piñones y cremalleras, instalado en carriles fijados a la estructura del techo de la chimenea 14.

El modelo STH-5E, utilizado en este caso, se caracteriza por contar con un único propulsor, cuyo motor eléctrico permite el ascenso del equipo. Cuando el motor se apaga, el descenso se realiza aprovechando la fuerza de la gravedad.

A continuación, se detallan las características más comunes de operación del equipo Alimak en la construcción de chimeneas para minería subterránea (ver tabla 01).

Tabla 2. Características de trabajo del equipo Alimak STH-5E.

Nº	Características	Valores
1	Área aproximada de chimenea vertical	7m ²
2	Área máxima aproximada de chimenea inclinada a 45°	10m ²
3	Altura máxima de excavación	400m
4	Longitud máxima de excavación	900m
5	Velocidad ascendente a 50 ciclos	0.3m/s(18m/min)
6	Velocidad ascendente a 60 ciclos	0.36m/s(21,6m/min)
7	Velocidad de descenso por gravedad	0.4-0.5m/s(25-30m/min)
8	Capacidad del motor	7.5KW
9	Cable eléctrico especial	3x10+3x1.5+2

Nota: Manual de Jaula Trepadora Alimak. Tomado de Alarcón, sf.

2.2.7 Alcances sobre el diseño de chimeneas mecanizadas con equipo Alimak

Diseño de chimenea

Se deben de tener en cuenta los siguientes requisitos para su diseño y empleabilidad:

- a) Longitud
- b) Sección
- c) Buzamiento de la veta y la indicación deseada
- d) Tipos de roca

Consideraciones en la elección del equipo Alimak para chimeneas:

- a) Las características del macizo rocoso, debiendo tener un RMR 50, RQD de 60 y Q de 60, que correspondería a una calidad aceptable y buena.
- b) Que la chimenea tenga una longitud mínima de 50 m.
- c) La chimenea debe de tener una sección que mida como mínimo 2.40 x 2.40 m.
- d) Su inclinación puede ser entre 60° y 90°.
- e) La construcción se debe de realizar sobre rocas caja.

Diseño de cámara para Alimak

Para la construcción de una chimenea utilizando la superficie T-Alimak, es fundamental diseñar un modelo que considere la infraestructura necesaria para su instalación, el movimiento del personal y la adecuada recepción de materiales en la base de la chimenea. En este contexto, el equipo Alimak empleado en la construcción requiere una cámara de preparación con una

sección de 3.5 x 3.5 metros y un avance de 6 metros. Adicionalmente, se evalúa la implementación de un bypass para reducir el riesgo de caída de rocas durante el tránsito del personal por debajo de la chimenea hacia la cámara de operación del equipo (15).

2.2.8 Ventilación subterránea

Garantizar una atmósfera segura y respirable es fundamental para llevar a cabo las operaciones mineras. Para ello, es esencial que la mina disponga de dos accesos independientes, como pozos, socavones o una combinación de ambos, que permitan un flujo adecuado de aire. En caso de labores con un único acceso, como una galería en progreso, se utiliza ventilación secundaria mediante una tubería. Por otro lado, el ducto principal de ventilación instalado en la mina depende del funcionamiento de los ventiladores para asegurar un adecuado suministro de aire (16).

Ventilación natural

Fonttis (17) describe el fenómeno denominado "tiro natura" en minas, caracterizado por la desigualdad de densidad entre el aire de entrada y salida, originada principalmente por las variaciones de temperatura, con diferencias significativas, y en menor medida por las disparidades de presión y humedad. Aunque este fenómeno puede resultar útil en minas poco profundas, su confiabilidad es limitada debido a su variabilidad estacional, considerando que las temperaturas exteriores fluctúan ampliamente desde bajo cero hasta 35°C entre verano e invierno, mientras que el interior de la mina tiende a mantener una temperatura más constante, con excepción de las zonas cercanas a las conexiones superficiales.

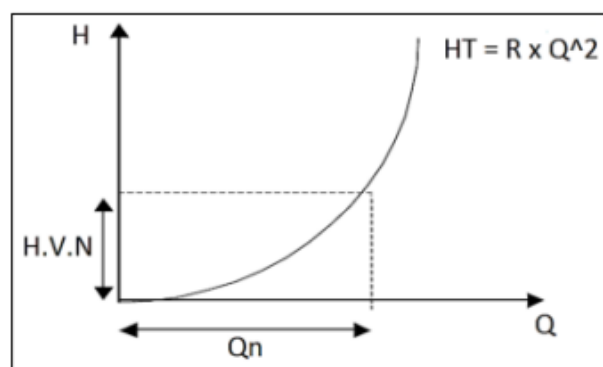


Figura 2. Caudal inducido por presión natural, por Fonttis, 2020.

Ventilación mecánica

Ricse (18) describe los sistemas de ventilación en minas como soluciones que emplean ductos adicionales para ventilar áreas restringidas, generando diferencias de presión mediante

dispositivos mecánicos alimentados por energía eléctrica o tecnologías de combustión interna. Cuando la circulación natural del aire resulta insuficiente para cumplir con los requisitos de caudal y velocidad, estos sistemas se implementan con una distribución en componentes primarios y secundarios, con el propósito de optimizar la circulación del aire y garantizar condiciones seguras en las zonas subterráneas.

2.2.9 Condiciones del aire en mina

Howard et al. (19) aclaran que, en el ámbito minero, el término "aire acondicionado" se refiere exclusivamente al control de temperatura y humedad mediante métodos de refrigeración o calefacción. Para comprender integralmente el control ambiental de la atmósfera minera, se utiliza el término "aire acondicionado total", que comprende tres funciones principales:

- a) Control de calidad del aire.
- b) Control de la cantidad de aire.
- c) Control de la temperatura y humedad.

Para alcanzar estos objetivos, se emplean diversos procesos de acondicionamiento específicos utilizados en la minería (20).

Control de calidad

Control de calidad (purificación del aire y eliminación de contaminantes).

- Control de gases: vapores y materia gaseosa, incluida la radiación
- Control del polvo-materia particulado (20).

Control de cantidad

- Ventilación
- Ventilación auxiliar o facial
- Extracción local (20).

Control de temperatura y humedad

Control del calor latente y sensible (20):

- Refrigeración
- Calefacción

- Humidificación
- Deshumidificación

2.2.10 Atmósfera de mina

La atmósfera dentro de una mina o explotación a cielo abierto consiste en una combinación de aire que contiene gases, polvo y partículas. Estas características son propias de la actividad minera y provienen de diversas fuentes, como (21):

- Oxidaciones originadas por procesos como la respiración, descomposición de materia orgánica, motores de combustión interna y explosivos. Estos generan gases como CO₂, CO, NO, NO₂, SO₂, así como material particulado.
- Gases propios de la naturaleza de la mina, como CH₄ (metano) y SH₂ (sulfuro de hidrógeno).
- Polvo de roca generado durante los trabajos de laboreo minero, incluyendo polvos de carbón y de roca, como el polvo de sílice.
- Otras sustancias que también pueden estar presentes en el ambiente minero, dependiendo de la actividad específica y las condiciones de trabajo.

Es importante tener en cuenta estas complejas mezclas de componentes en la atmósfera minera, lo que subraya la necesidad de un adecuado control y monitoreo ambiental en estas operaciones (21).

Características

Tejada y Mucha (28) destacan que los factores que influyen en la atmósfera minera son principalmente la temperatura (condicionada por la profundidad, el calor corporal, la maquinaria y las oxidaciones), la humedad y el nivel de contaminación. El objetivo fundamental de la ventilación minera consiste en mantener un ambiente que garantice condiciones de trabajo seguras y confortables, para lo cual se requiere un sistema de ventilación que proporcione un flujo de aire suficiente en cantidad y calidad. Este sistema debe ser eficiente, adaptarse óptimamente a los requisitos específicos de la labor minera, y simultáneamente ser económico y confiable.

Gases presentes en la actividad minera

Tabla 3. Composición del aire seco.

Componentes	% de Volumen	% de peso
Nitrógeno	78.09	75.53
Oxígeno	20.95	23.14
Anhidrido carbónico	0.03	0.046
Argón y otros gases	0.93	1.284

Nota: Extraído de Tejada y Mucha, 2022.

La composición del aire seco revela una composición fundamental para la seguridad minera. El nitrógeno domina con un 78.09% en volumen, siendo un gas inerte que diluye la concentración de otros componentes, reduciendo potenciales riesgos de combustión o explosión. El oxígeno, crítico para la respiración humana, representa un 20.95% en volumen, asegurando condiciones respirables en espacios subterráneos. Los gases minoritarios como el anhídrido carbónico (0.03%) y argón (0.93%) son relevantes para comprender la dinámica atmosférica en túneles y galerías mineras.

Tabla 4. Gases presentes en la minería.

Cuadro de características de gases							
Gases	Monóxido de carbono	Sulfuro de hidrogeno	Dióxido de nitrógeno (humos nitrosos)	Anhidrido sulfuroso	Nitrógeno	Anhidrido carbónico	Metano
Fórmula	CO	H ₂ S	NO ₂ o N ₂ O ₄	SO ₂	N	CO ₂	CH ₄
Gravedad	0.967	1.19	1.54	2.2	0.971	1.529	0.555
Límite de explosividad	12,5% a 74.2%	4.3% al 45	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	5% a 15%
Límite admisible	40ppm-44mg/m ²	8ppm-11.2mg/m	2.4ppm-4,8mg/m ³	1.6 ppm-4mg/m ³	No tiene	4000 ppm-7200mg/m ³	No tiene
Descripción del gas	Gas incoloro en condiciones normales que carece de olor y sabor perceptible, haciéndolo detectar sin equipos especializados	Gas incoloro en condiciones normales, pero su distintivo olor a huevos podridos es una señal de advertencia importante de su presencia, incluso en concentraciones bajas.	Gas de color marrón rojizo a temperaturas superiores a 23°C, acre y algo dulce.	Gas incoloro, acre, irritante, de sabor ácido y fuerte olor a azufre quemado	Gas incoloro, inodoro y físicamente inerte y constituye el 78.06% del aire	Constituye entre el 0.03 y el 0.06% del aire	Gas incoloro, inodoro e insípido

Nota: Elaboración propia en base a Tejada y Mucha, 2022.

Esta tabla constituye una herramienta fundamental para la evaluación de riesgos atmosféricos en operaciones mineras. Destaca la presencia de gases como el monóxido de carbono (CO), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y metano (CH₄), cada uno con características críticas de seguridad. El metano, por ejemplo, presenta un límite de explosividad entre 5% y 15%, representando un riesgo significativo en ambientes confinados. El sulfuro de hidrógeno, con su característico olor a huevos podridos, actúa como una señal natural de advertencia, mientras que gases como el dióxido de nitrógeno pueden ser imperceptibles, pero altamente tóxicos. La variación en gravedades específicas y límites admisibles subraya la complejidad del monitoreo atmosférico en entornos mineros.

Recirculación de aire viciado

La recirculación del aire ocurre cuando está presente; por ello, se tiene que estar en un perímetro circular en cual no tenga acceso, sin ser confundida con el caso de reutilización del aire, en el caso de los conductos de ventilación que se encuentran en serie. Usualmente, ello pasa que cuando se coloca un sistema de ventilación en un acceso de aire donde el flujo natural es menor que la capacidad del ventilador en funcionamiento (23).

Según algunas normas, los ventiladores secundarios deben colocarse de forma que el suministro de aire sea al menos 1,3 veces superior a la capacidad de caudal de aire del circuito abierto. La norma se creó en una época en la que se utilizaban con frecuencia ventiladores de baja capacidad (5 a 7 m³/s) y las unidades eran diminutas (2,0 m × 2,0 m). No obstante, es necesario un caudal de aire de al menos 1,5 veces la capacidad de circuito abierto del ventilador en conductos de aire con secciones transversales más grandes y ventiladores de mayor capacidad. Dependiendo de dónde esté situado el ventilador, puede haber incluso un poco de recirculación en determinadas situaciones. Para garantizar una ventilación adecuada y evitar problemas de seguridad con el sistema de ventilación, es esencial cumplir estos requisitos. (23)

No es recomendable, podría dejarse una mínima cantidad de circulación con tal que no cambie los contaminantes del aire o la temperatura del lugar de trabajo y que el tiempo de limpieza del gas de voladura no supere los límites permitidos. (23)

Consideraciones de seguridad y salud ocupacional

- Se toman en cuenta únicamente los gases generados por la voladura. No se incluyen los gases que puedan emanar del subsuelo (gases dormidos) (24).
- El gas más peligroso es el monóxido de carbono (CO), pero una adecuada ventilación permite eliminarlo eficazmente (24).

- El dióxido de carbono (CO₂), que proviene de equipos diésel, es más tolerable y también puede controlarse mediante la circulación de caudales de aire adecuados (24).
- Los gases contaminantes presentes se originan por diversos motivos, como las emanaciones de la voladura, el funcionamiento de máquinas con motores, etc. (24).

Requerimiento de aire total (QTO)

En los casos en que la operación no implique la utilización de equipos con motor de aceite:

En primer lugar, debe calcularse el caudal total de la operación mediante la fórmula proporcionada. A continuación, se compara este valor con el caudal determinado por el consumo de explosivo. Una vez obtenidos ambos valores, el mayor de los dos se considera la necesidad total de aire (17).

Debido a que se ve la necesidad de aire dentro del yacimiento minero por lo que según el documento de artículo 252 del reglamento, se debe tener en cuenta lo siguiente:

$$QTo = QT1 + QFu \quad (1)$$

Donde:

QTo = Caudal total para la operación

QT1 = La sumatoria de caudal requerido por:

- La cantidad de trabajadores (QTr),
- El uso de madera (QMa) y
- La temperatura del ambiente de trabajo (QTe) (25)

$$QFu = 15\% \text{ del } QT1 \quad (2)$$

Por estos motivos anteriormente mencionados se tiene que hallar:

- Caudal requerido por el número de trabajadores (QTr)

$$QTr = F \times N \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (3)$$

Donde:

QTr = Caudal total para “n” trabajadores (m³/min);

F = Caudal mínimo por persona de acuerdo con la escala establecida en el artículo 247 del reglamento; (25)

N = Número de trabajadores de la guardia más numerosa.

b) Caudal requerido por el consumo de madera (QMa)

$$QMa = T \times u \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (4)$$

Donde:

QMa = Caudal requerido por toneladas de producción (m³/min)

u = Factor de producción, de acuerdo con la escala establecida en el segundo párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento (25).

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.

Tabla 5. Factor de producción de acuerdo con el consumo de madera.

Factor de producción de acuerdo con el consumo de madera	
Consumo de madera (%)	Factor de producción(m ³ /min)
<20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
>71	1.25

Nota: Elaboración propia en base al DS 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM

c) Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (QTe)

$$QTe = Vm \times A \times N \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (5)$$

Donde:

QTe = Caudal por temperatura (m³/min);

Vm = Velocidad mínima;

A = Área de la labor promedio;

N = Número de niveles con temperatura mayor a 23°C, de acuerdo con escala la cual se encuentra dentro del artículo 252 exactamente en el tercer párrafo de las normas (25).

Tabla 6. Velocidad mínima.

Velocidad mínima	
Temperatura seca(°C)	Velocidad mínima(m/min)
<24	0.00
24 a 29	30.00

Nota: Elaboración propia en base al DS 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM

d) Caudal requerido por fugas (QFu)

$$QFu = 15\% \times Qt1 \text{ (m}^3/\text{min)} \quad (6)$$

Donde:

$$QT1 = QTr + QTe + QMa \text{ (25).}$$

e) Caudal requerido por consumo de explosivo (QEx)

Es necesario calcular y considerar la necesidad de aire para el consumo de explosivos en caso de que la actividad no implique equipos con motor de aceite. Esto puede hacerse de la siguiente manera:(25)

$$QEx = A \times V \times N \text{ (m}^3/\text{min)} \quad (7)$$

Donde:

QEx = Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado (m³/min)

A = Área promedio de labores (m²);

V = Velocidad mínima requerida según norma (m/min);

N = Número de niveles en voladura. (25)

2.3 Definición de términos básicos

2.3.1 Ventilación subterránea

La ventilación subterránea es un proceso crítico en operaciones mineras que garantiza un ambiente de trabajo seguro y saludable. Consiste en la circulación sistemática de aire en el interior de la mina, permitiendo la renovación y control de la calidad atmosférica. El procedimiento implica construir un circuito de ventilación que facilite la circulación de aire a través de todas las labores mineras, manteniendo un flujo constante y controlado durante el desarrollo de la operación (26).

2.3.2 Ventilación principal

El sistema de ventilación es el responsable de generar la diferencia de presión que permite que el aire circule por la mina. El ventilador principal situado en la superficie es la fuente de esta diferencia de presión. Esto hace posible que el aire libre de contaminantes entre en la mina a través de la chimenea de admisión. La chimenea de ventilación es la vía por la que el aire sucio abandona la mina y sale a la atmósfera. Este aire atraviesa la mina, y es la chimenea de ventilación la responsable de ello (26).

2.3.3 Ventilación secundaria

Este sistema de ventilación se construye en el pasillo principal de un sistema de metro con el fin de proporcionar asistencia al ventilador principal en el proceso de ventilación de un circuito que tiene una temperatura de alta resistencia. En los últimos años aumentó el uso de ventiladores secundarios, es consecuencia de una mayor concentración en las obras del metro y de la mayor profundidad de éstas, lo que ha provocado una mayor necesidad de presión de ventilación (26).

2.3.4 Ventilación auxiliar

La ventilación de entrada y de retorno del flujo de aire que se produce entre la ventilación principal y la zona de trabajo son los dos tipos de ventilación que hay entre las dos secciones. La construcción de minas y la aparición de frentes ciegos, que son regiones a las que no puede acceder el sistema de ventilación principal, son factores que hacen que aumente la necesidad de una ventilación que no sólo sea eficaz, sino también eficiente. En los frentes ciegos, el objetivo de la ventilación auxiliar es eliminar el aire contaminado y suministrar un flujo de aire limpio para cumplir el objetivo de mantener un entorno de trabajo saludable. Los conductos o manguitos que se relacionan con el ventilador son los que componen este sistema. El ventilador

en sí es este sistema. La forma aspirada, impulsada o combinada de estos conductos o mangas está pensada para ser instalada a lo largo del trabajo y puede funcionar en cualquiera de las tres configuraciones. En circunstancias en las que la tarea que hay que ventilar se realiza en un tiempo relativamente corto, se suele utilizar aire comprimido directamente a través de la manguera conductora (26).

2.3.5 Requerimiento de aire

Para garantizar que los lugares de trabajo y otras zonas que necesitan la dilución y el transporte de contaminantes puedan acceder a una cantidad adecuada de aire fresco, es vital que estos lugares tengan acceso al aire. Además, para establecer un entorno agradable, que mejore las condiciones de trabajo y, en consecuencia, se traduzca en un aumento de la productividad, es necesario crear un ambiente agradable. Se realizará una evaluación conforme al Anexo 38 del D.S. N° 023-2017-EM modificado del D.S. N° 024-2016-EM para determinar si la mina necesita o no aire (26).

2.3.6 Caudal de aire

El caudal representa el volumen de flujo de aire que atraviesa un punto en tiempo determinado (26).

$$Q = V \times A \quad (8)$$

Donde:

Q : (en metros cúbicos por minuto) Caudal

V : (metros por minuto) Velocidad de flujo

A : Área de la sección transversal (en metros cuadrados)

2.3.7 Equipo Alimak

Mediante el uso de la transmisión, se trata de una plataforma de acero ascendente que se desplaza a lo largo de raíles guía tanto rectos como curvos. Los tubos de servicio del carril guía, situados al pie del andén, proporcionan acceso tanto al aire como al agua para uso de los pasajeros. El andén puede adoptar diversas formas y proporciones, según las circunstancias. Una de las funciones del escalador es proporcionar una plataforma de trabajo, y otra es

proporcionar un medio de transporte a la zona del trabajo. Es la pared colgante la que actúa como anclaje del raíl guía sobre el que se desplaza. Con la ayuda de los elementos curvos del carril guía, es posible modificar en cualquier momento el curso del movimiento, en función de las necesidades del proyecto. Los raíles se encargan de transportar no sólo el agua y el aire, sino también el cable eléctrico y los servicios auxiliares de la línea aérea (25).

2.3.8 Perforación

Para lograr una voladura eficaz, es necesario que esta actividad se lleve a cabo con buen criterio y cuidado. Esto se debe al hecho de que la selección del explosivo es tan vital como el procedimiento de perforación. En un gran número de minas, sin embargo, la supervisión de la operación de perforación adecuada aún no se lleva a cabo de manera suficiente. Por ello, es posible que surjan fallos en la calidad del trabajo (barrenos desviados, más espaciados, de longitud irregular, etc.), que dictan pérdidas en la eficacia de la energía explosiva disponible. Es posible que estas deficiencias repercutan negativamente en la rentabilidad global de la mina. Hay cuatro cualidades que, en la mayoría de los casos, determinan por sí solas la calidad de los barrenos. Estas características son el diámetro, la longitud, la rectitud y la estabilidad de los barrenos que se van a perforar (25).

2.3.9 Voladura

Según Curasma y Titto (25) la voladura con electricidad mediante el uso de una llave/explosor termomagnético en conexión con un cable eléctrico blindado que ha sido cortocircuitado utilizando la combinación de ambos (pág. 40).

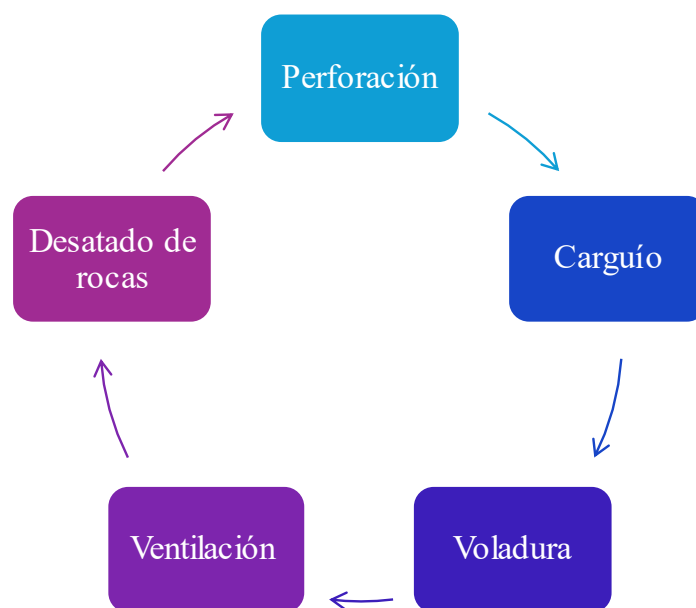


Figura 3. *Ciclo de perforación con equipo Alimak (25).*

2.3.10 Sostenimiento

La evaluación geomecánica de la estabilidad, discontinuidad estructural y zonas de debilidad, a pesar de la aparente homogeneidad de la masa rocosa, permitirá determinar el tipo de sostenimiento adecuado, pudiendo ser métodos de soporte externo o un determinado refuerzo interno. El soporte externo en la abertura subterránea es de naturaleza pasiva. Una vez instalados, no soportan carga alguna, y llegan a trabajar gradualmente los elementos del sostenimiento, que, entre otros, pueden ser el entibado, el anillo metálico o el concreto lanzado. El refuerzo interno consiste en insertar los elementos del sostenimiento en la masa rocosa, pasando a formar parte del arco portante. Su estado es de cambio constante. La variedad de los pernos de roca va de los pasivos hasta los activos. Fortificación de la chimenea: pernos helicoidales, malla electrosoldada, Shotcrete o cuadros metálicos, dependiendo del requerimiento de la estructura rocosa (25).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método general y método específico

Método general:

El enfoque de la investigación es cuantitativo y de tipo aplicado, ya que se sustenta en el análisis y procesamiento de datos numéricos para evaluar aspectos como el requerimiento de aire, los costos y la producción posterior a la implementación del proyecto. Este método permite realizar cálculos y simulaciones precisas, obteniendo resultados objetivos y medibles de forma eficaz (26).

Método específico:

El método específico es explicativo y descriptivo, dado que se enfoca en identificar y analizar las relaciones de causa y efecto entre las variables propuestas, como el diseño de la chimenea y la optimización de las operaciones. El enfoque facilita una comprensión detallada de cómo las modificaciones implementadas en el proyecto impactan directamente en los resultados operativos y económicos (26).

3.1.2 Alcance de la investigación

Nivel: la investigación es de nivel explicativo, ya que busca determinar la relación de causa-efecto entre las variables estudiadas: el diseño del proyecto de la chimenea y la optimización de las operaciones (26).

3.2 Diseño metodológico de la investigación

El diseño metodológico de la investigación es no experimental y de corte transversal, pues analiza y describe el estado actual de las variables sin manipularlas. El enfoque permite observar cómo interactúan las variables, como el diseño de la chimenea y la optimización de las operaciones, en un contexto presente, sin intervención experimental (26).

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

De acuerdo con Fernández et al. (26), la población o universo se define como el conjunto de todos los casos que cumplen con ciertas especificaciones establecidas para el estudio. En esta investigación, la población está constituida por todas las chimeneas construidas con fines diversos dentro de la unidad minera subterránea ubicada en Huancavelica. Las chimeneas abarcan diferentes métodos de construcción, incluyendo el uso de equipos convencionales y tecnologías modernas como el Alimak.

3.3.2 Muestra

La muestra seleccionada corresponde al proyecto de construcción de la chimenea Raise Climber N°3, realizada con el equipo Alimak STH-5E en la unidad minera de Huancavelica. El proyecto fue seleccionado mediante un muestreo por conveniencia, dado que representa una implementación reciente con datos relevantes relacionados con mejoras en ventilación, reducción de costos y aumento en la productividad operativa (26).

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Análisis documental: la técnica empleada consiste en recopilar información de documentos y registros técnicos relacionados con el tema de estudio.

3.4.1 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se aplicarán técnicas descriptivas y predictivas mediante el uso de herramientas como MS Excel, que facilitará el ordenamiento, comparación y presentación de datos. Asimismo, se utilizará el software VENTSIM DESIGN para simular las condiciones de ventilación y verificar los resultados en términos de costos, flujo de aire y condiciones ambientales tras la implementación de la chimenea de ventilación construida con el equipo Alimak.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Documentos y registros: se utilizarán equipos de monitoreo como Altair y Dräger para medir parámetros en campo, cuyos datos serán comparados con la normativa peruana, permitiendo verificar si las condiciones de ventilación cumplen con los estándares establecidos y evaluar la cobertura en distintos periodos de tiempo.

Software de simulación: se realizará una revisión programada mediante VENTSIM DESIGN para optimizar las mediciones realizadas en campo. Esto garantizará que las operaciones mineras se mantengan dentro de los parámetros requeridos mediante la construcción de infraestructuras estratégicas que mejoren el circuito de ventilación.

3.5 Instrumentos de análisis de datos

Para el análisis de los datos se utilizarán las siguientes herramientas digitales:

- Microsoft Excel: permitirá realizar cálculos y análisis de costos por metro de avance, rendimientos del proyecto, comparación de cobertura de aire y valorización de la producción.
- VENTSIM DESIGN: facilitará la determinación del caudal de aire en las labores, la velocidad del aire, la presencia de contaminantes y las condiciones térmicas. Además, servirá para realizar simulaciones para mejorar la calidad del aire en comparación con la situación actual.
- Microsoft Project: será utilizado para planificar el desarrollo del proyecto, considerando los tiempos estimados de ejecución.

CAPÍTULO IV

DIAGNÓSTICO, ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Breve descripción de la empresa y sus procesos

El ingeniero de minas describe la unidad minera que desarrolla sus actividades de exploración y explotación en 8 niveles de producción (NV.416, NV.426, NV.440, NV.457, NV.474, NV.490, NV.503 y NV.552), ejecutando labores principales en 7 frentes de trabajo (TJ.4201E, TJ.4201W, TJ.4330E, TJ.5010W, TJ.6031E, TJ.5031W y RP.4160). Implementa un método de perforación híbrido que combina técnicas convencionales en chimeneas y mecanizadas en tajeos y labores de desarrollo, utilizando explosivos Semexsa al 65% para el carguío. El sostenimiento de la estructura se realiza mediante pernos Split Set de 5 pies o pernos helicoidales de igual longitud, complementados con malla electrosoldada. La limpieza del material se ejecuta con equipos scooptram que transportan los escombros hacia cámaras de acumulación para su posterior extracción mediante volquetes.

4.2 Diagnóstico de la situación actual

La unidad minera estudiada cuenta con 3 estaciones en las cuales se realizó la medición de ingreso y salida de aire del caudal; la EVC-01 corresponde al ingreso de aire; mientras que la EVC-02 y EVC-03 son las chimeneas para la salida del aire viciado; sin embargo, el caudal requerido es de 169,689.25 CFM, teniendo un déficit de 38,817 CFM de aire.

Tabla 7. Mediciones de ingreso y salida de aire.

Estación	Ubicación	Labor	Descripción	Caudal (m3/min)	Caudal (CFM)
EVC-01	Nv.552	RP-001	Bocamina entrada aire de aire fresco	3,705.88	130,872.00
EVC-02	Nv.490	RC-01	Chimenea Raise Climber N°1 para salida de aire viciado	2,034.96	71,864.00
EVC-03	Nv.426	RC-02	Chimenea Raise Climber N°2 para salida de aire viciado	1,724.92	60,915.00

Mediante el software de VENTSIM se realizó el ingreso de información y se obtuvo una información detallada del circuito de ventilación respecto al caudal, flujo y resistencias consideras.

Tabla 8. Parámetros del circuito de ventilación actual.

Longitud total	5,800.6 m
Caudal de aire total de admisión	131,055 cfm
Caudal de aire total de escape	130,057 cfm
Flujo de masa total	69.14 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0,10357 Ns ² /m ⁸
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	0,41855 Ns ² /m ⁸

El análisis de los parámetros del circuito de ventilación revela una configuración compleja con una longitud total de 5,800.6 metros, donde el caudal de aire de admisión (131,055 cfm) supera marginalmente el caudal de escape (130,057 cfm), lo que indica una distribución prácticamente equilibrada del flujo de aire. El flujo de masa total de 69.14 kg/s sugiere una circulación significativa de aire, mientras que los valores de resistencia (0.10357 Ns²/m⁸ sin tubo y 0.41855 Ns²/m⁸ con conducto) reflejan las pérdidas por fricción en el sistema de ventilación, elementos cruciales para evaluar la eficiencia de la ventilación subterránea.

Tabla 9. Resumen de potencia del circuito de ventilación.

RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia del AIRE (pérdida por fricción)	131.3 hp Total 6.8 hp Chimenea 25.7 hp Conducir 98,8 hp Conducto de ventilación
Refrigeración Potencia de entrada	0,0 hp
Potencia eléctrica de ENTRADA	227,0 hp
Costo de energía anual de la red	\$ 147.68
Eficiencia de la red	57.8 R

El resumen de potencia del circuito de ventilación muestra una distribución energética donde la pérdida por fricción totaliza 131.3 hp, con una desagregación que evidencia los mayores consumos: 98.8 hp en el conducto de ventilación, 25.7 hp en el sistema de conducción y 6.8 hp en chimeneas. La potencia eléctrica de entrada de 227.0 hp contrasta con una eficiencia de red del 57.8%, lo que sugiere un margen considerable para optimización. El bajo costo energético anual de \$147.68 indica una gestión económica del sistema de ventilación, aunque la eficiencia podría mejorarse mediante intervenciones técnicas específicas.

4.3 Resultados del tratamiento y análisis de la información (tablas y figuras)

4.3.1 Proyecto de construcción de chimenea RC N°3

El proyecto de construcción de la chimenea Raise Climber (RC) N°3 será realizada por una empresa especializada y con uso del equipo elevador Jaula Trepadora Alimak STH-5E y tendrá una sección circular de 3.2 m de diámetro de acuerdo con las recomendaciones del área de geomecánica de la empresa minera. El proyecto de construcción de la CH RC N°3 contempla una longitud total de 235 metros que permitirá conectar los tajeos de explotación de los niveles 440 y 490 a superficie a fin de reducir la temperatura percibida en dichas labores y suplir con el requerimiento de caudal de aire para las actividades de explotación, así como mejorar la producción por hora hombre (TM/HH) en los tajeos de explotación, así como frentes de avance en labores de desarrollo.

4.3.2 Procedimientos de trabajo con el equipo Alimak STH-5E en la construcción de la chimenea RC N°3

a) Al inicio de la excavación

- Desmontaje de equipo y traslado de personal de empresa especializada

En la cámara de servicios Alimak se encuentra un equipo Alimak completo, el cual pertenece a Paiján, en coordinación con Gerencia mina y Empresa Paiján se desmontó equipo completo (jaula Alimak, U-frame- H. yugo. Transmisiones, plataforma. Motor eléctrico, jaula alicab, plataforma, H, yugo, tambora y cable eléctrico, tablero principal, cola de carriles, etc.) Posterior a ello se trasladarán todas las partes del equipo y otros a acceso de cámara de servicios para poder ser retirado a superficie.

- Traslado de equipo a cámara de estación

Se trasladarán todos los equipos necesarios para la Excavación de la Chimenea con el apoyo de equipos auxiliares de la Compañía. Se ubicará el punto topográfico desde donde se realizará la excavación (chimenea piloto) y se montarán los equipos necesarios para su ejecución.

- Sellado de Piloto (4.0 metros) y Montaje de Carriles a inicio de Curva

Son los primeros disparos (4.0 metros) realizados a modo convencional en la Chimenea para colocar los carriles curvos desde 3°, 7°, 8° y 25° según sea el caso hasta llegar a la inclinación

del proyecto (90°) y la cola para estación y mantenimiento (carril de servicio este carril servirá para futuras reparaciones y mantenimiento de equipo). Ver Figura. “Sellado de Piloto”.

- Montaje de equipo: unidad principal y auxiliar

Enseguida se sube la viga en “H”, estructura en “U”, transmisiones, carriles para estación del equipo. Luego se continúa con el montaje del equipo colocando la plataforma, porta barreno, jaula para el personal, motores eléctricos, tablero de mando, techo protector; de igual manera, para el equipo auxiliar (alicaab) las 02 tambores para el Alimak y el alicab, respectivamente, que funciona cuando la trepadora asciende o desciende.

Montaje final del equipo doble drive colocando los frenos centrífugo superior e inferior que limita la velocidad de la plataforma trepadora en descenso por gravedad, y dispositivos de seguridad GA-5 que es el paracaídas que automáticamente frena a la trepadora si la velocidad de descenso excede el límite permisible de seguridad, además del freno de mano y un freno de pie.

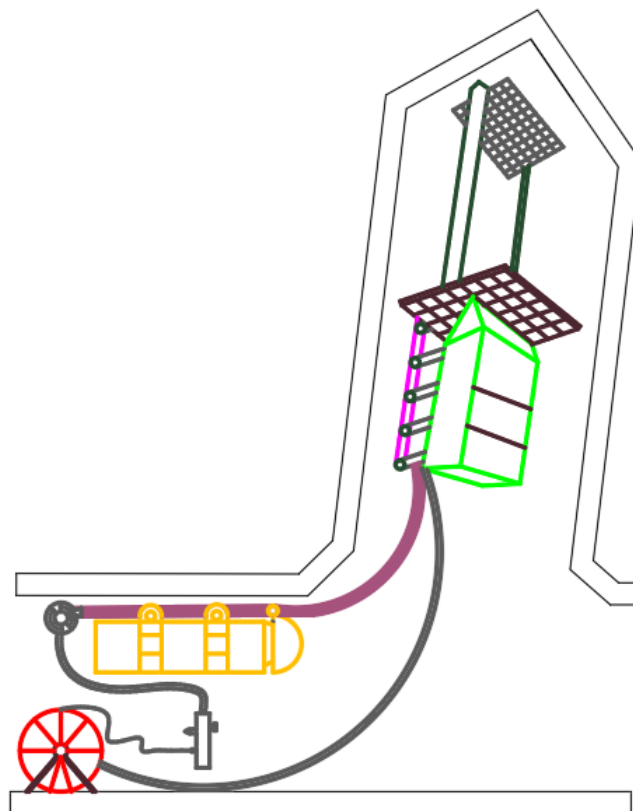


Figura 4. Montaje de equipo Alimak STH-5E.

La figura 4 presenta un diagrama de montaje del equipo Alimak-STH-5E, un sistema empleado para la elevación y transporte de personal y materiales en labores subterráneas. El diagrama muestra los principales componentes del sistema, incluyendo la plataforma elevadora, el cable

de tracción, los poleas y polipastos, así como los mecanismos de seguridad. La representación esquemática permite visualizar la integración y el funcionamiento de este equipo especializado, el cual es fundamental para garantizar la eficiencia y la seguridad de las operaciones mineras a gran profundidad. Este tipo de soluciones de transporte vertical son ampliamente utilizadas en la industria minera para optimizar los procesos de movilización del personal y el movimiento de insumos a lo largo de los diferentes niveles de una mina subterránea.

b) Durante la excavación

- Ciclo de operaciones con el equipo Alimak STH-5E
- Perforación

El ingeniero de minas dispone de tres máquinas neumáticas Stoper marca RNP para la perforación del frente de avance, estableciendo una inclinación de 70° que garantiza una velocidad de penetración óptima, tanto para el sostenimiento como para la perforación controlada. Selecciona barras cónicas en juegos de 2, 4, 6 y 8 pies, adaptadas específicamente para los tipos de roca clasificados en los rangos IIIB e IIA, optimizando el avance y el sostenimiento. Complementariamente, implementa tres máquinas Jack Leg con dos barras cónicas de 4 pies equipadas con brocas de 32mm, diseñadas para el anclaje preciso de los carriles.

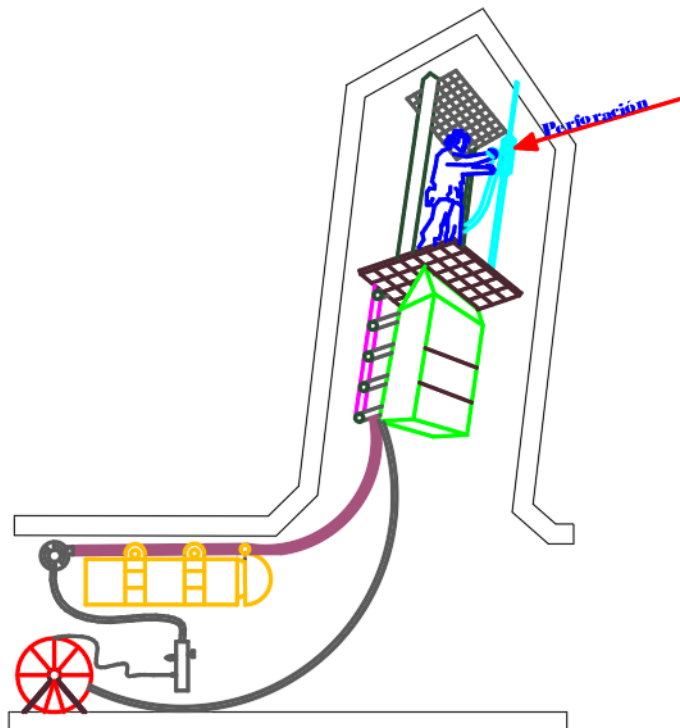


Figura 5. Perforación con equipo Alimak STH-5E.

- Voladura

Una vez realizada la perforación se realizará el carguío de los taladros perforados y se considerará para el contorneo una voladura controlada usando para ellos tubos PVC. A finalizar el carguío el personal será retirado mediante la jaula trepadora Alimak. La detonación se ejecutará desde la cámara Alimak con iniciación con chispeo de mecha seguridad y / o con fulminante eléctrico.

Antes que se efectúe la voladura al final del carril se saca el cabezal de taladrado y se coloca el cabezal de bolado o disparo es un método de protección, la plataforma Alimak debe descender solo por su propio peso (debido a que se tiene que la corriente eléctrica es pequeña), por este motivo el límite de velocidad en los frenos centrífugos superiores e inferiores (teniendo un intervalo velocidad de descenso de 25 a 30 m./min por gravedad).

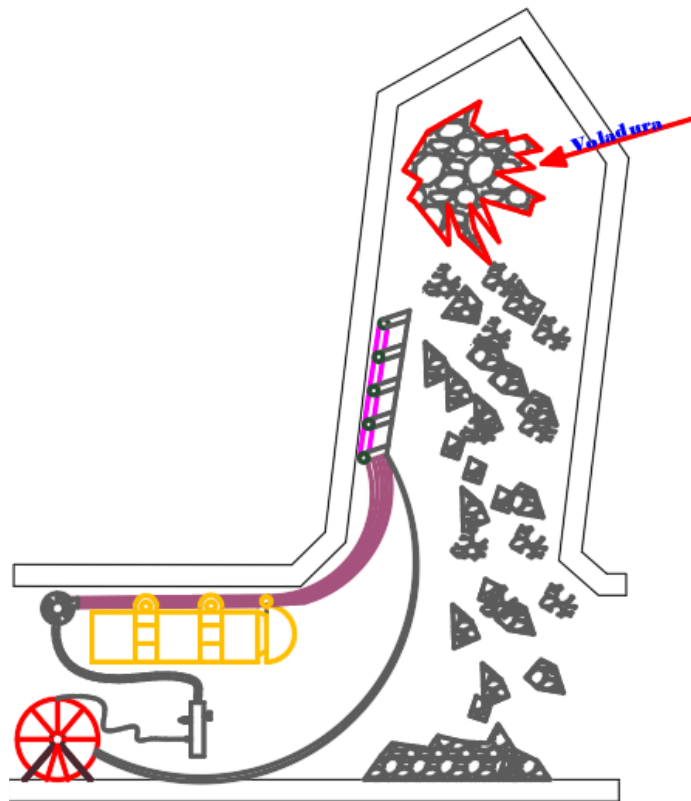


Figura 6. Voladura con equipo Alimak ATH-5E.

- Ventilación

Posterior a cada volada, es necesaria la ventilación de la chimenea haciendo uso de agua y también aire comprimido, mediante el uso de una válvula simple se liberará y en el caso de la abertura se halla un cabezal de bolado el cual tiene como cometido ampliar. Se realizará por

una línea de aire comprimido a través de tubería de 1". El tiempo estimado para el escape de los gases producidos de la detonación de los explosivos es 60 minutos aproximadamente.

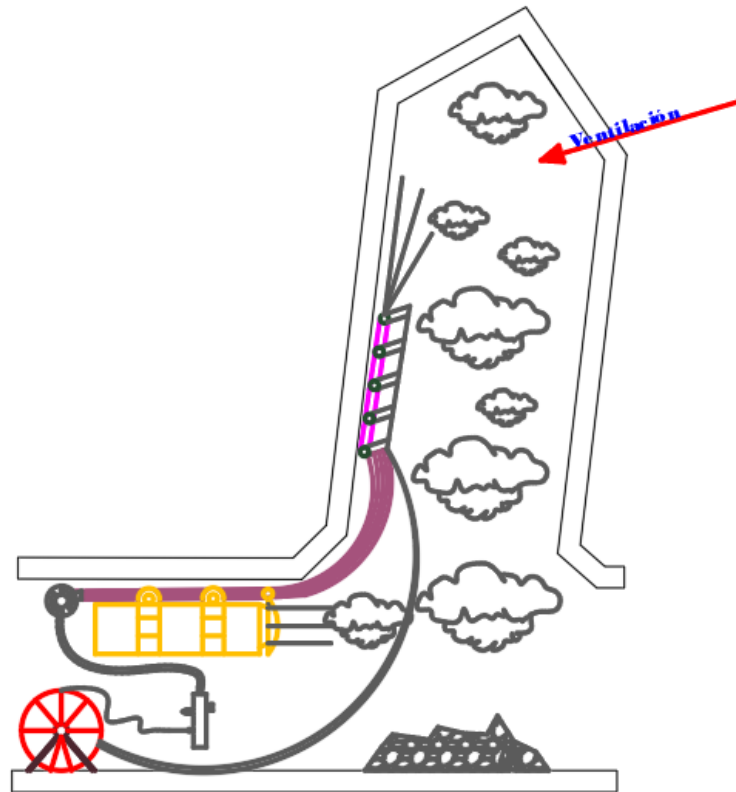


Figura 7. Ventilación con equipo Alimak STH-5E.

- Desatado de roca

Después de ventilar la chimenea y previo monitoreo de gases se ascenderá con el equipo Alimak hasta el tope de la chimenea para la evaluación correspondiente del tope y contorno, verificando que no haya tiros cortados, el perforista líder y segundo perforista al momento de subir a la plataforma de trabajo debe de asegurarse con el arnés y la línea de anclaje sujetado a los puntos de anclaje de la plataforma de trabajo, se procederá a colocar el carril guía de 2m posicionándose a una altura adecuada para realizar el desatado de rocas sueltas iniciando del tope y luego de los hastiales, techo y piso haciendo uso de la barretilla adecuada.

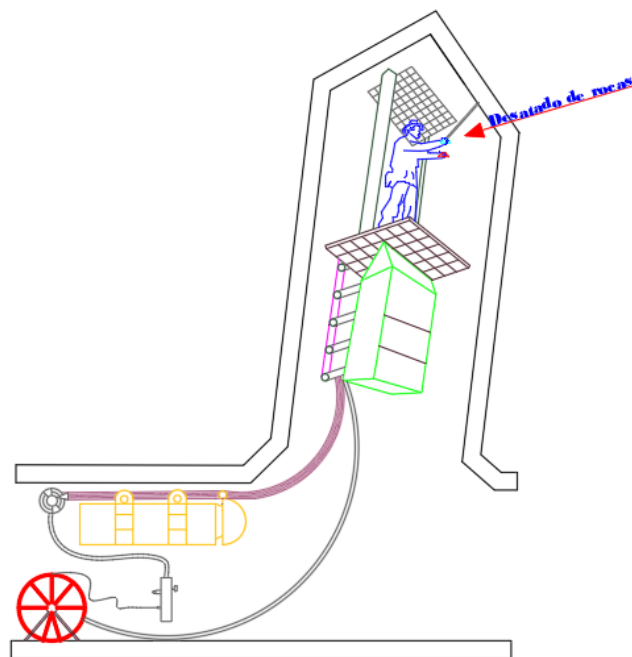


Figura 8. Desatado con equipo Alimak STH-5E.

- Sostenimiento

Luego del primer disparo se evaluará in situ las condiciones del macizo rocoso y se determinará el sostenimiento más adecuado para la chimenea, es indispensable colocar siempre en el tope de la chimenea un guarda cabeza con malla y pernos Split set, que cumplen la función de techo protector para el personal que está trabajando en la chimenea.

De acuerdo con el mapeo geomecánico se realizará el sostenimiento mediante la instalación de pernos helicoidales de 5 pies, instalación de Split set de 5 pies y/o instalación de malla electrosoldada.

- Después de la excavación

- Recuperación de carriles

Aquí comienza la etapa final de la chimenea, llegado al tope se preparará un tapón de madera que se colocará en la parte superior de la chimenea como medio de seguridad, a medida que se desciende se realizará el desatado de toda la columna principal de los carriles para después empezar con el desmontaje de estos y el desalojo del equipo de la cámara de estación. Se inicia la recuperación de los carriles de la parte superior, todo en forma descendente.

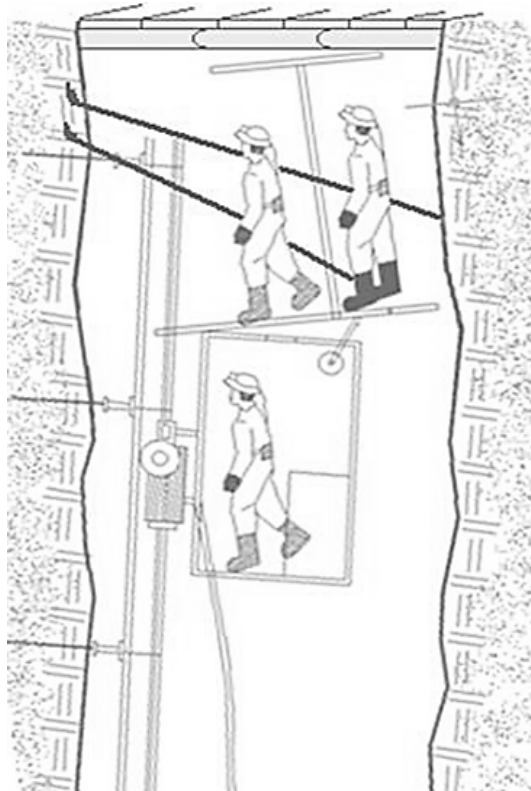


Figura 9. *Representación de la recuperación de carriles del sistema Alimak.*

- Desmontaje final del equipo

Para culminar el desmontaje se bajan los equipos y la unidad motriz principal y auxiliar en la cámara de estación.

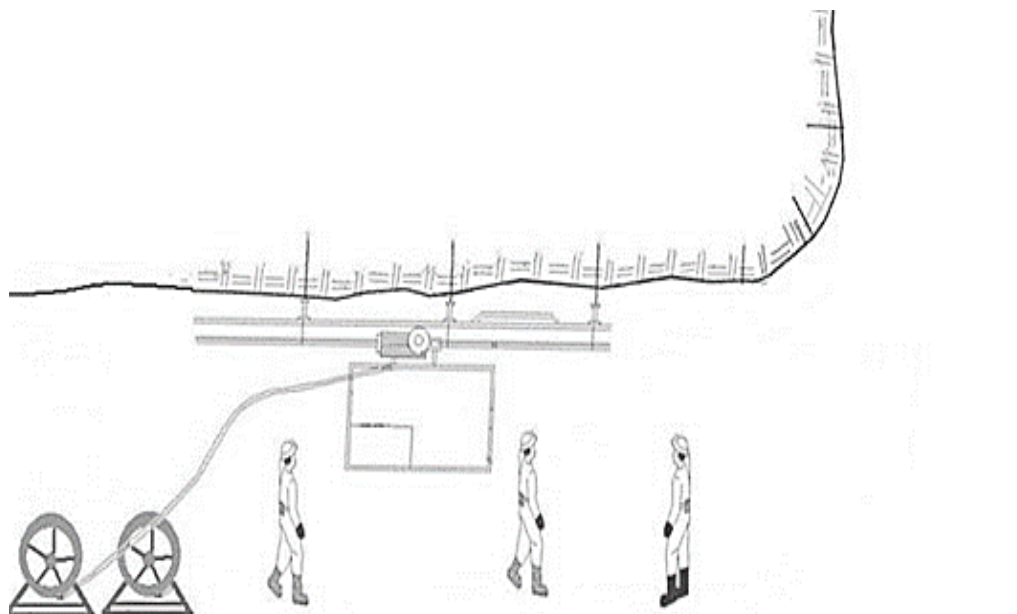


Figura 10. *Desmontaje final del equipo Alimak STH-5E*

d) Características iniciales de construcción de CH RC

El diseño de la chimenea involucra una sección circular de excavación de 3.20 m sobre roca de calidad buena – regular. A continuación, se muestra la evaluación geomecánica en base a RM y además se indican los parámetros de construcción planteados.

Tabla 10. Mapeo geomecánico.

REGISTRO DE MAPEO GEOMECAÁNICO EN CAMPO MEDIANTE RMR								
PARÁMETROS			RANGO DE VALORES				VALORACIÓN	
RESIST. COMPRESIÓN UNIAxIAL	>250 (15)	X	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25 (2) <5 (1) <1 (10)	12	
RQD %	90-100 (20)	X	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	17	
ESTACIAMIENTO (m)	>2 (20)	X	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 (5)	15	
PERSISTENCIA	<1m long. (6)	X	1-3 m Long. (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	>20 m (0)	4	
APERTURA	Cerrada (6)	X	<0.1 mm apert. (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	> 5mm (0)	5	
CONDICI ÓN DE JUNTAS	Muy rugosa (6)		Rugosa (5)	X	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	3
RELLENO	Limpia (6)	X	Duro< 5mm (4)	Duro> 5mm (2)	Suave <5 mm (1)	Suave >5 mm (0)	4	
INTEMPERIZAC IÓN	Sana (6)		Lig. Intemper. (5)	X	Mod. Intemper. (3)	Muy Intemper. (2)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	X	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	10	
AJUSTE POR ORIENTACIÓN	Muy favorable (0)		Favorable (-2)	X	Regular (-5)	No favorable (-10)	(- Muy desfavorable (-12)	-5
RMR							68	

Tabla 11. Parámetros de construcción para el diseño de chimenea.

Parámetro	Valor	Unidad
Sección (θ)	3.20	m
Área de sección	8.04	m ²
Tipo de roca	IIA	Ind.
Densidad de roca	2.70	M3/ton
Guardias por día	3.00	Gdía/día
Longitud total de perforación	235.00	M
Avance lineal eficaz por guardia	2.08	Ml
Volumen por guardia	16.77	M3
Toneladas por guardia	45.27	Ton
F. Esponjamiento	40%	%

El diseño de la malla de perforación y voladura obedece a los parámetros de perforación y parámetros de voladura descritos a continuación, los cuales fueron referenciados por proyectos anteriores desarrollados en la misma unidad minera.

Tabla 12. Parámetros de perforación.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de barra	8	ft
Diámetro de broca	38	mm
N° Total de taladros perforados	57	und.
N° Total de tal. Cargados	53	und.
N° Total de tal. Alivio	4	und.
Eficiencia de perforación	95%	%
Eficiencia de voladura	90%	%

La tabla revela una operación de perforación altamente eficiente, con una longitud de barra estándar de 8 pies y un diámetro de broca de 38 mm. El total de 57 taladros perforados, con 53 taladros cargados y 4 de alivio, representa una estrategia optimizada de fragmentación rocosa. La eficiencia de perforación del 95% y la eficiencia de voladura del 90% indican un proceso técnicamente controlado, minimizando desperdicios y maximizando la precisión en la preparación del terreno para la extracción mineral.

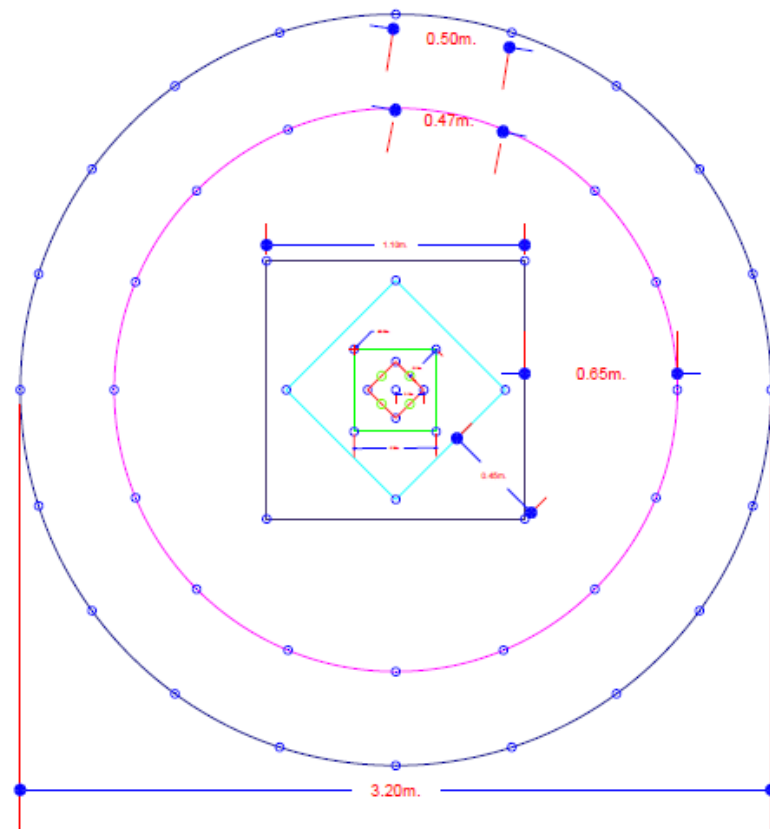
Tabla 13. Parámetros de voladura.

Parámetro	Valor	Unidad
Accesorios de voladura		
Mecha blanca	2	pza.
Faneles	53	pza.
Cordón detonante 5P	12	m
Fulminante no eléctrico	2	pza.
Mecha rápida	1	m
Conector J	2	pza.
Explosivos		
EXAGEL DINAMITA 80% 1" 1/4 X 16"	0.347222	kg/Cart.
DINAMITA 45% 7/8X 7"	0.079114	kg/Cart.

La tabla de parámetros de voladura muestra un meticuloso plan de fragmentación utilizando una combinación de accesorios y explosivos especializados. La selección de elementos como mecha blanca, faneles, cordón detonante y fulminantes no eléctricos sugiere un enfoque técnico para garantizar una detonación segura y controlada. El uso de dos tipos de explosivos (EXAGEL DINAMITA 80% y DINAMITA 45%) con diferentes características de peso por cartucho permite una fragmentación diferenciada, adaptándose probablemente a la variabilidad geológica del macizo rocoso y optimizando la eficiencia de la voladura.

A continuación, se presenta el diseño de planteado para los avances con la máquina Alimak STH-5E, realizado en base al modelo planteado por Konya. La malla consta de 20 taladros de contorno, 16 taladros de sub- contorno, 16 taladros de ayuda, y 5 taladros de arranque de los cuales 4 son alivio con una salida cilíndrica.

MALLA DE PERFORACIÓN CON EQUIPO ALIMAK



Parámetros de perforación		
Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de barra	8	ft
Diámetro de broca	38	mm
Nº Total de taladros perforados	57	und.
Nº Total de tal. Cargados	53	und.
Nº Total de tal. Alivio	4	und.
Eficiencia de perforación	95%	%
Eficiencia de voladura	90%	%

Parámetros de Voladura		
Parámetro	Valor	Unidad
Accesorios de voladura		
Mecha blanca	2	pa.
Fanels	53	pa.
Cordón detonante SP	12	m.
Fulminante no eléctrico	2	pa.
Mecha rígida	1	m.
Conector J	2	pa.
Explosivos		
EXAGEL DINAMITA 80% 1" 1/4 X 16"	0.347222	kg/Cart.
DINAMITA 45% 1/8X 7"	0.079114	kg/Cart.

Secuencia de salida	Descripción	DETO. RET. Nº	Taladros cargados	Taladros vacíos	SEMIENSA 45% 7/8" x 7"		EXAGEL 80% 1 1/4" x 16"		Explosivo usado (kg)
					Nº cart.	Total (kg) 0.298	Nº cart.	Total (kg) 0.291	
0	Alivio			4	0	0	0	0	0
1	Arranque	1	1	-	0	0	8	2.38	2.38
2	Primera ayuda	3	4	-	0	0	8	9.52	9.52
3	Segunda ayuda	5	4	-	0	0	8	9.52	9.52
4	Tercera ayuda	6	4	-	0	0	8	9.52	9.52
5	Cuarta Ayuda	7	4	-	0	0	8	9.52	9.52
6	Sub-Contorno	9	16	-	7	33.33	3	14.29	47.62
7	Contorno	11	20	-	7	41.67	3	17.86	59.52
	Total		53	4	14	75	46	72.62	147.62

UNIVERSIDAD CONTINENTAL

PLAN0: Malla de P&V Alimak

Elaborado por: Francesco Arancibia Agostinelli

Escala: 1/25

Fecha: 15/08/2024



Figura 11. Diseño de la malla de perforación y voladura de la chimenea RC N°3.

Tabla 14. Distribución de carga explosiva por taladros.

Secuencia de salida	Descripción	DETO. RET. N°	Taladros cargados	Taladros vacíos	SEMEXSA 45% 7/8" x 7"		EXAGEL 80% 1/4" x 16"		Explosivo usado (kg)
					N° cart.	Total (kg)	N° cart.	Total (kg)	
						0.298		0.291	
0	Alivio			4	0	0.00	0	0	0
1	Arranque	1	1	-	0	0.00	8	2.38	2.38
2	Primera ayuda	3	4	-	0	0.00	8	9.52	9.52
3	Segunda ayuda	5	4	-	0	0.00	8	9.52	9.52
4	Tercera ayuda	6	4	-	0	0.00	8	9.52	9.52
5	Cuarta Ayuda	7	4	-	0	0.00	8	9.52	9.52
6	Sub-Contorno	9	16	-	7	33.33	3	14.29	47.62
7	Contorno	11	20	-	7	41.67	3	17.86	59.52
Total			53	4	14	75.00	46	72.62	147.62

4.3.3 Rendimientos de perforación y voladura

Para el cálculo de rendimientos en la operación de perforación se realizó en base a valores promedios obtenidos en proyectos anteriores, el cual resulta en un tiempo total de perforación de 5 horas y un factor de perforación de 60 metros perforados por el avance total del proyecto con uso del equipo Alimak STH-5E.

Tabla 15. Rendimientos de perforación.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de perforación total	2.85	h
Tiempo de perforación por taladro	6.00	min/tal
Velocidad promedio de perforación	2.67	m/min
Longitud total de perforación	235.00	m
F. Perforación	112.72	M. perf./M. Avan.

Asimismo, se presentan los rendimientos de voladura esperados en el proyecto de la chimenea RC N°3 considerando la malla de perforación de voladura en sección circular propuesta.

Tabla 16. Rendimientos de voladura.

Parámetro	Valor	Unidad
Avance por disparo	2.08	ml
Kilogramos de explosivo usado	104.70	Kg
Factor de avance	50.22	Kg/ml
Factor de carga	6.24	Kg/m3
Factor de potencia	2.31	Kg/ton

4.3.4 Análisis de costos unitarios

Tabla 17. Costos operacionales en el traslado del equipo Alimak STH-5E a interior mina.

Descripción	Unid.	Cantd.	Incid	Precio (US \$)	Parcial (US \$)	Sub Total (US \$)	Total (US \$)
1.- Mano de obra						356.08	356.08
Perforista Alimak	Hh	1.0	1.00	55.51	55.51		
Perforista	Hh	1.0	1.00	52.43	52.43		
Operador Alimak	Hh	1.0	1.00	49.35	49.35		
Ing. jefe de Guardia	Hh	1.0	1.00	109.35	109.35		
Mecánico Especialista	Hh	1.0	1.00	61.68	61.68		
Bodeguero	Hh	0.5	0.50	55.51	27.76		
2.- Materiales:							35.608
Herramientas Manuales	%		4%	356.08	14.24	14.24	
Implementos de Seguridad	%		6%	356.08	21.36	21.36	
3.- Equipos:							
Scooptram							Cuenta CIA.
Total, costo directo							391.68

En la tabla anterior, el presupuesto total es \$391.68, compuesto por \$356.08 en mano de obra (incluyendo diversos roles) y \$35.608 en materiales (herramientas y seguridad), excluyendo el costo de equipos.

Tabla 18. Costos operacionales en el montaje del equipo Alimak STH-5E a interior mina.

Descripción	Unid.	Cantd.	Incid.	Precio (US \$)	Parcial (US \$)	Sub Total (US \$)	Total (US \$)
1.- Mano de obra						1,535.337	1,535.337
Perforista Alimak	Hh	1.00	4.000	55.51	222.06		
Perforista	Hh	1.00	4.000	52.43	209.72		
Operador Alimak	Hh	1.00	4.000	49.35	197.39		
Ing. jefe de Guardia	Hh	1.00	4.000	109.35	437.38		
Mecánico Especialista	Hh	1.00	4.000	61.68	246.73		
Bodeguero	Hh	1.00	4.000	55.51	222.06		
2.- Materiales:							153.534
Herramientas Manuales	%		4%	1,535.3	61.41	61.41	
Implementos de Seguridad	%		6%	1,535.3	92.12	92.12	
3.- Equipos:							0.000
Total, costo directo							1,688.87

La tabla 18 detalla los costos operacionales asociados al montaje del equipo Alimak STH-5E en interior mina. El principal rubro corresponde a la mano de obra que suma un total de \$1,535.337, incluyendo personal especializado como perforistas, operador Alimak, ingeniero jefe de guardia, mecánico y bodeguero. Los materiales representan un costo adicional de \$153.534, desglosado en herramientas manuales (\$61.41) e implementos de seguridad (\$92.12). No se registran costos por concepto de equipos. El costo directo total de este montaje asciende a \$1,688.87.

Tabla 19. Costos operacionales en el desmontaje del equipo Alimak STH-5E.

Descripción	Unid.	Cantd.	Incid.	Precio (US \$)	Parcial (US \$/m)	Sub Total (US \$/m)	Total (US \$/m)
1.- Mano de obra						2,232.080	2,232.080
Perforista Alimak	Hh	1.0	6.67	48.42	322.83		
Perforista	Hh	1.0	6.67	45.73	304.89		
Operador Alimak	Hh	1.0	6.67	43.04	286.96		
Ing. jefe de Guardia	Hh	1.0	6.67	95.38	635.87		
Mecánico especialista	Hh	1.0	6.67	53.80	358.70		
Bodeguero	Hh	1.0	6.67	48.42	322.83		
2.- Materiales:							223.21
Herramientas manuales	%		4%	2,232.08	89.28	89.28	
Implementos de seguridad	%		6%	2,232.08	133.92	133.92	
3.- Equipos:							
Total, costo directo							2,455.29

La tabla 19 muestra los costos operacionales incurridos durante el desmontaje del equipo Alimak STH-5E. La mano de obra representa el rubro más significativo, sumando \$2,232.080, con la participación de perforistas, operador Alimak, ingeniero jefe, mecánico especialista y bodeguero. Los materiales, que incluyen herramientas manuales (\$89.28) e implementos de seguridad (\$133.92), alcanzan un total de \$223.21. No se registran costos por equipos. El costo directo total de este desmontaje asciende a \$2,455.29.

Tabla 20. Costos unitarios chimenea método convencional Jack leg.

DESCRIPCION	UNID	CANT	INCIDENCIA	PRECIO	PARCIAL	TOTAL
COSTO DIRECTO						
MANO DE OBRA						412.0
Lider	TAR	1.0	0.7	167.5	116.4	
Perforita	TAR	1.0	0.7	147.7	102.6	
Ayudante	TAR	1.0	0.7	136.5	94.8	
Mecánico	TAR	0.5	0.3	146.4	50.9	
Ayudante	TAR	0.5	0.3	136.5	47.4	
SUPERVISION						0.0
Jefe de turno	TAR		0.0	383.6	0.0	
MATERIALES Y ACCESORIOS						26.1
Arnés tipo para caída	PZA	3.0	1.6	0.6	1.0	
Línea de vida doble de 2 ganchos	PZA	3.0	1.6	0.7	1.1	
Lámpara minera	PZA	4.0	2.2	1.6	3.4	
Herramientas	%mo		0.1		20.6	
EQUIPOS Y OTROS						255.4
Perforación	PP	456.0	247.2	0.9	219.8	
Equipo - Accesorio Plataforma	GLO	1.0	0.3	142.7	35.7	
Scoop						
EXPLOSIVOS						0.0
Emulnor	PZA		0.0	0.6	0.0	
Fanel	PZA		0.0	3.2	0.0	
Carmex	PZA		0.0	2.3	0.0	
Cordón detonante	ML		0.0	0.6	0.0	
Mecha rápida	ML		0.0	1.1	0.0	
SUB TOTAL COSTO DIRECTO						693.6
SUB TOTAL COSTO INDIRECTO						602.2
COSTOS FIJOS		0.5				338.8
GASTOS GENERALES		0.2				159.4
UTILIDAD + IMPREVISTOS		0.2				104.0
SUB TOTAL COSTO INDIRECTO						602.2
COSTO TOTAL POR METRO LINEAL					S/.	1295.8
COSTO TOTAL POR METRO LINEAL					US \$	392.7

La Tabla 20 muestra el desglose de los costos unitarios para la ejecución de una chimenea mediante el método convencional de perforación con equipos Jack Leg. El costo directo asciende a S/. 693.6 (US\$ 392.7) por metro lineal, compuesto principalmente por mano de obra (S/. 412.0), equipos y otros (S/. 255.4), y una menor proporción de materiales y accesorios (S/. 26.1). Los costos indirectos, que incluyen costos fijos, gastos generales y utilidad/imprevistos, suman S/. 602.2, elevando el costo total por metro lineal a S/. 1,295.8 (US\$ 392.7). Este detallado análisis económico permite al ingeniero evaluar y optimizar los procesos de construcción de infraestructura subterránea bajo el método de perforación convencional.

4.3.5 Evaluación del sistema de ventilación actual

Parámetros de ventilación

Para el desarrollo de la simulación en el software VETNSIM incorporando el proyecto de la chimenea Raise Climber N°3, se consideraron los parámetros de ventilación de la mina caso de estudio, los cuales fueron proveídos por el área de ventilación, seguridad y salud ocupacional de la empresa minera.

Tabla 21. Descripción de los parámetros de ventilación en la mina caso de estudio.

Parámetros	Valor	Unidad
Densidad de aire en mina	1.129	Kg/m ³
Temperatura bulbo húmedo	17	°C
Temperatura bulbo seco	23	°C
Presión barométrica en superficie	95.011	KPa
Gradiente geotérmico	1.2	°C/100m
Densidad de aire en la red de ventilación	0.9	Kg/m ³

Cálculo de requerimiento de aire

a) Cálculo de requerimiento de aire por personal QTr

La unidad minera caso de estudio se encuentra a una altura por debajo de los 540 msnm y posee un personal mayoritario en la guardia de día con 70 trabajadores en total. De esta forma es que el caudal necesario para el personal es de 7204.19 CFM.

Tabla 22. Cálculo de requerimiento de aire por personal.

Personal	Total/ gdía	F (Q persona)	m3/min (*)	CFM	Dist (%)
Empresa minera	57.00	3.00	171.00	6,038.81	84%
Contratista	11.00	3.00	33.00	1,165.38	16%
QTr	68.00	3.00	204.00	7,204.19	1

b) Cálculo de requerimiento de aire por madera QMa

Las frentes de avance en el desarrollo y preparación de labores son sostenidas con pernos de anclaje, malla electrosoldada y Shotcrete de acuerdo con las recomendaciones del área de geomecánica de la unidad minera. La madera es mayormente usada en los tajeos de explotación para el sostenimiento de bolsillos y cámaras auxiliares de almacenaje de mineral en el método de explotación por Sub Level Caving. Por otra parte, la producción de material total (mineral y

desmante) es de 1871 TMH/día, lo que conlleva a la obtención de un factor de 0.00 m³/min para el cálculo de necesidad de aire por consumo de madera.

Tabla 23. Cálculo de requerimiento de aire por consumo de madera.

Tipo de labor	UND	Programado m3/mes	Programado m3/día	Consumo m3/día	%
Producción	m3	51,300.00	630.00	30.00	-
Avances	m3	1,890.00	63.00	-	-
Total		53,190.00	693.00	30.00	-

c) Cálculo de requerimiento de aire por temperatura QTe

Se consideraron los niveles de explotación NV 440 y 490 como aquellos en los que se perciben valores superiores de temperatura de bulbo seco, de ese modo se calcula un requerimiento de 46043 CFM para suplir la velocidad de aire necesaria para el control de temperatura en dichos ambientes de trabajo.

Tabla 24. Cálculo de requerimiento de aire por temperatura.

Descripción	Valor	Unidad
Temp. Bulbo seco °c	28	°C
# Niveles	2	>23°C
Velocidad mín. (vm)	30	m/min
Área (prom.)	21.73	m2
Qte	46,043.26	cfm

d) Cálculo de requerimiento por equipos con motor petrolero Qeq

El requerimiento de aire por cada unidad de HP en equipos con motor petrolero fue considerado como 3m³/min de acuerdo con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería D.S. N°024-2016-EM y su modificatoria D.S. N°023-2017-EM. De ese modo, se calculó un requerimiento de aire de 159.304 CFM el cual contempla el caso en el que todos los equipos descritos a continuación (ver tabla 25) trabajasen de forma simultánea en una guardia de acuerdo con sus indicadores de disponibilidad mecánica y factor de utilización.

Tabla 25. Cálculo de requerimiento de aire por equipos con motor petrolero.

Ítem	Equipo	Cant	Rend.	Potencia Nominal (HP)	DM (%)	FU (%)	m3/min	CFM	Distribución (%)
1	SCOOP	1	80%	262	93%	56%	3	11,565	9%
2	SCOOP	1	80%	425	87%	82%	3	25,697	19%
3	Volquete	2	80%	406	91%	40%	3	12,525	9%
4	Volquete	2	80%	448	91%	50%	3	17,276	13%
5	JUMBO	1	80%	290	88%	63%	3	13,627	10%
6	SIMBA	1	80%	151	80%	80%	3	8,191	6%
7	Camionetas	2	80%	100	80%	40%	3	5,424	4%
Total		10	2,446	80%	87%	87%	61%	24	134,393

El resumen del equipo incluye 10 unidades con una potencia nominal total de 2,446 HP. La eficiencia promedio (DM) es del 80%, con un factor de utilización (FU) promedio del 87%. El rendimiento global es de 134,393 CFM, con una distribución del flujo de aire variada entre los diferentes equipos: SCOOPs (28%), Volquetes (22%), JUMBO (10%), SIMBA (6%) y Camionetas (4%).

e) Cálculo de requerimiento de aire por fugas QFu

Se consideró un factor del 15% para suplir el requerimiento por fugas en el sistema de ventilación de acuerdo con la normativa sectorial pertinente. Para ello, se obtuvo el subtotal de los requerimientos anteriores de 22,133 CFM, y se calculó el porcentaje requerido por fugas, el cual es de 31883 CFM.

Tabla 26. Cálculo de requerimiento de aire por fugas.

Descripción	Denominación	Valor	Unidad
Personal	QTr	7,204	CFM
Madera	Qma	0	CFM
Temperatura	Qte	46,043	CFM
Equipos	Qeq	94,306	CFM
Subtotal	QT1	147,553	CFM
Fugas 15%	Qfu	22,133	CFM

f) Cálculo de requerimiento de aire total

Por lo tanto, el requerimiento total del sistema de ventilación será de 169,686 CFM.

Tabla 27. Cálculo de requerimiento de aire total.

Descripción	Denominación	Caudal de aire (CFM)
Personal	QTr	7,204
Madera	Qma	0
Temperatura	Qte	46,043
Equipos	Qeq	94,306
Fugas 15%	Qfu	22,133
TOTAL	Qto	169,686

El desglose del caudal de aire en CFM se presenta de la siguiente manera: para el personal se asignan 7,204 CFM, mientras que para la madera no se asigna caudal. La temperatura requiere un caudal de 46,043 CFM y los equipos requieren 94,306 CFM. Se estima que las fugas representan el 15% del total, con un caudal de 22,133 CFM. El caudal total de aire es de 169,686 CFM.

Descripción de las estaciones de medición del flujo de aire

La unidad minera tiene instaladas 3 estaciones de monitoreo para la medida y control del caudal de aire de ingreso y salida, estas estaciones permitirán realizar el balance de aire en relación con el aire requerido calculado en el apartado anterior.

Tabla 28. Ubicación de las estaciones de monitoreo de entrada y salida de aire.

Estación	Ubicación	Labor	Descripción	Caudal (m3/min)	Caudal (CFM)
EVC-01	Nv.552	RP-001	Bocamina entrada aire de aire fresco	3,705.88	130,872.00
EVC-02	Nv.490	RC-01	Chimenea Raise Climber N°1 para salida de aire viciado	2,034.96	71,864.00
EVC-03	Nv.426	RC-02	Chimenea Raise Climber N°2 para salida de aire viciado	1,724.92	60,915.00

Balance de aire

La información anterior suministrada por el área de planeamiento permite realizar una relación entre los caudales de entrada y salida a mina, y la necesidad de la ventilación determinada con respecto al Reglamento de Seguridad como también Salud Ocupacional en Minería, lo que resulta en una cobertura del 77.13% del caudal de aire requerido para el desarrollo de las operaciones en mina (ver tabla 29)

Tabla 29. Balance de aire en mina.

Distribución de Aire	m3/min	Cfm
Total, de aire requerido	4,804.97	169,686.25
Ingreso de aire	3,705.88	130,872.00
Salida de aire	3,759.88	132,779.00
Cobertura (%)	-	77.13%
Déficit (cfm)	- 1,099.10	- 38,814.25

El déficit en la cobertura del 77.13% de aire se traduce en una diferencia de 38,814 cfm, lo que representa en un incumplimiento de la norma sectorial en minería D.S.024-2016-EM y su reforma D.S. 0.23-2017-EM.

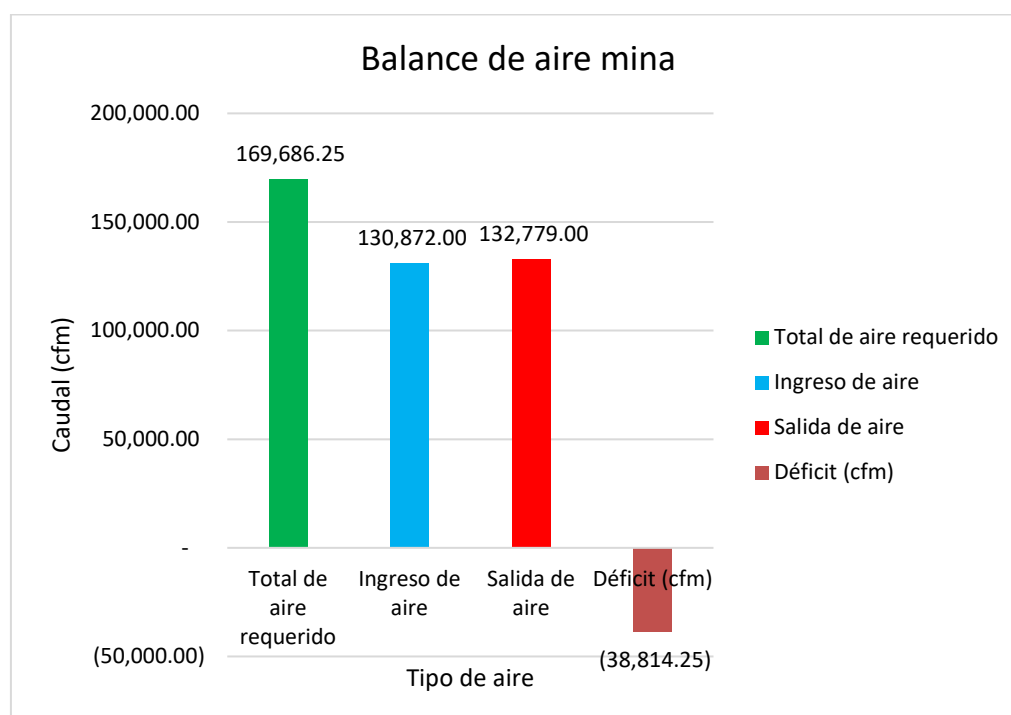


Figura 12. Representación balance de aire mina.

La figura muestra que el sistema de ventilación tiene un déficit significativo en la provisión de aire, con una cobertura del 77.13%. Esto indica que el aire disponible (sumando ingreso y salida) no es suficiente para cubrir completamente las necesidades del sistema. El déficit es considerable, tanto en m³/min como en cfm, lo que sugiere que se deben tomar medidas para aumentar la cantidad de aire ingresado o reducir el aire requerido para alcanzar una cobertura adecuada.

Estaciones de monitoreo secundarias para el caso de estudio

La valoración del sistema de ventilación actual requirió la medición de parámetros de ventilación, calor y gases producidos por las explosiones en sitios estratégicos para poder así evidenciar las mejoras en el sistema a partir de la fabricación de la chimenea Raise Climber N°3. Es así como se seleccionaron 03 estaciones secundarias para el monitoreo de parámetros en diferentes niveles de la mina, los mismos se describen con mayor detalle a continuación (ver tabla 30).

Tabla 30. Descripción de estaciones secundarias.

N° Estación	Nivel	Labor	Observaciones
EM-1	426	ST-093	A 43 metros de CH RC N°2 y a 50 metros de Rampa de profundización Nv 426
EM-2	440	ST-081	A 82 metros de proyecto CH RC N°3 y tajeos de explotación Nv 440
EM-3	503	ST-072	A 80 metros de CH RC N°1 y tajeos de explotación Nv 503

4.3.6 Simulación del sistema de ventilación

Calibración del modelo de ventilación en Ventsim Design

Para la creación de un modelo de las operaciones en la unidad minera se utilizó el archivo de modelado de labores, facilitado por el área de planeamiento. Este modelo se actualiza y valida utilizando información basada en la topografía minera. Después de crear los ejes centrales e importarlos al software Ventsim en archivos DXF, se procede a ajustar el modelo dentro del software.

La calibración del modelo requiere datos como la altitud, temperatura, densidad, presión y otros parámetros específicos del lugar de la mina. Estos datos son esenciales para que el modelo pueda realizar simulaciones y diseños que se asemejen lo más posible a la realidad. Igualmente, el flujo de aire que circula pasando por las redes de ventilación esbozadas, debe coincidir con los valores evaluados en el sitio en condiciones reales, estos se presentan a continuación:

Medio ambiente	
[RESET]	No
Aire densidad de flujo compresibl	1,13 kg/m³
Ajuste temperatura superficie	Si
Año actual	2023
Calor específico de la roca	790,0 J/kgC
Conductividad Térmica de la roca	2,00 W/mC
Densidad de la roca (Opcional si	2.700 kg/m³
Densidad del Aire en la red	1,13 kg/m³
Difusividad térmica de la roca	0,938 m²/s 10-6
Edad del conducto de aire	5,000 años
Elevación superficial de la rejilla	539,4 m
Fracción de la humedad de la roc	0,6
Gradiente geotérmico	1,2 C/100m
Presión barométrica en la superfi	96,6 kPa
Superficie atmosférica tasa de lap	6,4 C/1000m
Superficie de referencia de hume	39,7 R
Superficie de referencia elevaciór	404,7 m
Temperatura de la roca superfici	25,0 C
Temperatura del bulbo húmedo ei	17,0 C
Temperatura del bulbo seco en la	23,0 C

Figura 13. *Input de datos de entrada en software de simulación.*

Grado de correlación en modelo de ventilación

Para garantizar que las velocidades del flujo de aire coincidieran con las mediciones en el campo, se implementaron diversas medidas de regulación, como puertas, reguladores, obstrucciones y cortinas, que se incorporaron al software Ventsim mediante sus herramientas de edición. Una vez que se completó el modelo con todos los detalles, se llevó a cabo una verificación del flujo de aire, contrastado los resultados logrados por la simulación por medio de los datos reales de la mina (correlación). En teoría, si la variación es menor al 10%, se considera que el modelo se asemeja al circuito de ventilación de la mina, siendo aún mejor si la diferencia es cercana al 3%.

Tabla 31. Correlación de modelo Ventsim.

Estación	Ubicación	Labor	Caudal campo (cfm)	Caudal Ventim (cfm)	Distrib. %
EVC-01	Nv.552	RP-001	130,872.00	130,904.00	0.0%
EVC-02	Nv.490	RC-01	71,864.00	70,991.00	1.2%
EVC-03	Nv.426	RC-02	60,915.00	59,104.00	3.0%
Total, entrada de aire			130,872.00	130,904.00	0.0%
Total, salida de aire			132,779.00	130,095.00	2.0%

Resultados de ventilación en la situación actual de la mina

La simulación del estado actual del yacimiento minero se realiza con por el motivo de la medición de valores de caudal y velocidad de aire, temperatura de bulbo húmedo, y tiempos de ventilación en la reducción de concentración de gases de voladura NOx en las estaciones de monitoreo ubicadas estratégicamente en estocadas.

Tabla 32. Resultados de simulación de modelo Ventsim situación actual.

Nº estación	Caudal de aire (CFM)	Velocidad de aire(m/min)	T(°C)	Tiempo de ventilación(min)	Tiempo de ventilación(min)	Concentración NO (ppm)	Concentración NO2(ppm)
EM-1	28,248	66	20	717	12	0.95	0.49
EM-2	16,475	38	20	3,644	61	0.95	0.49
EM-3	12,852	30	21	3,431	57	0.95	0.49

a) Simulación de ventilación

Los resultados muestran deficiencias en el caudal de aire fresco suministrado en los principales niveles de explotación y desarrollo, así como velocidades de aire mayores al normado de 30 m/min.

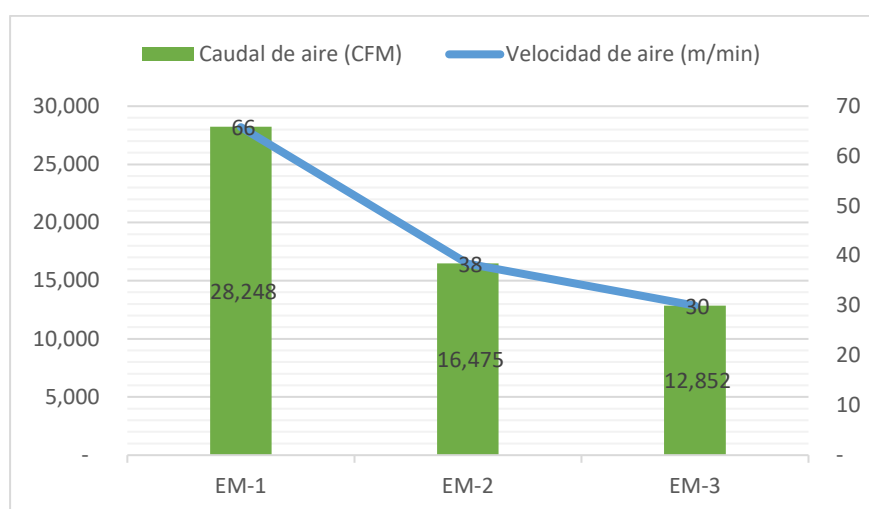


Figura 14. Resultados simulación ventilación situación actual.

b) Simulación de calor

Se perciben valores de temperatura superiores a 28° en los niveles de explotación 440 y 503 de la mina; asimismo, en el desarrollo de la rampa de profundización en el nivel 416, en los cuales

se encuentran trabajando equipo Scoop TORO y R1600H en conjunto con volquetes en la limpieza y transporte de material, los cuales son los principales generadores de calor en estas áreas.

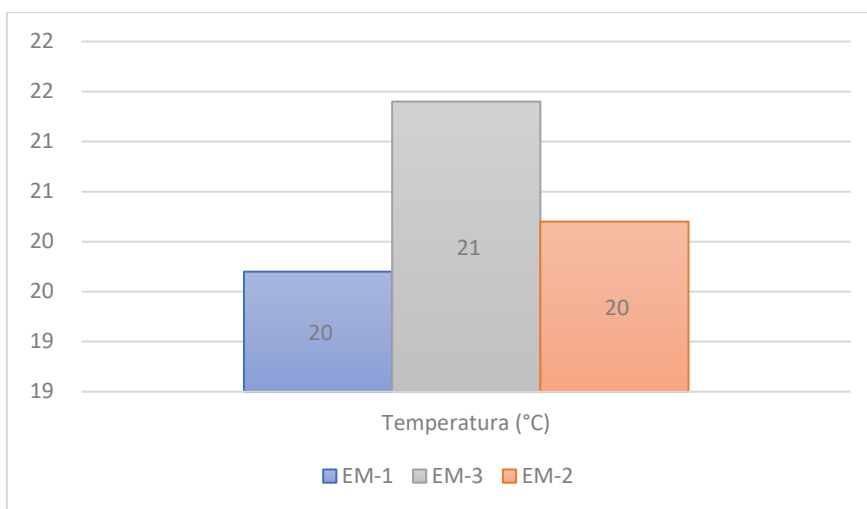


Figura 15. Resultados simulación calor situación actual.

c) Simulación de contaminantes

Además, se realizó una simulación de contaminantes de gases de voladura en disparos de tajeos de los niveles de explotación Nv 440 y Nv503, así como los disparos ejecutados en la rampa de profundización Nv 416, con aplicación de la emulsión encartuchada en cantidades promedio de 90 kg/disparo y 150 kg/disparo. Los resultados obtenidos se presentan en términos de concentración de gases NO y NO₂; asimismo, se determina el tiempo mínimo de ventilación en minutos con base en la concentración de NO por debajo del TLE de este agente considerado como 0.5 ppm.

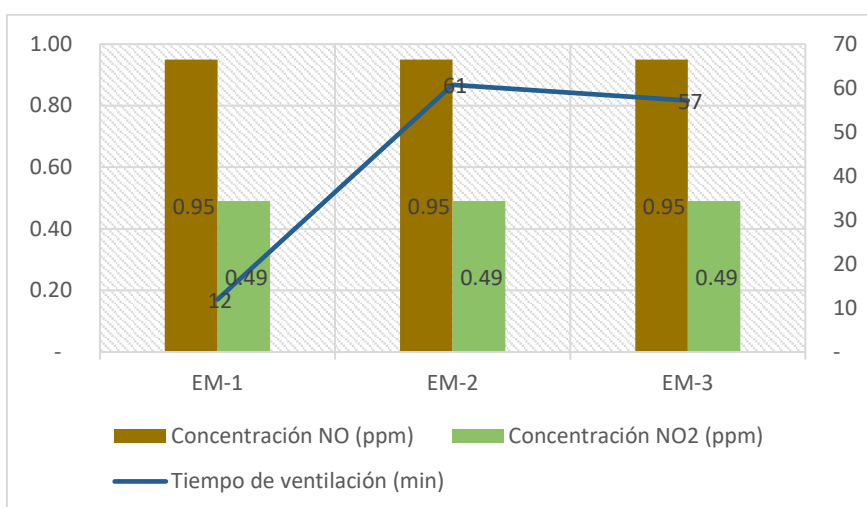


Figura 16. Resultados simulación contaminantes situación actual.

Las respuestas en la concentración de gases de voladura se presentan en el software en una relación de tiempo en segundos de ventilación con un grado de dispersión alta y la concentración en parte por millón (ppm) de estos agentes.

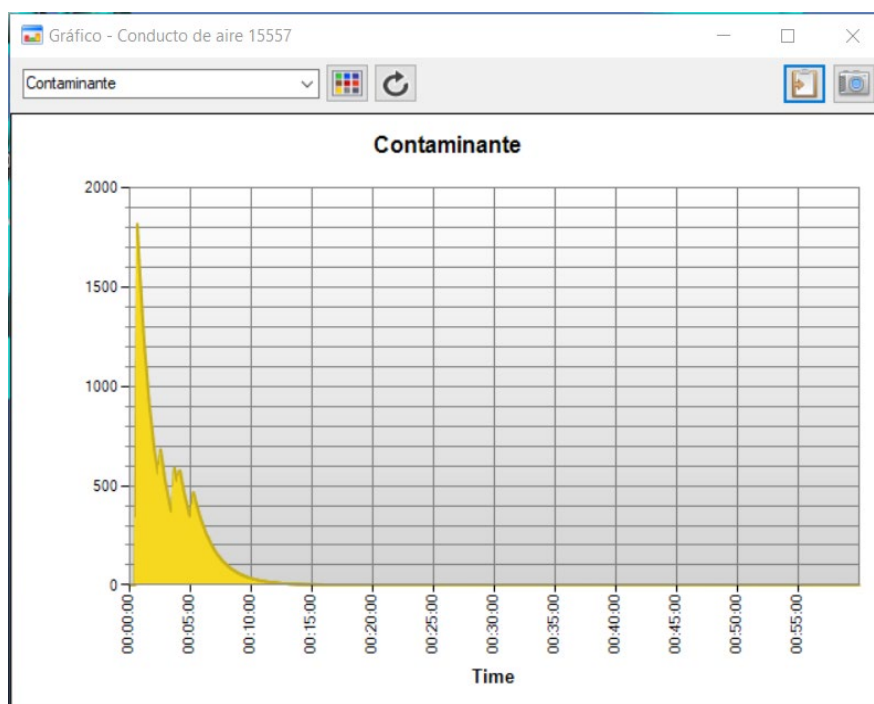


Figura 17. *Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-1 situación actual.*

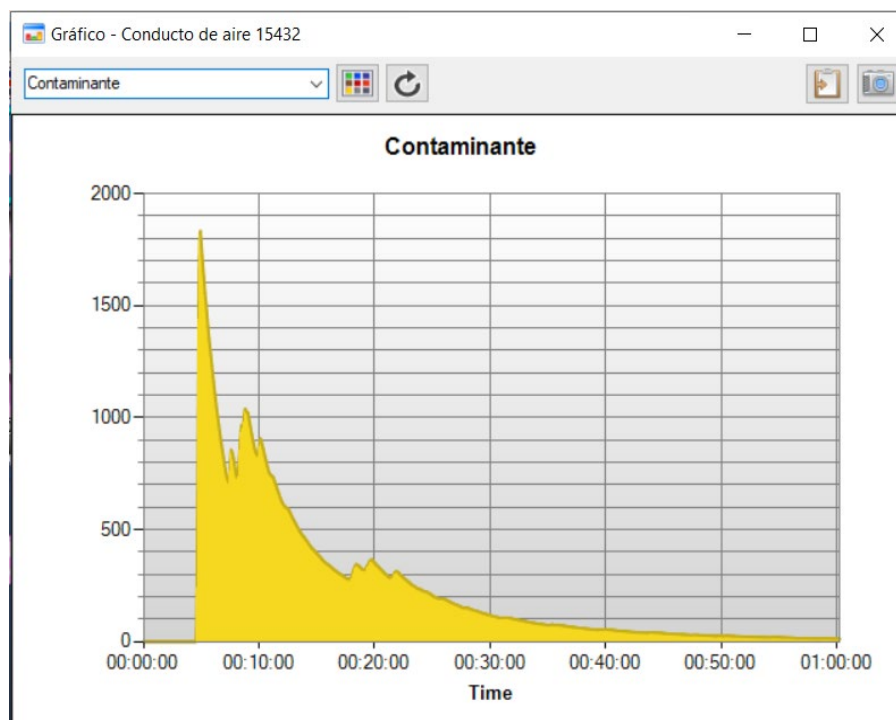


Figura 18. *Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-2 situación actual.*

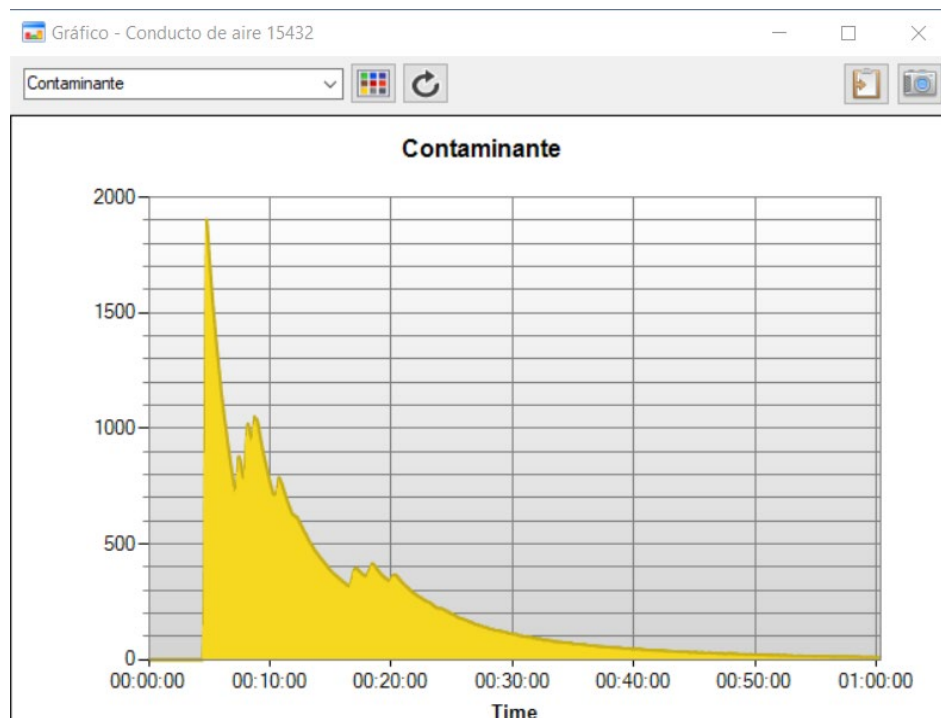


Figura 19. Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-3 situación actual.

d) Resumen del circuito de ventilación en el estado actual

Tabla 33. Resumen de resultados circuito de ventilación actual.

Flujos de aire compresible	Si
La presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapas	0: ETAPA INICIAL O BASE
Todos los conductos de aire	511
Actual etapas conductos	488
Segmentos de etapa actual	195
Longitud total	5,800.6 m
Caudal de aire total de admisión	131,055 cfm
Caudal de aire total de escape	130,067 cfm
Flujo de masa total	69.14 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0,10360 Ns ² /m ⁸
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	0,42123 Ns ² /m ⁸
Resumen de potencia	
Potencia del AIRE (pérdida por fricción)	98.5 hp Total 5.0 hp Chimenea 19.2 hp Conducir 74.3 hp Conducto de ventilación
Refrigeración Potencia de entrada	0.0 hp
Potencia eléctrica de ENTRADA	227.0 hp
Costo de energía anual de la red	\$ 147.68
Eficiencia de la red	57,8 R

Resultados de ventilación con la construcción de la CH RC3

A continuación, se presenta un resumen los resultados obtenidos en la simulación de ventilación, calor y gases de voladura considerando el desarrollo de la chimenea Raise Climber N°3.

Tabla 34. Parámetros de ventilación y calor en el sistema de ventilación con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3.

N° Estación	Caudal de aire (CFM)	Velocidad de aire (m³/min)	T (°C)	Tiempo de ventilación (s)	Tiempo de ventilación (min)	Concentración NO (ppm)	Concentración NO2 (ppm)
EM-1	39,733	93	20	254	4	0.94	0.49
EM-2	18,464	43	20	418	7	0.94	0.49
EM-3	10,523	25	21	-	-	-	-

Con respecto a los productos alcanzados en el cuadro anterior, se nota un incremento en los caudales de las estaciones de monitores, así como una mejora considerable en los niveles de temperatura de las labores. Por otro lado, la construcción estratégica de la chimenea de ventilación propicia la rápida evacuación de gases producto de la voladura, especialmente en los niveles 440 y 490, debido a que estos conectan con la estructura de desfogue de aire viciado.

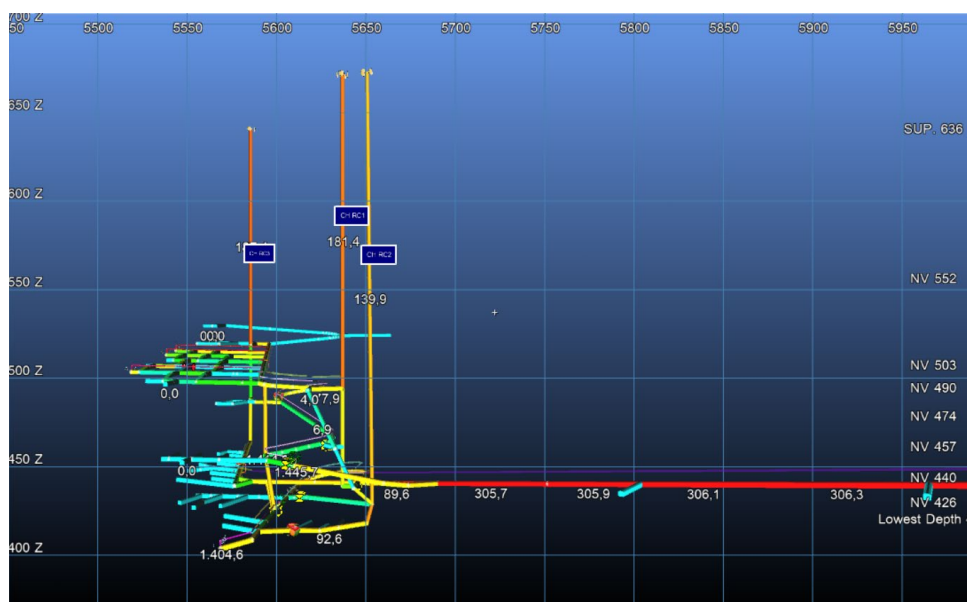


Figura 20. Sistema de ventilación con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3.

a) Simulación de ventilación

La implementación de la nueva chimenea Raise Climber propició el incremento del caudal de aire en las estaciones de seguimiento por sobre los 30000 cfm y en cumplimiento de la velocidad en límite inferior es de 30 m/min. La obtención de estos resultados fue gracias a un

ajuste en los elementos de las redes de ventilación, especialmente en los niveles 416 y 440 en el cual se realizó la reubicación y reajuste de ángulo de álabes del ventilador VAV-45 desde la rampa de captación de aire, la remoción de tramos de manga superiores a 100 metros lineales y la instalación de puertas y cortinas de ventilación como resistencias para propiciar la salida de aire viciado por la chimenea RC3.

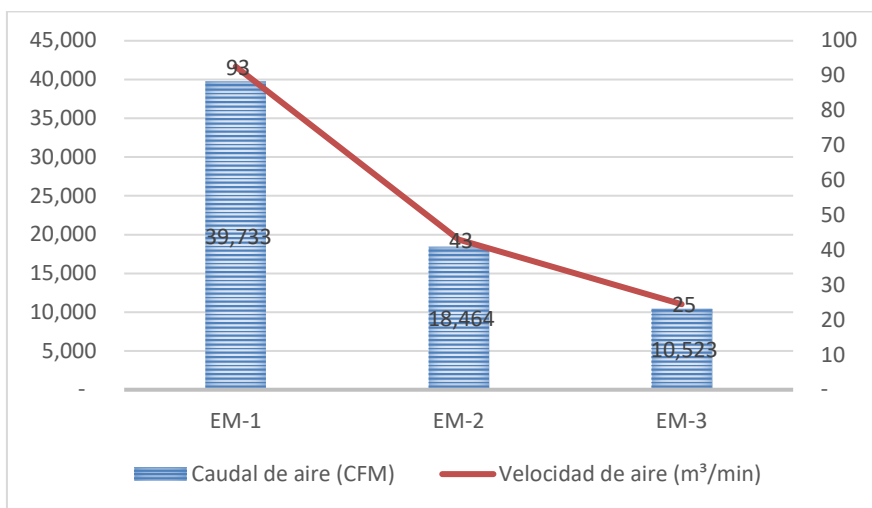


Figura 21. Resultados simulación ventilación situación luego de la chimenea RC3.

b) Simulación de calor

Los resultados de la simulación con la consideración de la chimenea RC3 traen consigo mejoras en los valores de temperatura percibidos en los niveles de estudio, logrando que la mayoría de ellos estén por debajo de los 29°C a pesar de que se consideraron el mismo inventario de ventiladores que posee la unidad minera, pudiendo cambiarse en proyectos a mediano y largo plazo por otros de mayor capacidad que logren la reducción de los valores de calor asociado a los trabajos de limpieza y transporte principalmente.

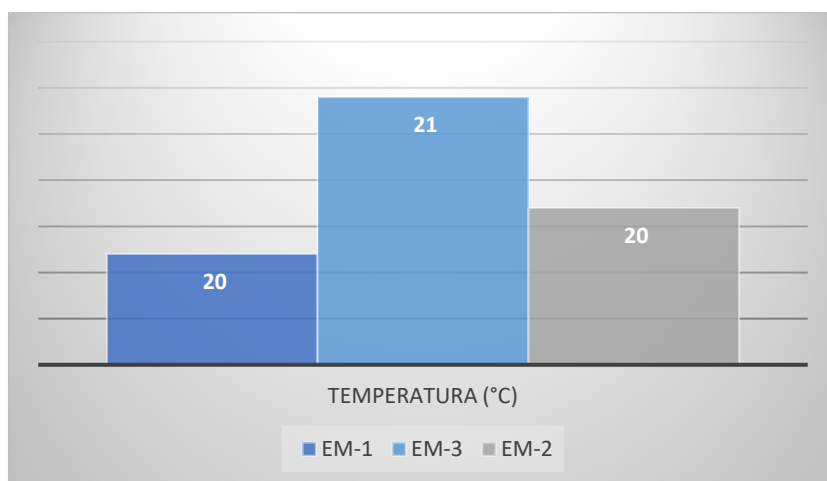


Figura 22. Resultados simulación calor situación actual luego de la chimenea RC3.

c) Simulación de contaminantes

Por otra parte, la simulación de contaminantes producto de las voladuras en los niveles de explotación Nv 440 y Nv503, así como los disparos ejecutados en la rampa de profundización Nv 416 bajo las mismas condiciones que en la situación actual de unidad minera, incluyendo el levantamiento de la nueva chimenea RC, arrojó tiempos de aireación menores a los 30 minutos en la mayoría de las labores, y un tiempo mínimo general de ventilación en la unidad minera cercano a los 60 minutos.

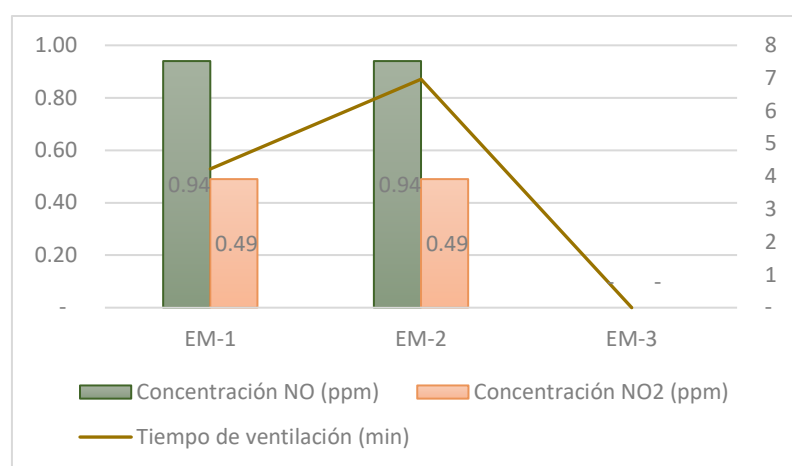


Figura 23. Concentración en partes por millón.

Asimismo, se presentan los resultados de concentración en partes por millón (ppm) de los contaminantes de voladura considerados para el estudio bajo las mismas condiciones del modelo presentado anteriormente de la mina actual.

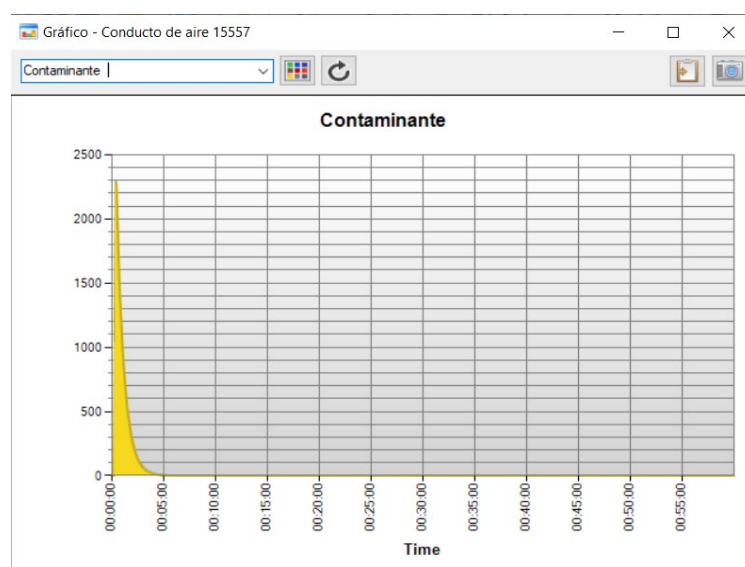


Figura 24. Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-1 situación luego de la chimenea RC3.

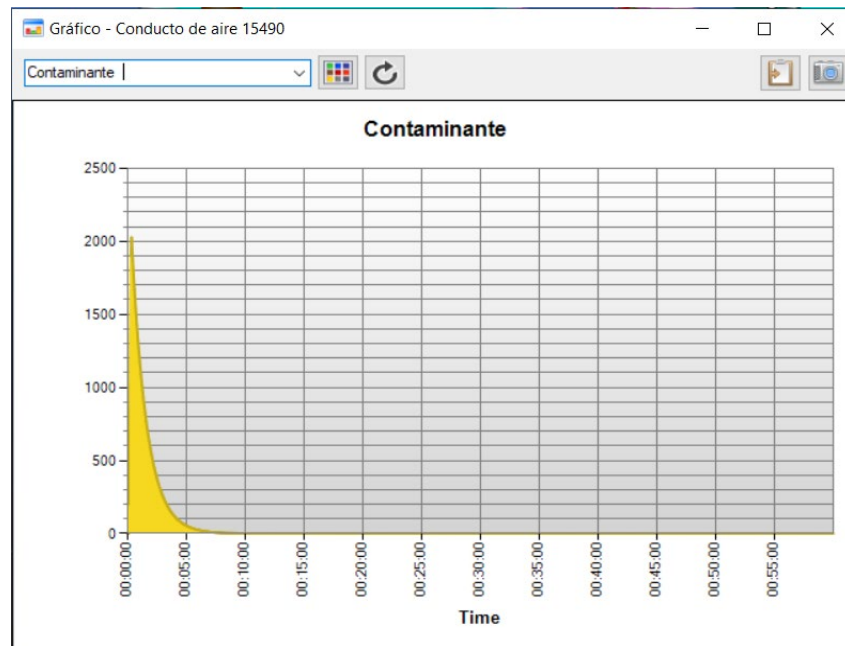


Figura 25. *Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-2 situación luego de la chimenea RC3.*

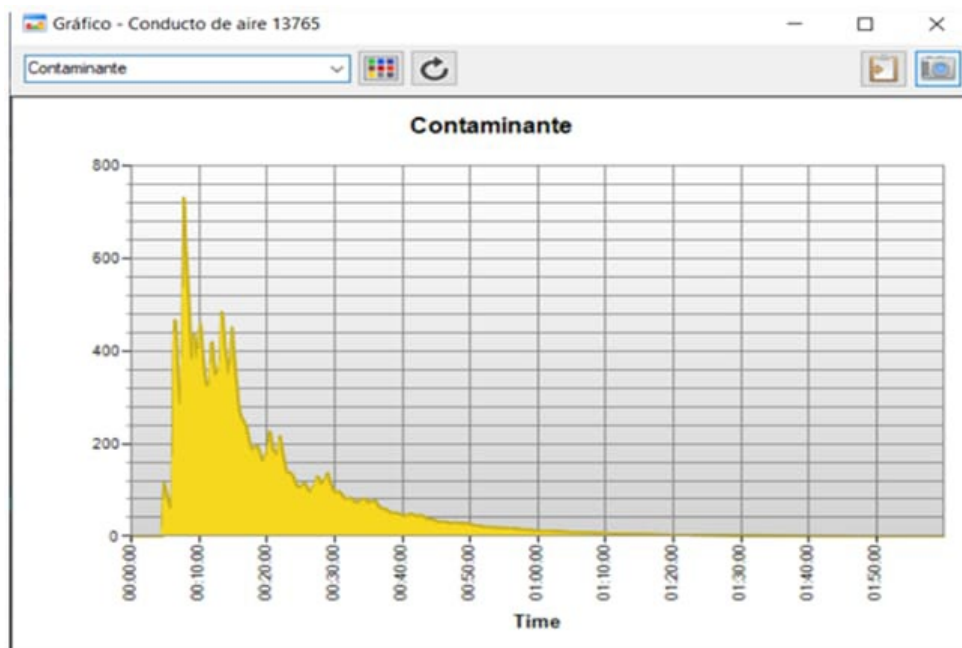


Figura 26. *Concentración de gases contaminantes no diluidos por escala de tiempo en estación EM-2 situación luego de la chimenea RC3.*

d) Resumen del circuito de ventilación en el estado actual

Tabla 35. Resumen de resultados circuito de ventilación considerando CH RC3.

Flujos de aire compresible	Si	
La presión de ventilación natural	Si	
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total	
Etapa	0: ETAPA FINAL CH RC 3	
Todos los conductos de aire		511
Actual etapa conductos		431
Segmentos de etapa actual		187
Longitud total	5,748.3m	
Caudal de aire total de admisión	134,228 cfm	
Caudal de aire total de escape	133,228 cfm	
Flujo de masa total	70.81 kg/s	
Resistencia de la mina (sin tubo)	0.09125 Ns ² /m ⁸	
Resistencia de la mina (incluyendo el conducto)	0.39911 Ns ² /m ⁸	
Resumen de potencia		
Potencia de Aire (perdida por fricción)	134.8 hp Total	
	2.8 hp Chimenea	
	28.1 hp Conducir	
	104.0 hp Conducto de ventilación	
Refrigeración potencia de entrada	0.0 hp	
Potencia eléctrica de entrada	227.2 hp	
Costo de energía anual de la red		\$143.71
Eficiencia de la red	59.3 R	

Mejora de la cobertura de aire

La cobertura de aire por niveles de producción posterior a la construcción de la chimenea es superior al estado actual de la unidad. Se tiene una mejora de hasta un 49% en el cumplimiento de la cobertura de aire promedio en los niveles de producción de unidad minera.

Tabla 36. Estudio de cobertura de aire en niveles de producción.

Nivel	Requerimiento	Caudal inicial	Caudal final	Cobertura inicial	Cobertura final
NV416	39,158	30000	55000	77%	140%
NV426	69,190	43000	45000	62%	65%
NV440	69,190	31000	37000	45%	53%
NV457	35,393	32000	32000	90%	90%
NV474	33,688	25000	50000	74%	148%
NV490	26,471	24000	65000	91%	246%
NV503	44,701	35000	55000	78%	123%
NV552	29,662	24000	37000	81%	125%
Promedio				75%	124%

La tabla 36 revela una mejora significativa en la cobertura de aire en los diferentes niveles de producción. El promedio de cobertura aumenta del 75% al 124%, con casos destacables como el NV490, que pasa de 91% a un extraordinario 246%, y el NV474, que se eleva del 74% al 148%. Niveles como NV457 mantienen una cobertura constante del 90%, mientras que otros muestran incrementos moderados, indicando una optimización diferencial del sistema de ventilación.

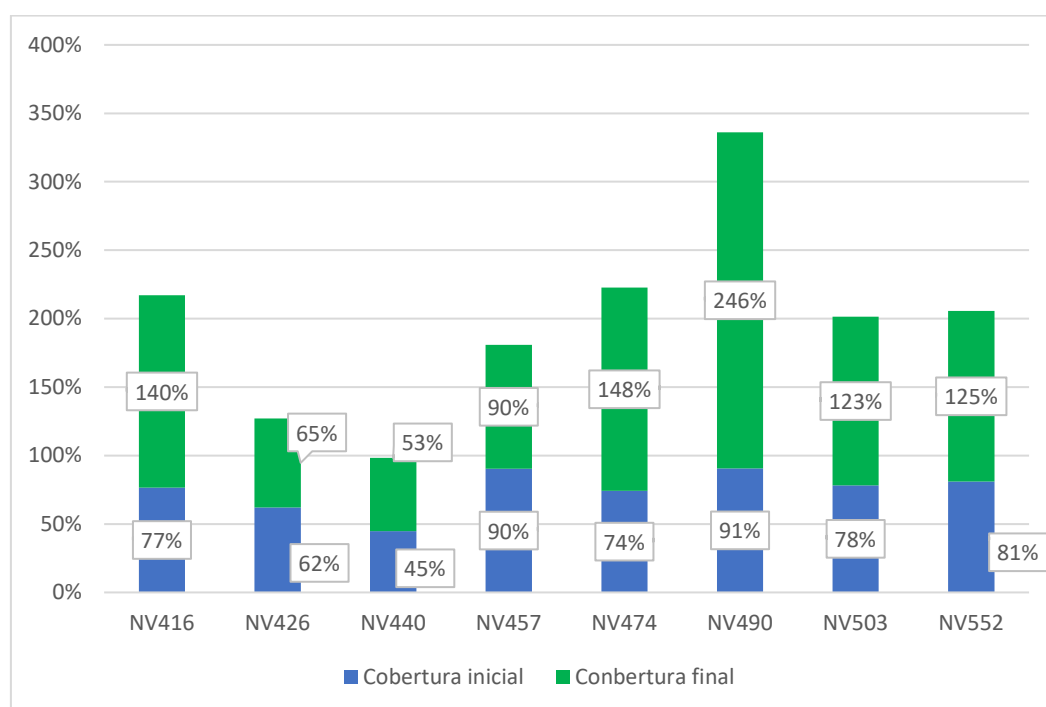


Figura 27. Relación de cobertura de aire por niveles.

La figura 27 visualiza claramente la evolución de la cobertura de aire en los diferentes niveles. Se observa un patrón ascendente que grafica el incremento de la eficiencia del sistema de ventilación, con barras que muestran el salto desde coberturas iniciales a coberturas finales, resaltando los niveles con mayores mejoras.

Asimismo, se tiene un análisis de la cobertura de aire en las principales labores de explotación y avances en la unidad minera de estudio (ver tabla 37).

Tabla 37. Estudio de cobertura de aire en tajeos de explotación y avance.

Labor	Tipo	Requerimiento	Caudal inicial	Caudal final	Cobertura inicial	Cobertura final
TJ4201E	Tajo	26,954	17000	30000	63%	111%
TJ4201W	Tajo	28,011	18000	31000	64%	111%
TJ4330E	Tajo	22,258	18000	33000	81%	148%
TJ5010W	Tajo	25,302	23000	37000	91%	146%
TJ6031E	Tajo	31,640	27000	23000	85%	73%
TJ5031W	Tajo	23,307	25000	34000	107%	146%
RP4160	Avance	30,552	17500	32000	57%	105%
Promedio					78%	120%

El análisis muestra una mejora generalizada en la cobertura de aire para tajeos y labores de avance, con un incremento promedio del 78% al 120%. Tajeos como TJ4330E y TJ5010W experimentan aumentos significativos del 81% al 148% y del 91% al 146%, respectivamente. La labor de avance RP4160 mejora del 57% al 105%, con un caso único de TJ6031E que muestra una reducción del 85% al 73%.

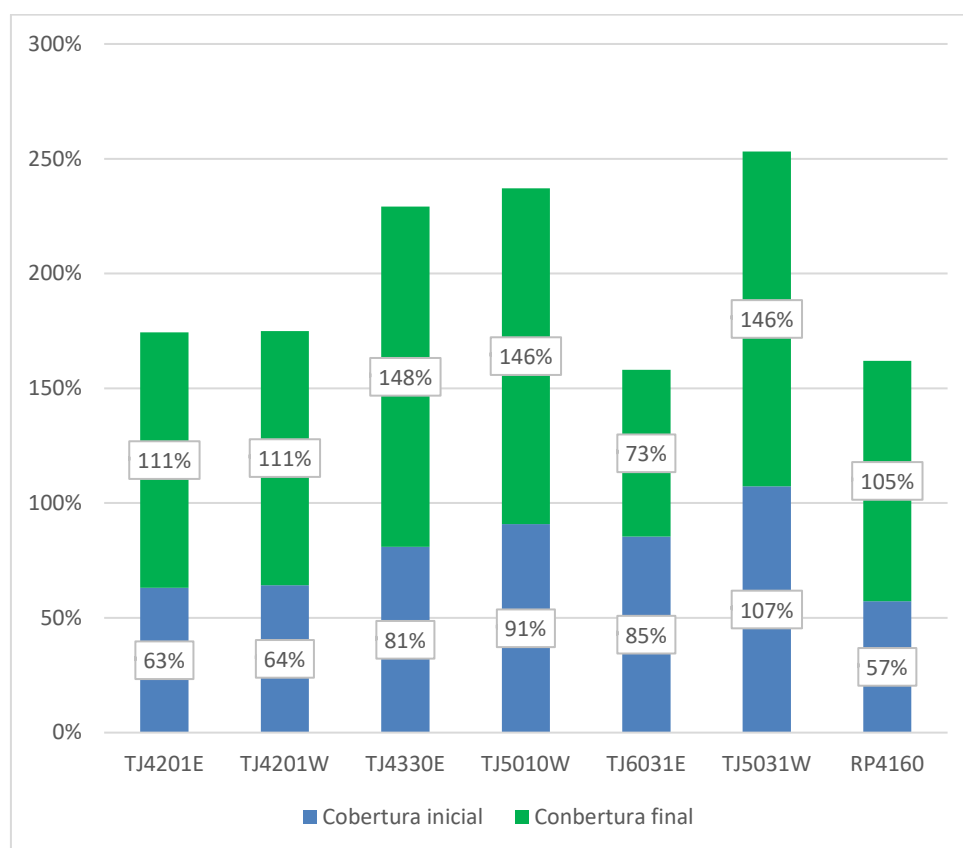


Figura 28. Relación de coberturas de aire por labor, elaboración propia.

La figura 28 complementa la tabla anterior, mostrando visualmente la variación en la cobertura de aire para cada labor. Los gráficos de barras ilustran claramente el incremento en la mayoría de las labores, con énfasis en los tajeos que experimentan mejoras más significativas.

La implementación de la CH Raise Climber N°3 mejora la cobertura de aire por niveles y por labores, teniendo especial mejora en los niveles con tajeos activos Nv. 440 y Nv. 503, además se tiene una clara mejora en la cobertura de aire en la rampa de profundización RP4160.

4.3.7 Valorización de la producción con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3

El desarrollo de la valorización de la producción por horas hombre se realizó considerando los rendimientos y parámetros de trabajo en el ciclo de minado de una muestra de labores de avance como el desarrollo de la rampa de profundización den el nivel 416 y la explotación de los tajeos de voladura de las categorías 440 y 490 de unidad minera.

Seguidamente, se mostrará el resultado de la valorización de la elaboración antes de la construcción de la chimenea Raise Climber.

Tabla 38. Valorización de la producción en la situación actual de la mina.

Descripción	Valorización producción Gdía/día		Unidad
	Frentes de avance	Tajeos de explotación	
N° Trabajadores por labor	6	10	und.
Volumen explotado por Gdía.	68	42.9	m ³
Cantidad de toneladas rotas	183.6	107.1	TM
Capacidad equipo de carguío	4.6	6	m ³
Capacidad equipo de acarreo	18	18	m ³
T. de transporte (ida y regreso)	80	70	min
N° de ciclos carguío	13.3	6.4	C/gdía
N° de ciclos transporte	3.8	2.4	C/gdía
Tiempo de ventilación	90.0	90.0	min
Tiempo total de limpieza	199.6	96.4	min
Tiempo total de operación	9.7	7.8	h
Producción Horas Hombre	3.17	1.38	TM/HH

Esta tabla 38 se presentan los parámetros de producción antes de la implementación de la chimenea, con una producción por horas-hombre de 3.17 TM/HH en frentes de avance y 1.38 TM/HH en tajeos de explotación. Los tiempos de operación son de 9.7 horas para frentes de avance y 7.8 horas para tajeos, con tiempos de transporte de 80 y 70 minutos, respectivamente.

Por otro lado, al incorporar los nuevos rendimientos obtenidos en la parte de la aireación por la fabricación de la chimenea RC N°3, se logran obtener resultados más favorables debido al recorte de tiempos de espera en la ventilación de labores.

Tabla 39. Valorización de la producción con la construcción de la chimenea Raise Climber N°3.

Descripción	Valorización producción Gdia/día		
	Frentes de avance	Tajeos de explotación	Unidad
N° Trabajadores por labor	6	10	und.
Volumen explotado por Gdia.	68	42.9	m³
Cantidad de toneladas rotas	183.6	107.1	TM
Capacidad equipo de carguío	4.6	6	m³
Capacidad equipo de acarreo	18	18	m³
T. de transporte (ida y regreso)	50	60	min
N° de ciclos carguío	13.3	6.4	C/gdía
N° de ciclos transporte	3.8	2.4	C/gdía
Tiempo de ventilación	60.0	60.0	min
Tiempo total de limpieza	159.7	77.1	min
Tiempo total de operación	8.0	6.8	h
Producción Horas Hombre	3.83	1.58	TM/HH

En la tabla 39 se evidencia que posterior a la construcción de la chimenea, se observa una mejora en la producción por horas-hombre: 3.83 TM/HH en frentes de avance y 1.58 TM/HH en tajeos. Los tiempos de operación se reducen a 8.0 y 6.8 horas, con disminución en tiempos de transporte a 50 y 60 minutos.

Tabla 40. Resumen de valorización de producción de personal en ambas situaciones de estudio.

Estado	Producción (TM/HH)	
	Frentes de avance	Tajeos
Actual	3.17	1.38
Construcción CH RC3	3.83	1.58
Variación (%)	21%	15%

La tabla 40 muestra un incremento del 21% en frentes de avance y 15% en tajeos, confirmando la mejora operativa tras la construcción de la chimenea.

Conforme a las respuestas producidas, se percibe un incremento de la producción por horas hombre de hasta un 15% en la explotación de tajeos de explotación y un incremento considerable de hasta un 21% en labores de desarrollo.

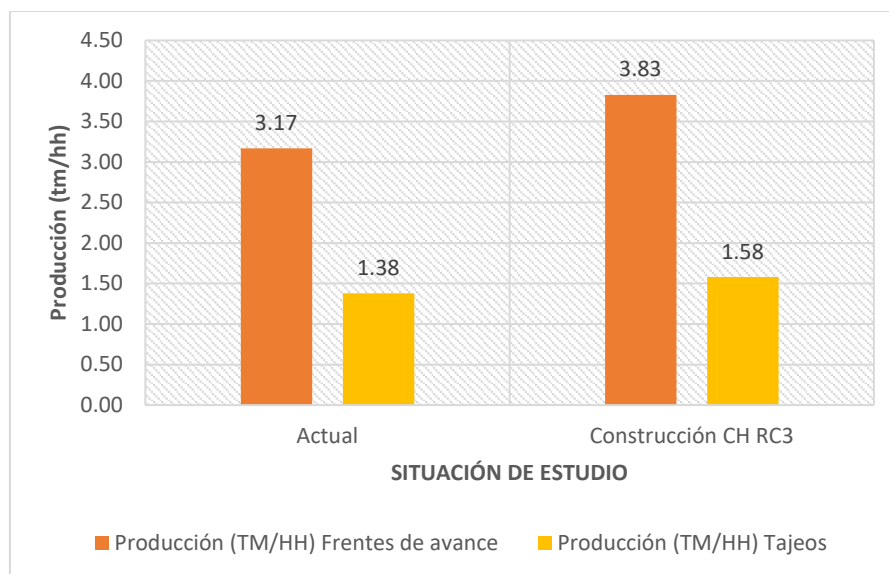


Figura 29. Representación de la comparación de la valorización en ambas situaciones de estudio EM-3.

La figura 29 representa gráficamente el incremento en la producción por horas-hombre, visualizando el salto en eficiencia entre la situación inicial y posterior a la construcción de la chimenea.

4.3.8 Tiempo de construcción del proyecto de la chimenea Raise Climber N°3

La construcción de la chimenea RC3 considera el trabajo en 03 guardias de trabajo, con disparos únicos por guardia de avances de 2.08 m eficaces. Considerando ello, se plantea un total de 113 días de excavación de la longitud total de 235 metros con las que contará la chimenea.

Tabla 41. Determinación del número de días de excavación de la CH RC3.

Longitud total perforación	235
Avance por disparo	2.08
N° guardias por día	3
Horas por guardia	8
Disparo por guardia	1
Días por mes	30
Total, N°disparos	113
Total, de horas excavación	2712
Total, de días excavación	113
Total, de meses de construcción	3.8

En la tabla 41 se detalla el proceso de excavación de 235 metros de longitud, con un avance de 2.08 m por disparo, utilizando 3 guardias diarias. El total es de 113 días de excavación, 2,712 horas de trabajo, y 3.8 meses de construcción.

Por otra parte, de acuerdo con registros históricos en la fabricación de chimeneas Raise Climber en la unidad minera se plantean un requerimiento de 08 días adicionales en los trabajos de movilización y montaje de la indumentaria Alimak STH-5E, el sellado de piloto de la chimenea, y el desmontaje y de movilización de este fuera de mina. En ese sentido, se propone, de acuerdo con el planteamiento del área de proyectos mina en concordancia con las disposiciones del área de coordinación y dirección, iniciar con la construcción de la chimenea el 16/11 del 2023, con una plaza de culminación de 121 días de trabajo por la contrata asignada con fecha de culminación el 18/11 del periodo 2024, a fin de corresponder con los planes de minado que se originen para este periodo.

Tabla 42. Descripción de los plazos de construcción de la CH RC3 por etapas.

Actividad	Días	Comienzo	Fin
Movilización equipo Alimak a mina	2	16/11/2023	18/11/2023
Sellado de piloto	1	18/11/2023	20/11/2023
Montaje de equipo	2	20/11/2023	21/11/2023
Excavación de chimenea	113	21/11/2023	13/3/2024
Desmontaje de equipo Alimak	2	13/3/2024	15/3/2024
Desmovilización	1	15/3/2024	16/3/2024
Días totales de construcción CH RC°3	121	16/11/2023	16/3/2024

En la tabla 42 se presenta el cronograma detallado de construcción, desde la movilización del equipo (16/11/2023) hasta la desmovilización (16/3/2024), con un total de 121 días de trabajo.

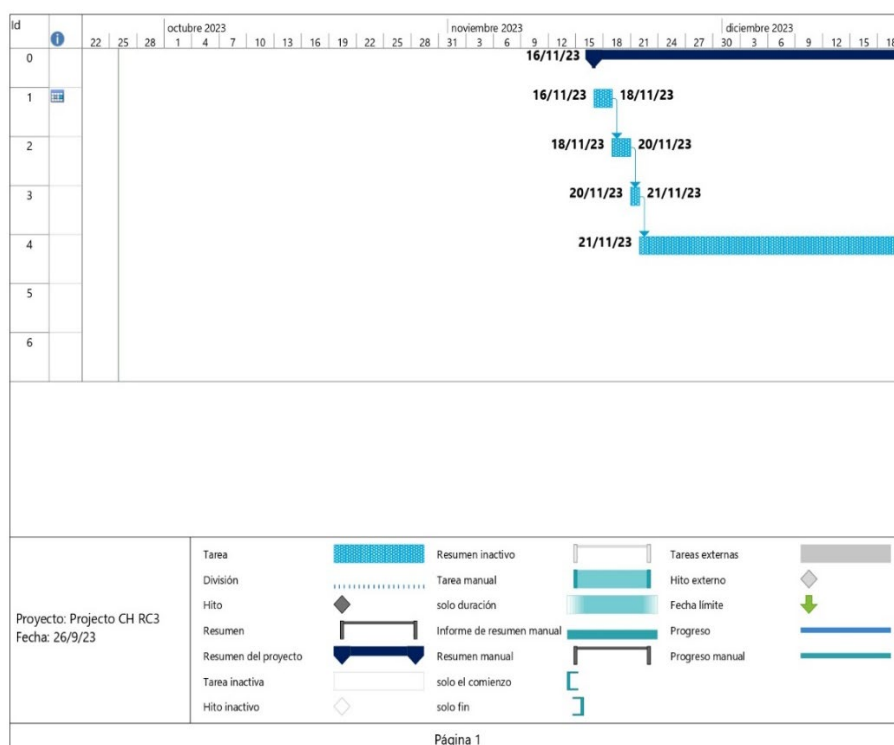


Figura 30. Primera parte del diagrama Gantt en el desarrollo del proyecto de construcción de la CH RC3.



Figura 31. Primera parte del diagrama Gantt en el desarrollo del proyecto de construcción de la CH RC3.

Las figuras 30 y 31 representan visualmente la secuencia y duración de cada etapa del proyecto de construcción de la chimenea, facilitando la comprensión del proceso constructivo y su timeline.

4.4 Prueba de hipótesis

4.4.1 Hipótesis general

La ejecución de la chimenea de ventilación mediante equipo Alimak es viable:

- a) Para la productividad, la construcción la chimenea CH RC3 permitirá incrementar la producción en 0.66 TM/HH en las labores de avance y en 0.20 TM/HH en la producción de tajeos.

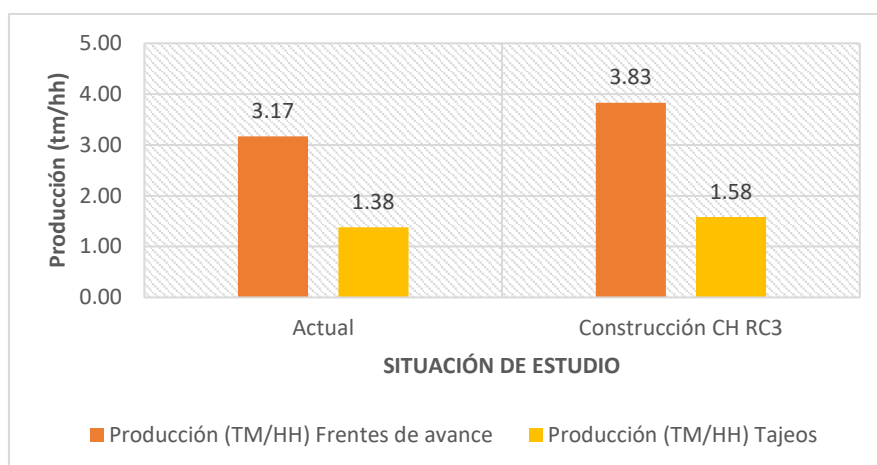


Figura 32. Producción (TM/HH) para cada situación de estudio.

Para la extracción de aire viciado; se incrementó el caudal de ingreso y salida de aire gracias a la ejecución de la chimenea CH RC3 en 4,459 cfm y 3,888 cfm respectivamente.

Tabla 43. Resumen del circuito de ventilación actual.

Parámetro	Consideración	
Flujos de aire compresible	Si	
La presión de ventilación natural	Si	
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total	
Etapa	1: ETAPA INICIAL O BASE	
Todos los conductos de aire		511
Actual etapa conductos		488
Segmentos de etapa actual		195
Longitud total	5,800.6 m	
Caudal de aire total de admisión	131,055 cfm	
Caudal de aire total de escape	130,067 cfm	
Flujo de masa total	69.14 kg/s	
Resistencia de la mina (sin tubo)	0,10360 Ns^2/m^8	
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	0,42122 Ns^2/m^8	

La tabla 43 detalla un sistema de ventilación complejo con características fundamentales de compresibilidad y presión natural, utilizando el método de presión total para simulación. La configuración inicial presenta 511 conductos de aire, con 488 conductos activos y 195 segmentos, desarrollándose en una longitud total de 5,800.6 metros. El circuito muestra un equilibrio casi perfecto entre el caudal de aire de admisión (131,055 cfm) y el de escape (130,067 cfm), con un flujo de masa total de 69.14 kg/s, mientras que la resistencia de la mina varía entre 0.10360 Ns^2/m^8 sin tubo y 0.42122 Ns^2/m^8 con conducto, indicando una eficiente gestión de la circulación de aire subterráneo.

Tabla 44. Resumen del circuito de ventilación con la CH-RC3.

Parámetro	Consideración
Flujos de aire compresible	Si
La presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapas	0: ETAPA FINAL CH RC N3
Todos los conductos de aire	511
Actual etapas conductos	431
Segmentos de etapa actual	187
Longitud total	5,748.3 m
Caudal de aire total de admisión	134,228 cfm
Caudal de aire total de escape	133,412 cfm
Flujo de masa total	70.81 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0,09125 Ns^2/m^8
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	0,39911 Ns^2/m^8

El análisis de este circuito revela una optimización del sistema de ventilación tras la implementación de la chimenea RC3, manteniendo las mismas características de compresibilidad y presión natural. La etapa final muestra una ligera mejora en los parámetros: de 511 a 431 conductos activos, con 187 segmentos distribuidos en 5,748.3 metros. Se observa un incremento en el caudal de aire, pasando de 131,055 a 134,228 cfm en la admisión y de 130,067 a 133,412 cfm en el escape, con un aumento del flujo de masa de 69.14 a 70.81 kg/s. La resistencia de la mina disminuye de 0.10360 a 0.09125 Ns^2/m^8 sin tubo, y de 0.42122 a 0.39911 Ns^2/m^8 con conducto, lo que sugiere una mejora en la eficiencia de ventilación y un flujo de aire más optimizado.

4.4.2 Hipótesis específicas

H1. La construcción de la chimenea Raise Climber mejora la cobertura de aire en la unidad minera.

Tabla 45. Cobertura de aire en los niveles de producción.

Nivel	Requerimiento	Caudal inicial	Caudal final	Cobertura inicial	Cobertura final
NV416	39,158	30000	55000	77%	140%
NV426	69,190	43000	45000	62%	65%
NV440	69,190	31000	37000	45%	53%
NV457	35,393	32000	32000	90%	90%
NV474	33,688	25000	50000	74%	148%
NV490	26,471	24000	65000	91%	246%
NV503	44,701	35000	55000	78%	123%
NV552	29,662	24000	37000	81%	125%
Promedio				75%	124%

La tabla 45 revela una mejora significativa en la cobertura de aire en los diferentes niveles de producción, con un incremento promedio del 75% al 124%. Niveles como el NV490 muestran un salto extraordinario, pasando de una cobertura del 91% a un impresionante 246%, mientras que niveles como NV457 mantienen una cobertura constante del 90%. La variabilidad en la cobertura sugiere una optimización diferencial del sistema de ventilación, que permite una distribución más eficiente del aire en los niveles subterráneos, mejorando potencialmente las condiciones de seguridad y operatividad.

Tabla 46. Cobertura de aire en los tajeos de explotación y labores de avance.

Labor	Tipo	Requerimiento	Caudal inicial	Caudal final	Cobertura inicial	Cobertura final
TJ4201E	Tajo	26,954	17000	30000	63%	111%
TJ4201W	Tajo	28,011	18000	31000	64%	111%
TJ4330E	Tajo	22,258	18000	33000	81%	148%
TJ5010W	Tajo	25,302	23000	37000	91%	146%
TJ6031E	Tajo	31,640	27000	23000	85%	73%
TJ5031W	Tajo	23,307	25000	34000	107%	146%
RP4160	Avance	30,552	17500	32000	57%	105%
Promedio					78%	120%

El análisis de esta tabla 46 evidencia una mejora generalizada en la cobertura de aire para tajeos y labores de avance, con un incremento promedio del 78% al 120%. Tajeos como TJ4330E y TJ5010W experimentan aumentos significativos, pasando del 81% al 148% y del 91% al 146%, respectivamente. Un caso notable es el TJ6031E, que muestra una ligera reducción del 85% al 73%, lo que podría indicar la necesidad de ajustes específicos. La labor de avance RP4160

también mejora considerablemente, de un 57% a un 105% de cobertura, sugiriendo una optimización global del sistema de ventilación.

H2. La construcción de la chimenea mejora la producción por hora-hombre respecto a la valorización.

Tabla 47. Valorización de producción inicial.

Descripción	Valorización producción Gdía/día		
	Frentes de avance	Tajeos de explotación	Unidad
Nº Trabajadores por labor	6	10	und.
Volumen explotado por Gdía.	68	42.9	m ³
Cantidad de toneladas rotas	183.6	107.1	TM
Capacidad equipo de carguío	4.6	6	m ³
Capacidad equipo de acarreo	18	18	m ³
T. de transporte (ida y regreso)	80	70	min
Nº de ciclos carguío	13.3	6.4	C/gdía
Nº de ciclos transporte	3.8	2.4	C/gdía
Tiempo de ventilación	90.0	90.0	min
Tiempo total de limpieza	199.6	96.4	min
Tiempo total de operación	9.7	7.8	h
Producción Horas Hombre	3.17	1.38	TM/HH

Tabla 48. Valorización de la producción posterior a la construcción de la CH-RC3.

Descripción	Valorización producción Gdía/día		
	Frentes de avance	Tajeos de explotación	Unidad
Nº Trabajadores por labor	6	10	und.
Volumen explotado por Gdía.	68	42.9	m ³
Cantidad de toneladas rotas	183.6	107.1	TM
Capacidad equipo de carguío	4.6	6	m ³
Capacidad equipo de acarreo	18	18	m ³
T. de transporte (ida y regreso)	50	60	min
Nº de ciclos carguío	13.3	6.4	C/gdía
Nº de ciclos transporte	3.8	2.4	C/gdía
Tiempo de ventilación	60.0	60.0	min
Tiempo total de limpieza	159.7	77.1	min
Tiempo total de operación	8.0	6.8	h
Producción Horas Hombre	3.83	1.58	TM/HH

Las tablas 47 y 48 comparativas revelan mejoras significativas en la eficiencia operativa tras la construcción de la chimenea CH-RC3. En frentes de avance, la producción por horas-hombre aumenta de 3.17 a 3.83 TM/HH, mientras que en tajeos de explotación se incrementa de 1.38 a 1.58 TM/HH. Se observan reducciones importantes en tiempos de transporte y limpieza: para frentes de avance, el tiempo de transporte disminuye de 80 a 50 minutos, y el tiempo total de limpieza se reduce de 199.6 a 159.7 minutos. En tajeos de explotación, estos tiempos pasan de 70 a 60 minutos y de 96.4 a 77.1 minutos, respectivamente. Los cambios sugieren una mejora sustancial en la eficiencia operativa, probablemente resultado de la optimización del sistema de ventilación y la construcción de la chimenea.

H3. El tiempo de construcción de la chimenea Raise Climber no está en concordancia a los registros históricos ya que se describe la descripción del proyecto en 121 días; de los cuales la ejecución del laboreo para 235 m de longitud de la CH-RC3 tomará 3.8 meses (113 días); sin embargo, en los registros históricos los proyectos contaban con una duración de hasta 5 meses; por tal motivo, se requiere que se ponga en marcha el proyecto para realizar el comparativo real con el planeado.

4.5 Discusión de resultados

Aguirre y Mallqui (1) informan que la construcción de la chimenea 081 utilizando materiales Alimak mejoró significativamente la circulación del aire, reduciendo el número de ventiladores necesarios, con un costo total de \$901,468.17 y un tiempo de ejecución de 6 meses. Comparativamente, Ollachica y Ollachica (2) lograron construir una chimenea en la veta Ánimas mediante el método Raise Boring en 107 días, con un costo de \$887,554.80, asegurando la estabilidad del terreno y minimizando los impactos ambientales, lo que demuestra una relación entre la técnica empleada y los costos-beneficios asociados.

Aburto (3) destaca que el equipo Alimak STH-5E incrementa la eficiencia en la construcción, optimizando costos por metro lineal y mejorando la seguridad en comparación con métodos tradicionales. En un contexto similar, Navarro (5) señala que el sistema Raise Climber mejoró la eficacia de construcción en un 51.87%, reduciendo costos y riesgos operativos, mientras que Aguilar (31) resalta que la jaula trepadora Alimak utilizada en la unidad minera San Andrés permitió mejoras significativas en costos y tiempos de construcción.

Por otro lado, Taípe (6) menciona que la implementación de sistemas de ventilación en la Sociedad Minera Austria Duvaz logró una cobertura del 102% del caudal de aire requerido, lo que asegura condiciones óptimas de trabajo subterráneo. De manera similar, Díaz (8) reporta que una chimenea Alimak construida en la Veta Rosa alcanzó un caudal de aire fresco del

103%, destacando la capacidad de esta tecnología para mejorar las condiciones de ventilación. En contraste, Medina (12) compara el método Alimak, que requiere 17 días, con Raise Boring, que toma solo 8 días; sin embargo, aunque Alimak es más lento, ofrece ventajas relacionadas con la seguridad y adaptabilidad en terrenos complejos.

Asimismo, Rincón y Forero (9) enfatizan la necesidad de implementar nuevas tecnologías en Colombia para mejorar la ventilación en túneles, mientras que Zaldumbide y Villalba (11) lograron mejoras significativas en la circulación del aire y el cumplimiento de los requisitos de ventilación en la mina Bonanza. Finalmente, López (33) concluye que las tecnologías modernas de ventilación superan a los métodos tradicionales, brindando mejoras en eficiencia, costos y seguridad laboral, un aspecto crítico en operaciones mineras.

Constatando los antecedentes mencionados y los resultados obtenidos en esta investigación, se puede afirmar que el proyecto de construcción de la chimenea Raise Climber (RC) N°3 está orientado a optimizar las condiciones de ventilación en una unidad minera subterránea en Huancavelica. La chimenea, con un diámetro de 3.2 metros y diseñada para conectar los niveles 440 y 490 con la superficie, mejorará la evacuación de aire caliente, incrementará la calidad del aire y favorecerá la producción por hora-hombre.

Los resultados de la simulación del sistema de ventilación, que incluyeron la chimenea RC N°3 y equipos mineros específicos, evidenciaron mejoras sustanciales en los flujos de aire y la regulación de la temperatura, aumentando el cumplimiento de la cobertura de ventilación en los niveles productivos. Estas mejoras impactaron directamente en la eficiencia de explotación y desarrollo, logrando incrementos del 15% y 21%, respectivamente.

Se estima que la construcción de la chimenea tomará un total de 121 días laborables, iniciando el 16/11 del año 2023 y finalizando el 18/11 del periodo 2024, alineándose con los planes de extracción establecidos por la operación minera. Estos resultados no solo corroboran la viabilidad técnica y económica del proyecto, sino que también refuerzan el impacto positivo de las tecnologías Raise Climber y Alimak en la industria minera, particularmente en contextos geológicos y operativos complejos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La implementación del equipo Alimak en la construcción de chimeneas de ventilación ha demostrado una mejora significativa en la eficiencia del sistema de ventilación, aumentando el caudal de aire en promedio en más del 400% en las estaciones de monitoreo. Esto ha contribuido a la reducción de temperaturas por debajo de los 29 °C, mejorando las condiciones laborales y elevando la productividad del personal en un 15% en actividades de extracción y un 21% en labores de desarrollo.

El equipo Alimak permitió incrementar significativamente el caudal de aire en las estaciones de monitoreo: EM-1 (de 16,986 cfm a 80,859 cfm), EM-2 (de 17,927 cfm a 32,934 cfm) y EM-3 (de 19,899 cfm a 74,942 cfm). Además, las mejoras en la ventilación y la reducción del estrés térmico resultaron en un aumento notable de la productividad del personal.

El costo unitario de construcción con el equipo Alimak fue de \$1,141.14 por metro lineal, con costos adicionales por sostenimiento y excavación de \$52.98/m y otros gastos asociados de \$4,535.84, lo que permitió ejecutar el proyecto en 121 días laborables. Los costos se justifican por los beneficios en productividad, eficiencia operativa y mejoras en la ventilación subterránea.

La construcción de chimeneas con el equipo Alimak permitió reducir el tiempo de dispersión de gases de voladura de 90 a 60 minutos, reflejando una mayor capacidad del sistema de ventilación para evacuar gases nocivos y mejorar la calidad del aire en las áreas subterráneas.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar evaluando la influencia de los equipos Alimak en proyectos futuros, considerando tanto las mejoras en la ventilación como los impactos en la productividad operativa. Asimismo, integrar estos resultados en planes estratégicos para optimizar la eficiencia de los procesos subterráneos mediante tecnología de ventilación avanzada.

Es crucial implementar sistemas de monitoreo continuo del caudal de aire y la temperatura en las áreas ventiladas con chimeneas construidas mediante equipos Alimak. Este monitoreo permitirá garantizar que las condiciones laborales sean óptimas y se mantengan los beneficios asociados a la productividad del personal y la seguridad laboral.

Se recomienda realizar análisis comparativos regulares entre los costos de construcción con el equipo Alimak y métodos convencionales, a fin de optimizar el presupuesto en futuros proyectos de ventilación y seleccionar las tecnologías más rentables en función de las condiciones de cada unidad minera.

Se recomienda realizar un estudio detallado de los gases generados durante las voladuras, incluyendo análisis de concentraciones de CO, NO₂ y CH₄, con el objetivo de validar el desempeño del sistema de ventilación y optimizar su diseño para garantizar que los niveles de contaminantes se mantengan dentro de los límites establecidos por la normativa minera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre W, Mallqui A. Influencia en la construcción de la chimenea 081 con Alimak para el mejoramiento del sistema de ventilación de las labores del nivel 4230 compañía minera Kolpa S.A. - Huachocolpa, Huancavelica 2018. Huancavelica: s.n.; 2018.
2. Ollachica Hacha H, Ollachica Sulla A. Optimización en la construcción de chimenea en la veta Ánimas mediante el método de perforación Raise Boring en la minera Bateas SAC, Caylloma. Arequipa: s.n.; 2019.
3. Aburto Ponce MA. Eficiencia del equipo Alimak STH-5E en los costos de construcción de chimeneas en la empresa minera Sierra Antapite S.A.C - 2019. Nasca: s.n.; 2019.
4. Ramírez Tarrillo DM, Rico Macalopu FA. Proyecto de diseño de chimeneas para mejorar la ventilación. Chiclayo: s.n.; 2021.
5. Navarro Romero JC. Aplicación del sistema Raise Climber ascendente. Huancayo: s.n.; 2020.
6. Taipe Zeballos JH. El sistema de ventilación subterránea para cubrir los requerimientos de aire en la Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C. Huancayo: s.n.; 2021.
7. Aguilar Jamanca DE. Jaula trepadora Alimak para mejorar la construcción de la chimenea Raise Climber 46 - NV.2870 - Unidad Minera San Andrés de Minera Aurífera Retamas S.A. Huaraz: s.n.; 2021.
8. Díaz Avalos RC. Diseño de infraestructura para mejorar el circuito de ventilación de la veta rosa - zona norte en Consorcio Minero Horizonte, Pataz 2018. Trujillo: s.n.; 2018.
9. Rincón Pabón AF, Forero Basabe Y. Tecnologías modernas en los sistemas de ventilación en túneles para proyectos de infraestructura vial. Bogotá: s.n.; 2022.
10. Burbano Morillo DS, Flores Garzón JA. Propuesta de estabilidad de la chimenea El Quinde de la concesión minera Selva Alegre. Quito: s.n.; 2018.
11. Zaldumbide Verdezoto MA, Villalba Pinto MD. Diseño del circuito de ventilación de la Mina Bonanza, operada por la empresa Exportadora Aurífera S.A, EXPAUSA. Quito: s.n.; 2017.

12. Medina Quezada CA. Estudio comparativo técnico–económico de diseño de chimenea, caso chimenea Mina Pajonales (manual–Alimak–Raise Boring). Concepción: s.n.; 2020.
13. Duque Rocha J. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Lima: s.n.; 2018.
14. Alarcón Flores A. Manual de jaula trepadora Alimak. s.f.
15. Sandoval Ticliahuanca V. Gestión de riesgos en construcción de chimeneas Alimak, para mejorar la seguridad en empresa operaciones Seprocal - Unidad de Producción Yauliyacu. 2022.
16. Vergaray Valle RM. Optimización del sistema de ventilación de la mina Charito, Compañía Minera Poderosa S.A. 2017.
17. Fonttis Calderón GF. Estudio y diseño 3D del sistema de ventilación para su optimización actual y proyectada, caso estudio mina Inmaculada - HOCHSCHILD MINING. 2020.
18. Riese Ramos RW. Diseño del circuito de ventilación para evacuar gases, humo y polvo en suspensión en las labores de la galería principal en la mina artesanal Aurex-Acopalca, Pasco 2018. 2021.
19. Howard H, et al. Mine Ventilation and Air Conditioning. 3rd ed. Toronto: John Wiley & Sons, Inc.; 1997.
20. Herrera Herbet J. Introducción a la ventilación minera. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2019.
21. Camargo Díaz G, Segura Galindo DE. Desarrollo de una chimenea de ventilación en una mina ubicada al centro del Perú aplicando el sistema Raise Boring. 2023.
22. Raico Tasilla A. Evaluación y optimización del sistema de ventilación del túnel de exploración Chaquicocha nivel 3750 - Minera Yanacocha, 2018. 2019.
23. Ministerio de Energía y Minas. DS 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM. Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería. 2017.

24. Sánchez P. Proyecto de la chimenea Alimak 081 para la mejora del circuito de ventilación del nivel 4230 de la unidad minera Huachocolpa Uno – CÍA minera Kolpa S.A. 2017.
25. Curasma Quispe JV, Tito Titto ER. Optimización de operaciones en las construcciones de chimeneas con el método Raise Climber utilizando equipo Alimak STH-5H en Mina Marsa - 2012. Huancavelica: s.n.; 2014.
26. Fernández Collado C, Baptista Lucio P, Hernández Sampieri R. Metodología de la investigación. 2017.
28. Tejada Romero RC, Mucha Gomez F. Evaluación de las condiciones de ventilación para la actualización del sistema integral de ventilación Unidad Minera Yauricocha. 2022.
29. Yucás V. Análisis geomecánico del macizo rocoso para la construcción de la chimenea Glory Hole mediante el sistema Alimak [Internet]. 2015 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/www.dspace.uce.edu.ec>
30. Rogel D. Diseño de una chimenea de servicio en el sector “Pozo 50” de la mina Goldmins, ubicada en el cantón Zaruma de la provincia de El Oro [Internet]. 2023 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/32377>
31. Aguilar D. Jaula trepadora Alimak para mejorar la construcción de la chimenea Raise Climber 46—NV.2870—Unidad minera San Andrés de minera Aurífera Retamas S.A. Año 2021 [Internet]. 2022 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5249>
32. Herbert JH. Introducción a la ventilación minera [Internet]. Universidad Politécnica de Madrid; 2019 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.20868/upm.book.70227>
33. López H. Excavación de chimenea de ventilación mediante la plataforma trepadora Alimak STH-5E en mina AGROMIN «La Bonita» [Internet]. 2023 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3679>

34. Ministerio de Energía y Minas. Estadísticas de accidentes mortales en el sector minero [Internet]. 2023 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4646331-estadisticas-de-accidentes-mortales-en-el-sector-minero>
35. Seguridad Minera. Métodos y planeación de ventilación de minas subterráneas [Internet]. Revista Seguridad Minera. 2020 [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/metodos-y-planeacion-de-ventilacion-de-minas-subterraneas/?form=MG0AV3>

ANEXOS

Anexo 1. Presupuestos

Recursos	Cantidad	Tipo	Costo (S/.)
Materiales	Millar	Hojas Bond A-4	60.00
	Unidad	Empaste	40.00
Servicios y	-	Movilidad	500.00
Suministros	-	Refrigerio	150.00
	Unidad	Memoria USB	30.00
	-	Texto de consulta	100.00
	laptop		100.00
TOTAL			1,010.00

Anexo 2. Cronograma de actividades.

Nº	Descripción	Tiempo	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
			1 semana	2 semana	3 semana	4 semana	5 semana	6 semana	7 semana	8 semana	9 semana	10 semana	11 semana	12 semana	13 semana	14 semana	15 semana	16 semana
1	Diseño del proyecto de investigación	1	x															
2	Análisis de la situación actual.	2		x	x													
3	Logística necesaria para el proyecto	1				x												
4	Personal necesario para este proyecto	2					x	x										
5	Delimitar funciones para viabilidad de proyecto	3							x	x	x							
6	Armado de equipo Alimak	2										x	x					
7	Costos involucrados para el proyecto	1												x				
8	Viabilidad de resultados	1													x			
9	Evaluación de Resultados	1														x		
10	Conclusiones y Recomendaciones	1															x	x

Anexo 3. Simulación de las condiciones de ventilación en la Chimenea.

