

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Mejora en la eficiencia del sistema de ventilación en proyectos de minas subterránea mediante el uso del programa Ventsim

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Alfonso Gaona Qquellón

 [0009-0004-9246-9806](https://orcid.org/0009-0004-9246-9806)

Asesor

M.Sc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Gaona Qquellón [1]
Referencia/Reference	[1] A. Gaona Qquellón, “Mejora en la eficiencia del sistema de ventilación en proyectos de minas subterránea mediante el uso del programa Ventsim” [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Gaona, 2024)
Referencia/Reference	Gaona, A. (2024). <i>Mejora en la eficiencia del sistema de ventilación en proyectos de minas subterránea mediante el uso del programa Ventsim</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A Dios por darme la vida, a mis padres por su apoyo constante e incondicional, a mi esposa por motivarme y a mis hijos por ser la inspiración de mi vida.

Agradecimientos

A la Empresa Goldcorp y mis compañeros de trabajo, por apoyarme en mí informe.

A los profesores de la Universidad Nacional de Ingeniería que me brindaron su valioso apoyo en mi formación profesional.

Resumen

Desde el año 2012 la empresa Goldcorp Inc, dueña del proyecto Cerro Negro inicio mejoras en los desarrollos e inicia la explotación de las vetas “Eureka”, “Mariana Central” y “Mariana Norte”, el objetivo es a través de la explotación de dichas vetas mantener una producción sostenida diaria de 4000 TPD.

El plan estratégico era primero mejorar las condiciones de trabajo en la mina Eureka, desde el año 2010 la mina fue desarrollada en su fase inicial mediante la construcción de una rampa principal y el ingreso a los primeros niveles, además también contaba con tres chimeneas de ventilación realizadas con el método Raise Bore, dichas chimeneas se utilizaban como apoyo, pero no representaba un circuito principal no secundario definitivo. Las minas Mariana Central y Mariana Norte se encontraban en etapa de desarrollo mediante la construcción de sus respectivos portales (bocaminas) de ingreso. Los sistemas de ventilación de las tres minas serian similares debido a la geología que presentaban cada una de ellas.

La mina Eureka contaba con un sistema de ventilación básico el cual consistía en la inyección de aire limpio mediante la instalación de ventiladores de 30,000 cfm de capacidad instalados en la Bocamina principal, los cuales contaban con ventiladores enseriados. Para la continuidad de los desarrollos planificados el sistema de ventilación que se había instalado ya presentaba deficiencias y se requería de replantear el sistema de ventilación de la mina, con los nuevos parámetros calculados se tendría que tener listo el nuevo sistema de ventilación para los nuevos requerimientos de aire, el tiempo de ejecución debería tenerse implementados en un lapso de corto a mediano plazo, se deberían contar con circuitos principales y secundarios plenamente identificados, se realizaría una redistribución de ventiladores y se priorizaría la ejecución de chimeneas.

Para proveer de energía eléctrica al sistema de ventilación, el proyecto contaba en un inicio con grupos generadores (grupo electrógenos) mediante el consumo de petróleo, debido a esta restricción de tuvo que planificar el uso de ventiladores de acuerdo a las necesidades

progresivas de aire en la mina, el ingreso de equipos diésel, personal y voladuras estaban planificadas de acuerdo a las condiciones que se contaban en la mina.

Uno de los retos principales era la construcción de chimeneas desde superficie hacia interior mina, debido a la calidad de roca entre la superficie y la zona mineralizada.

Los ventiladores secundarios a usarse debían ser de mayor capacidad y presión, debido a los equipos diésel adquiridos la demanda aumentaba considerablemente, en cantidad y capacidad.

Como parte final del estudio, el nuevo sistema de ventilación implementado obtuvo una eficiencia de ventilación de 113.7% lo que representa un incremento de 23% respecto al sistema anterior. Respecto a la productividad del sistema, se evaluaron tres opciones, la opción elegida; opción 3, generan costos de operación de 474,845 US\$ por año, lo que representa una reducción de 17% respecto a la opción 1 y 32% respecto a la opción 2.

Palabras claves — flujo de aire, ventilación mina, simulación, calibración, selección, implementación, regulador

Abstract

Since 2012, the company Goldcorp Inc, owner of the Cerro Negro project, began improvements in the developments and began the exploitation of the “Eureka”, “Mariana Central” and “Mariana Norte” veins, the objective is through the exploitation of said veins maintain a daily sustained production of 4000 TPD.

The strategic plan was to first improve working conditions at the Eureka mine. Since 2010, the mine was developed in its initial phase by building a main ramp and entering the first levels. It also had three ventilation chimneys. Made with the Raise Bore method, these chimneys were used as support, but did not represent a definitive main, non-secondary circuit.

The Mariana Central and Mariana Norte mines were in the development stage through the construction of their respective entrance portals (mouths). The ventilation systems of the three mines would be similar due to the geology that each of them presented.

The Eureka mine had a basic ventilation system which consisted of the injection of clean air through the installation of fans with a capacity of 30,000 cfm installed in the main mine shaft, which had serial fans. For the continuity of the planned developments, the ventilation system that had been installed already had deficiencies and it was necessary to rethink the mine's ventilation system. With the new calculated parameters, the new ventilation system would have to be ready for the new requirements. of air, the execution time should be implemented in a short to medium term, there should be fully identified main and secondary circuits, a redistribution of fans would be carried out and the execution of chimneys would be prioritized.

To provide electrical energy to the ventilation system, the project initially had generator sets (generator sets) using oil consumption, due to this restriction, the use of fans had to be planned according to the progressive air needs in The mine, the entry of diesel equipment, personnel and blasting were planned according to the conditions that existed in the mine.

One of the main challenges was the construction of chimneys from the surface to the interior of the mine, due to the quality of rock between the surface and the mineralized zone.

The secondary fans to be used had to be of greater capacity and pressure, due to the diesel equipment purchased, the demand increased considerably, in quantity and capacity.

As a final part of the study, the new ventilation system implemented obtained a ventilation efficiency of 113.7%, which represents an increase of 23% compared to the previous system. Regarding the productivity of the system, three options were evaluated, the chosen option; option 3, generates operating costs of US\$ 474,845 per year, which represents a reduction of 17% compared to option 1 and 32% compared to option 2.

Keywords — air flow, mine ventilation, simulation, calibration, selection, implementation, regulator.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xvi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación	1
1.2 Formulación del problema general	2
1.3 Objetivo general.....	2
1.4 Hipótesis general	2
1.5 Operacionalización de variables	2
1.5.1 Variable independiente (V.I).....	2
1.5.2 Variable dependiente (V.D).....	2
1.6 Antecedentes investigativos.....	3
1.6.1 Antecedentes internacionales	3
1.6.2 Antecedentes nacionales	4
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	7
2.1 Marco Teórico.....	7
2.1.1 Ventilación natural	7
2.1.2 Ventilación principal	8
2.1.3 Ventilación mecánica	8
2.1.4 Ventilación auxiliar	8
2.1.5 Perdida de carga	11
2.1.6 Ventiladores eléctricos.....	14
2.2 Marco conceptual	24
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	26
3.1 Unidad de estudio	26
3.1.1 Ubicación y acceso	26

3.1.2	Clima y topografía.....	26
3.2	Levantamiento de ventilación.....	27
3.2.1	Método de Medición.....	27
3.2.2	Metodología del Trabajo de Campo	28
3.2.3	Equipos de Medición.....	29
3.2.4	Estaciones Principales.....	30
3.2.5	Estaciones Secundarias	30
3.2.6	Análisis de Velocidades por Niveles	32
3.3	Ventiladores.....	38
3.3.1	Inventario de ventiladores.....	39
3.3.2	Balace de energía.....	41
3.3.3	Curva característica de los ventiladores.....	42
3.4	Valoración de requerimientos según normas	45
3.4.1	Marco legal	45
3.4.2	Calculo del caudal global requerido – actual.....	46
3.4.3	Calculo de caudal global requerido – proyectado.....	49
3.4.4	Calculo de caudal global requerido – frente de desarrollo.....	52
3.5	Metodología para simulación en software Ventsim	54
3.5.1	Modelamiento del sistema actual	55
3.5.2	Recopilación sistema actual.....	55
3.5.3	Estudio geométrico	55
3.5.4	Planos de referencia	58
3.5.5	Calibración.....	58
3.6	Modelamiento y simulación del sistema actual de ventilación	59
3.6.1	Parámetros actuales de operación.....	59
3.6.2	Configuración de parámetros Ventsim	59
3.6.3	Aplicación del software Ventsim.....	60
3.6.4	Simulación del modelo actual	61

3.6.5	Distribución de energía	63
3.6.6	Curvas características de ventiladores operativos	63
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		65
4.1	Modelamiento y simulación del nuevo sistema de ventilación	65
4.1.1	Ventilación principal zona mecanizada	65
4.1.2	Selección de ventiladores auxiliares	72
4.1.3	Simulación del diseño final.....	74
4.1.4	Resumen del sistema de ventilación proyectado	75
4.2	Análisis de costos	77
Conclusiones		81
Recomendaciones		83
Referencias bibliográficas		85
Anexos		86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Operacionalización de variables e indicadores	3
Tabla 2 : Matriz de consistencia	3
Tabla 3 : Composición química del aire seco al nivel del mar	7
Tabla 4 : Estaciones principales – mina Eureka.....	30
Tabla 5 : Mediciones de caudales estaciones principales – mina Eureka	30
Tabla 6 : Estaciones secundarias – mina Eureka	31
Tabla 7 : Mediciones de caudales estaciones secundarias – mina Eureka	31
Tabla 8 : Caudal requerido por personal.....	33
Tabla 9 : Caudal requerido por dilución de gases por equipos diesel	33
Tabla 10: Caudal requerido por dilución de gases de voladura.....	33
Tabla 11: Estaciones secundarias y mediciones de caudales nivel 502	35
Tabla 12: Estaciones secundarias y mediciones de caudales nivel 476	37
Tabla 13: Estaciones secundarias y mediciones de caudales nivel 450	38
Tabla 14: Ventiladores principales – Cerro Negro.....	39
Tabla 15: Ventiladores secundarios – Cerro Negro	39
Tabla 16: Ventiladores auxiliares – Cerro Negro.....	40
Tabla 17: Consumo de energía en ventiladores instalados – mina Eureka	41
Tabla 18: Características de ventilador axial de 30,000 cfm	42
Tabla 19: Características de ventilador axial de 60,000 cfm	43
Tabla 20: Características de ventilador axial de 300,000 cfm	44
Tabla 21: Valores de acuerdo a resolución M.T.S.S. N°295/03	45
Tabla 22: Requerimiento de aire por personal	46
Tabla 23: Requerimiento de aire por equipo diésel.....	46
Tabla 24: Requerimiento de aire por dilución de gases	47
Tabla 25: Opciones de caudales requeridos en mina	47
Tabla 26: Balance de aire actual mina Eureka.....	48

Tabla 27: Requerimiento de aire por personal – proyectado.....	49
Tabla 28: Requerimiento de aire por equipo diésel – proyectado	50
Tabla 29: Requerimiento de aire por dilución de gases – proyectado	50
Tabla 30: Opciones de caudales requeridos proyectados en mina	51
Tabla 31: Balance de aire proyectado mina Eureka.....	52
Tabla 32: Requerimiento de aire por personal – frente de desarrollo.....	53
Tabla 33: Requerimiento de aire por equipo diésel – frente de desarrollo.....	53
Tabla 34: Requerimiento de aire por dilución de gases – frente de desarrollo	53
Tabla 35: Opciones de caudales en frentes de desarrollo	54
Tabla 36: Comparación de caudales campo y Ventsim – ingreso de aire.	61
Tabla 37: Comparación de caudales campo y Ventsim – salida de aire	61
Tabla 38: Resumen de la simulación actual de la mina	62
Tabla 39: Resumen de parámetros de ventiladores mina Eureka.....	64
Tabla 40: Resumen de la simulación del nuevo sistema de la mina	74
Tabla 41: Resumen de balance de caudales del nuevo sistema.....	76
Tabla 42: Requerimientos de excavación – Opción 1	78
Tabla 43: Puntos de servicio de ventiladores principales – Opción 1.....	78
Tabla 44: Requerimientos de excavación – Opción 2	78
Tabla 45: Puntos de servicio de ventiladores principales – Opción 2.....	79
Tabla 46: Requerimientos de excavación – Opción 3.....	79
Tabla 47: Puntos de servicio de ventiladores principales – Opción 3.....	79
Tabla 48: Puntos de servicio de ventiladores principales – Largo plazo	80

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ventilación impelente.....	9
Figura 2 : Ventilación aspirante.....	10
Figura 3 : Ventilación impelente con apoyo aspirante	10
Figura 4 : Gradiente de presiones.....	12
Figura 5 : Cargos equivalentes en pies para fuentes de perdidas por choque	13
Figura 6 : Ventilador centrifugo	15
Figura 7 : Ventilador axial	16
Figura 8 : Tipos de configuración de un ventilador.....	18
Figura 9 : Componentes del ventilador axial	19
Figura 10: Curva característica de un ventilador de mina	20
Figura 11: Curva característica de ventiladores en serie.....	21
Figura 12: Curva característica de ventiladores en paralelo.....	22
Figura 13: Representación gráfica del fenómeno de bombeo	23
Figura 14: Ubicación y acceso a proyecto Cerro Negro	26
Figura 15: Método de medición de ventilación	28
Figura 16: Equipos de medición de parámetros de ventilación	29
Figura 17: Estaciones principales y secundarias de ventilación	32
Figura 18: Tajeos planificados a mediano y largo plazo – mina Eureka	32
Figura 19: Nivel 554 – mina Eureka	34
Figura 20: Nivel 528 – mina Eureka	35
Figura 21: Ubicación de estaciones secundarias nivel 502	36
Figura 22: Ubicación de estaciones secundarias nivel 476	37
Figura 23: Ubicación de estaciones secundarias nivel 450	38
Figura 24: Curva característica de ventilador – 30 000 cfm	43
Figura 25: Curva característica de ventilador – 60 000 cfm	44
Figura 26: Curva característica de ventilador – 300 000 cfm	45

Figura 27: Opciones de caudales requeridos en mina.	48
Figura 28: Balance de aire actual mina Eureka.....	49
Figura 29: Opciones de caudales requeridos proyectados en mina.	51
Figura 30: Balance de aire proyectado mina Eureka.....	52
Figura 31: Opciones de caudales en frentes de desarrollo	54
Figura 32: Importación de Data DXF al Ventsim	56
Figura 33: Modelo 3D Autocad.	57
Figura 34: Modelo solidos Ventsim	57
Figura 35: Sección longitudinal de las labores mina Eureka.	58
Figura 36: Resumen de energía en la mina – Ventsim.....	63
Figura 37: Unifilar-proyecto final planeamiento mina Eureka	66
Figura 38: Simulación – proyecto final planeamiento mina Eureka	67
Figura 39: Lado óptimo	71
Figura 40: Diámetro óptimo	72
Figura 41: Construcción/simulación de mangas ventilación	73
Figura 42: Resumen de ventilador apropiado – ventilador secundario para nivel de trabajo.....	74

Introducción

El presente trabajo presenta en el Capítulo I, el planteamiento del problema con la formulación del objetivo, el cual es mejorar las condiciones de trabajo y tener un sistema de ventilación nuevo operando en base a los requerimientos calculados, así como la formulación de la hipótesis, describiendo las variables e indicadores. El capítulo finaliza describiendo los referentes bibliográficos tanto nacionales como internacionales.

En el Capítulo II, se describe el marco teórico que abarca los métodos y cálculos que se aplican en la ventilación de minas. Los tipos de ventiladores que se eligieron fueron los axiales debido a su versatilidad y fácil manejo. Se tomarán en cuenta las curvas características de los ventiladores, tipo de ductos, tipo de roca, reguladores, puertas, etc. para las simulaciones en el programa de ventilación Ventsim. También se consideran factores de trabajo como pérdidas por fricción, pérdidas por choque, resistencias en los ductos.

En el Capítulo III se detalla la ubicación del proyecto, la zona geográfica donde se desarrolla los trabajos de la mina y su transformación, debido a la ubicación de la mina el medio que lo rodea tiene un entorno de clima frío lo que favorece a la ventilación de interior mina, al tener temperaturas bajas en superficie, la inyección de aire frío a las zonas de interior mina favorece la ventilación, bajando niveles de temperaturas altos que se puedan encontrar o generar, por la presencia de equipos diésel o emanaciones de gases producto de reacciones químicas exotérmicas. También se detallan los métodos y los equipos que se emplearon en el levantamiento de datos de campo, las estaciones que se usaron para la toma de data, su ubicación y sus características; con los datos obtenidos se realizaron los análisis de las velocidades, balance de energía y curva características de los ventiladores instalados. También se aborda los requerimientos de aire de la mina, los cálculos que se realizan de acuerdo a las normas legales vigentes.

En el Capítulo IV, se realiza el modelamiento del sistema de ventilación mediante el uso del software, data obtenida a través de planos topográficos o diseño previamente

trabajado en programas de ingeniería. Se elabora la simulación del sistema de ventilación, se muestra el nuevo diseño del sistema de ventilación y el análisis del costo del sistema de ventilación.

Se culmina con las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

La ventilación de minas subterránea es el trabajo que se realiza para lograr el acondicionamiento del aire que circula a través de las labores subterráneas siendo su objetivo principal asegurar un ambiente libre de riesgo, saludable y cómodo para los trabajadores, el cual debe de realizarse de la manera más eficiente y de menor costo. Por lo tanto, existen varias razones que justifican lograr que el aire que entre a una mina subterránea asegure la renovación de este vital elemento durante las labores minero. Para luego garantizar la preservación del oxígeno necesario para la vida de los trabajadores, suprimir los gases tóxicos producidos en las voladuras con explosivos, eliminar la concentración nociva de polvo en suspensión, reducir la temperatura en lugares muy calurosos y en casos especiales aumentarla si fuera necesario, además de proporcionar el aire suficiente para el trabajo seguro de los trabajadores debido al creciente aumento equipos diésel dentro de las minas.

La problemática del yacimiento es el incremento de equipos diésel, así como de las labores para la preparación de los futuros tajeos, debido a que los proyectos no cuentan con un sistema de ventilación adecuado, se debe agilizar los trabajos de implementación del nuevo sistema de ventilación integral, mientras se efectúa se deben realizar trabajos adicionales para afrontar los problemas actuales.

Actualmente las minas referidas en el proyecto se encuentran en etapa de desarrollo donde la ventilación es a través de ventiladores secundarios ubicados en las bocaminas que insuflan aire fresco a las diferentes labores,

El primer proyecto o mina subterránea, su ingreso de aire fresco es a través de la bocamina principal y una chimenea Raise bore auxiliar de 1.5 m Ø, el egreso de aire es a través de una chimenea Raise bore de 3 m Ø.

Para el caso del segundo proyecto el ingreso y salida de aire es a través de la bocamina principal.

Los cambios a corto plazo estarán enfocados en hacer más eficiente los sistemas actuales de ventilación para inyectar la mayor cantidad de aire fresco al sistema para que finalmente los sistemas definitivos de las minas tendrán implementados mejores sistemas de extracción e inyección de aire los cuales serán ejecutados en un tiempo de mediano a largo plazo.

Los beneficios de los trabajos serán tener un sistema lo menos complicado y con una buena eficiencia en la distribución de los caudales de aire.

1.2 Formulación del problema general

¿Cómo las condiciones actuales tienen efecto negativo en la eficiencia de la ventilación y productividad de la mina?

1.3 Objetivo general

Diseñar un sistema de ventilación que mejore la eficiencia del sistema de ventilación principal y secundario en los proyectos de las minas subterráneas mediante el uso del programa Ventsim.

1.4 Hipótesis general

Realizar los estudios de ventilación caracterizados por la optimización de la ventilación, establecerá el mejoramiento de la calidad del aire.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 Variable independiente (V.I)

X: Optimización de la Ventilación

- Presión (Kpa)
- Temperatura (°C)
- Flujo (cfm)

1.5.2 Variable dependiente (V.D)

Y: Calidad del Aire

- Límites Permisibles de Gases (ppm CO, % O₂, ppm SO₂, ppm NO₂, ppm LEL ppm).

Tabla 1*Operacionalización de variables e indicadores*

CLASE	VARIABLE	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Independiente (X)	X: Optimización de la Ventilación	La ventilación en una mina subterránea es el proceso mediante el cual se hace circular por el interior de la misma el aire necesario para asegurar una atmosfera respirable y segura para el desarrollo de los trabajos, la ventilación se realiza estableciendo un circuito para la circulación de aire a través de todas las labores	Presión	Kpa
			Temperatura	°C
			Flujo	cfm
Dependiente (Y)	Y: Calidad del Aire	Es una indicación de la calidad de aire que ingresa a la mina, está dentro de los límites permisibles, para ser empleado por personal y equipo diésel, así como para la dilución de gases provenientes de las voladuras.	Límites Permisibles de Gases	ppm CO % O2 ppm SO2 ppm NO2 ppm LEL

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2*Matriz de consistencia*

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES		INDICADOR
			INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE	
¿Cómo las condiciones actuales tienen efecto negativo en la eficiencia de la ventilación y productividad de la mina?	Diseñar un sistema de ventilación que mejore la eficiencia del sistema de ventilación principal y secundario en los proyectos de las minas subterráneas mediante el uso del programa Ventsim.	Realizar los estudios de ventilación caracterizados por la optimización de la ventilación, establecerá el mejoramiento de la calidad del aire.	X: Optimización de la Ventilación	Y: Calidad del Aire	X1: Presión X2: Temperatura Y1: Límites Permisibles de Gases

Fuente: Elaboración propia

1.6 Antecedentes investigativos**1.6.1 Antecedentes internacionales**

Guillen C. (2016), en su tesis titulada "Optimización del Sistema de Ventilación Aplicando Tecnologías Informáticas Minera Hemco – Nicaragua" concluye que, desde 2009, Compañía Minera HEMCO Nicaragua S.A. ha implementado mejoras en su gestión para incrementar la productividad, reducir costos y garantizar estándares de seguridad. Para aumentar la producción de 470 a 1,300 TPD, se han iniciado labores en las vetas "Pluto", "Venus" y "Neblina", además del desarrollo del cruceo Martha 850, destinado a la

extracción de mineral con equipos diésel, en reemplazo de locomotoras a batería. La mina tiene un sistema de ventilación natural con recirculaciones variables, sin un plan de aforos o instrumentos de medición adecuados. Por ello, se ha rediseñado el sistema de ventilación usando el software VENTSIM™ Visual Avanzado, permitiendo planificar y optimizar circuitos actuales y futuros. Este rediseño sigue las normativas de Nicaragua, Perú y Chile, asegurando la adaptación gradual al sistema de minado por Trackless.

Rozan, M. (2023), en su investigación titulada “Diseño e Implementación de un Sistema de Gestión Para un Incremento de la Productividad y Seguridad del Sistema de Ventilación en una Mina Subterránea-Colombia” afirma que, investigación diseña e implementar un sistema de gestión para mejorar la ventilación en una mina subterránea en Colombia, asegurando el cumplimiento de normativas. El sistema incluye documentos para la auditoría, control y administración de la ventilación, con instrucciones, pautas y directivas para corregir deficiencias detectadas en campo. La pregunta principal es: ¿en qué medida este sistema de gestión incrementa la productividad y seguridad del sistema de ventilación? La hipótesis sugiere que un sistema de gestión adecuado puede mejorar ambos aspectos. El estudio es de tipo aplicado y se basa en la ventilación de una mina con un sistema de ventilación mecánica que utiliza dos extractores de 190 Kcfm y 11 ventiladores auxiliares. Se analizaron tres casos prácticos que demuestran mejoras en productividad y seguridad tras la implementación del sistema. En el caso 2, tras una inversión de US \$158,240, se obtuvo un ahorro de US \$183,835, con un VAN de US \$880,469, una TIR del 116% y un periodo de recuperación menor a un año. Además, se calculó un diámetro óptimo de 3.6 m para el caudal de aire.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Ccanque, J. (2023) en su tesis titulada “Optimización del sistema de ventilación a corto plazo mediante la construcción de Raise Boring - CIA Minera Alpayana S.A. – Lima” concluye que su investigación busca optimizar el sistema de ventilación y mejorar las condiciones ambientales en la zona de explotación de cuerpos mineralizados, asegurando la calidad y cantidad de aire en la mina. Para ello, se plantea construir una chimenea Raise

Bore 338 desde el Nivel 10 hasta la superficie, lo que aumentará la capacidad de extracción de aire contaminado y mejorará la ventilación a corto y mediano plazo. Actualmente, la operación en profundidades mayores afecta al personal y al rendimiento de equipos diésel, con bajas velocidades de aire y alta temperatura debido a los gases de la voladura y equipos, lo que eleva riesgos de accidentes y costos. La información se recopiló con equipos calibrados y se usó el software Ventsim para evaluar el sistema. Con los ajustes, se espera mejorar sustancialmente la seguridad, reduciendo la exposición a altas concentraciones de gases para los trabajadores.

Condori, V. (2016) en la investigación titulada “Optimización del sistema de ventilación con el software Ventsim Visual en la U.M. Heraldos Negros de la compañía minera San Valentín S.A - Huancavelica”, afirma que: Para tener una buena base de datos de campo es necesario capacitar al personal de ventilación en el levantamiento de los puntos de muestreo y poder ingresar dicha base al software Ventsim Visual, para poder realizar una buena distribución del aire limpio (p. 126).

Quispe, E. (2022) en su tesis titulada “Diseño del circuito de ventilación mediante el Software Ventsim en Compañía Minera Kolpa S.A. - Unidad Minera – Huachocolpa Uno” busca crear un modelo 3D con Ventsim para simular el estado actual del circuito de ventilación en la mina. Esto permite evaluar alternativas para mejorar la circulación del aire y optimizar el ambiente de trabajo subterráneo. Utilizando métodos científico, inductivo y deductivo, se identificaron y calibraron las estaciones principales y secundarias, considerando ubicación, caudal y dirección del aire. La capacidad de aire fresco en la mina es de 376,717 cfm y el caudal de salida de aire viciado es de 393,689 cfm. El modelo en Ventsim muestra un ingreso de 375,132 cfm y una salida de 398,273 cfm. El sistema actual usa cuatro vías de ingreso de aire fresco y ocho de escape de aire viciado, y cuenta con 195 estaciones secundarias distribuidas en 10 niveles. La comparación entre mediciones de campo y el diseño en Ventsim confirma la fiabilidad del modelo en la representación del flujo de aire en la mina.

Saavedra, Y. (2017) en su tesis titulada "Sistema de ventilación, usando el software Ventsim en la compañía minera Chalhuane, Camaná, Arequipa" se enfoca en el diseño y simulación de una red de ventilación con el software Ventsim Visual para la Compañía Minera Chalhuane S.A.C., actualmente en fase de profundización, con labores de hasta 8 km de longitud. La ventilación natural es insuficiente debido a la complejidad de la red, por lo que el objetivo es desarrollar una ventilación efectiva para cubrir las necesidades de aire en el proceso productivo. La metodología incluye la recopilación de datos de campo con instrumentos como el anemómetro y análisis de gabinete. Se diagnosticó un ingreso de aire de 16,229 cfm frente a un requerimiento de 14,864 cfm, alcanzando una cobertura del 107%. Sin embargo, se busca redirigir el flujo hacia zonas con déficit de aire en cantidad y calidad. La propuesta incluye usar chimeneas de ventilación, eliminar obstáculos y utilizar puertas y tapones para controlar el flujo. La simulación en Ventsim permite definir la ubicación óptima de estos elementos para mejorar la distribución del aire y reducir la temperatura en las zonas de trabajo.

Chambergó, G. (2013) en la investigación titulada "Propuesta de un sistema de ventilación, aplicando tecnologías de información y manejo de escenarios técnico económico en la unidad productiva San Cristóbal, de Minera Bateas S.A.C.", afirma que su proyecto logrará reducir el consumo de energía gracias al empleo de instrumentos, tecnología y sistemas sofisticados que permitirán la comunicación en interior mina.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

La materia prima de la ventilación es el aire; ésta es una mezcla de gases que conforman la atmosfera terrestre, "aire seco". Sin embargo, el aire siempre viene acompañado de vapor de agua. Desde el punto de vista termodinámico el aire es una mezcla de aire seco y vapor de agua en proporciones variables, dependiendo de la temperatura y presión barométrica.

La composición química del aire seco al nivel del mar es:

Tabla 3

Composición química del aire seco al nivel del mar

GAS	% EN VOLUMEN	% EN PESO
Nitrógeno	78.084	75.55
Oxígeno	20.946	23.13
Argón	0.934	1.27
Dióxido de carbono	0.033	0.05
Otros gases	0.003	-

Fuente: Goldcorp

Los cambios termodinámicos afectan el contenido de vapor de agua al condensarse o evaporarse. El término aire seco es hipotético, pues no existe en la atmósfera.

2.1.1 Ventilación natural

La ventilación natural en una mina es ocasionada por la diferencia de densidades o peso entre el aire que ingresa y el aire que sale de la mina, lo cual se debe a la diferencia entre dos temperaturas, es decir un peso mayor empuja a un peso menor o lo que es similar a que una fuerza de presión mayor empuja a una fuerza de presión menor.

Esta ventilación es irregular durante las 24 horas del día y no es confiable y trabaja en minas de poca profundidad hasta unos 600 m o para minería clásica, siendo afectada por los vientos externos que son cambiantes durante el día y por las estaciones lo que no es seguro a la hora de los disparos (voladuras) o a la inversa trabaja inversamente por efecto de los cambios de temperatura exterior. Esta ventilación ocasiona problemas por no

ser constante y es mejor medirlas en las bocaminas a diferentes horas y días que calcularla teóricamente.

Su volumen de ingreso se mide en las bocaminas y su presión estática positiva o negativa no alcanza más allá de 1.5 pulga. H₂O como máximo dependiendo de las densidades de aire interno y externo durante el día y la diferencia de altitud y de la estación.

2.1.2 Ventilación principal

Es cuando el flujo principal de aire que enviamos atraviesa toda la sección, mina o circuito de ventilación y viaja por una galería principal distribuyéndose el aire por ramales o recibiendo caudal de aire de ramales laterales cuando la presión es de succión.

2.1.3 Ventilación mecánica

La ventilación mecánica es ocasionada por la presión que ejerce un ventilador sobre una masa de aire que envía o succiona aire y el cual es accionado por un motor eléctrico que le permite una constante presión sobre el aire que transporta y en una cantidad fija, en el sentido que uno ha planeado o diseñado a fin de asegurar el ritmo de las operaciones y los ciclos de trabajo.

Esta ventilación requiere energía eléctrica, que puede ser producida en base a petróleo o de hidroeléctricas y en esto estriba que la ventilación minera sea más cara o más económica respectivamente por tonelada de mineral extraído, siendo el objeto de la ventilación mecánica diluir los contaminantes y trasladarlos para dar confort al personal, pero al más bajo costo de operación.

2.1.4 Ventilación auxiliar

2.1.4.1 Elementos de una instalación auxiliar. Los elementos utilizados en una ventilación auxiliar son:

- Ventiladores Auxiliares

Son compactos, cuyo punto de operación es determinado por las necesidades de la faena, de acuerdo a esto la potencia puede variar de 10 Hp hasta 250 Hp.

- **Ductos de Ventilación**

Dichos elementos pueden ser circulares u ovalados, tiene la función de dirigir el aire desde el ventilador hasta el frente de trabajo o viceversa.

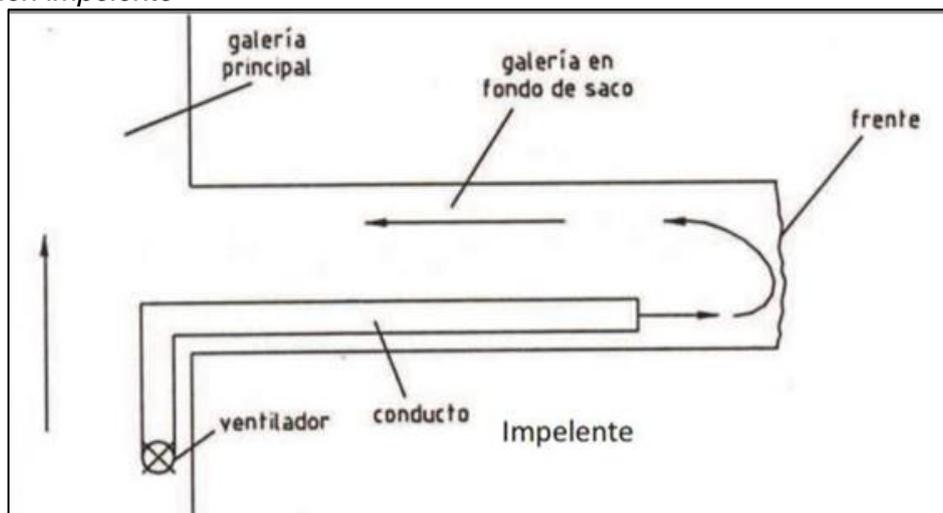
2.1.4.2 Tipos de sistema de ventilación auxiliar. Se conocen tres tipos de ventilación auxiliar:

- **Impelente o Soplante**

Cuando el aire ingresa al tope del frente a través de la tubería (manga), impulsado por ventiladores, y desplaza la masa de aire viciado hacia la corriente principal de aire, a través de la galería. Este es el sistema predominante usado en la mayoría de minas.

Figura 1

Ventilación impelente



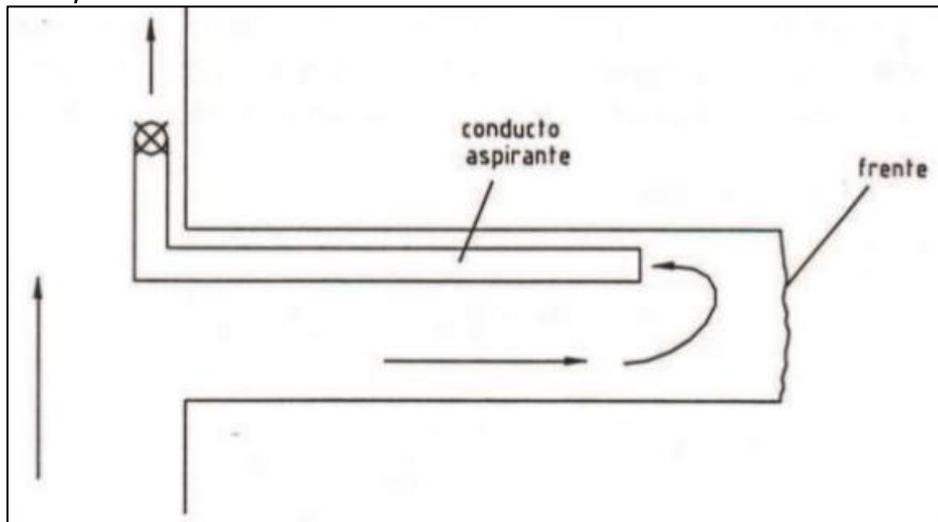
Fuente: Instituto de ingenieros de Minas del Perú

- **Aspirante**

En este método, el aire contaminado del frente es succionado a través del conducto debido a la depresión creada por ventiladores situados en ambos puntos de extremo. Este aire es evacuado en la corriente de ventilación principal, procedente de la cual entra aire limpio a través de la galería o conducto.

Figura 2

Ventilación aspirante



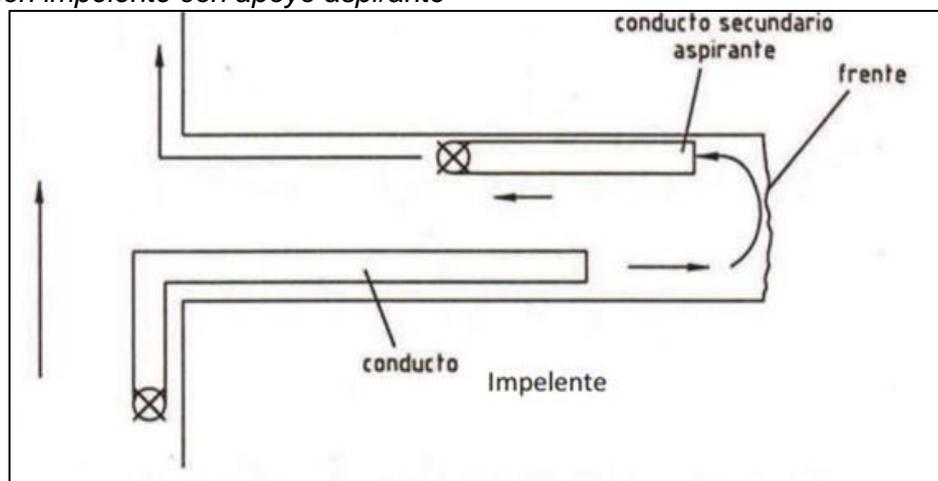
Fuente: Instituto de ingenieros de Minas del Perú

▪ **Combinado**

Utiliza un ventilador auxiliar de refuerzo, situado frente a la labor, y con un tramo de conducto de poca longitud. Estos sistemas combinan las ventajas de cada sistema, consiguiendo el mejor efecto de ventilación en situaciones concretas de minería, Son posibles dos configuraciones en función de que la línea principal sea la aspirante o la impelente, una línea impelente con solape aspirante consta de un sistema impelente principal con una instalación auxiliar aspirante, cuya función por lo general es la de recoger y evacuar el polvo generado del frente.

Figura 3

Ventilación impelente con apoyo aspirante



Fuente: Instituto de ingenieros de Minas del Perú

2.1.5 Pérdida de carga

2.1.5.1 Pérdidas por fricción. Las pérdidas por fricción o caída de presión estática son aquellas que se producen debido al rozamiento del aire con las paredes de los ductos, así como al propio rozamiento entre las partículas del fluido. Cuando el aire fluye a través de un ducto, la presión requerida para moverlo a través de él depende no sólo de la fricción interna, sino también del tamaño, longitud, forma del ducto, velocidad y densidad del aire. Todos estos factores son considerados en la Ecuación 1 de J. Atkinson, denominada "Ley de Atkinson".

$$\Delta P_S = \frac{\rho x K x C x L x V^2}{1.2 x A} \quad (1)$$

Dónde:

ΔP_S = Caída de presión estática (Pa).

ρ = Densidad del aire a cota de trabajo (kg/m^3).

K = Factor de fricción del ducto o Factor de Atkinson (kg/m^3).

C = Perímetro del ducto (m).

L = Longitud del ducto (m).

V = Velocidad (m/s).

A = Área del ducto (m^2).

Sabiendo que: $Q = V \times A$

Así mismo la Ecuación 1 también se puede expresar como la Ecuación 2:

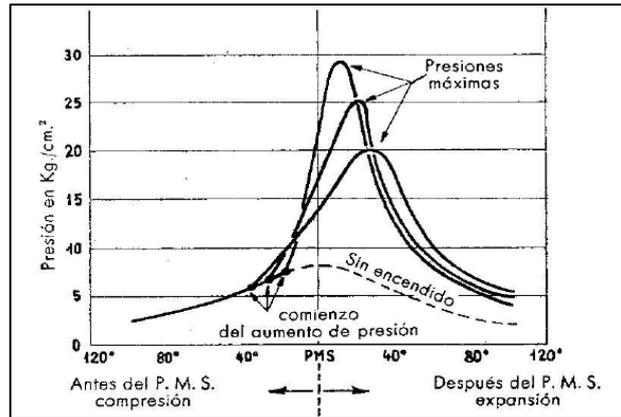
$$\Delta P_S = \frac{\rho x K x C x L x Q^2}{1.2 x A^3} \quad (2)$$

En un circuito de ventilación auxiliar, las pérdidas por fricción en las mangas son de importancia de cara al diseño de la instalación, siendo las de las galerías del túnel o mina despreciables frente a estas (suponen en general menos de un 1% en relación a las de las mangas).

En la ventilación de minas la pérdida de presión por fricción representa del 70 % al 90% de la presión total de la mina, consiguientemente será muy útil determinar con la suficiente precisión utilizando los coeficientes apropiados.

Figura 4

Gradiente de presiones



Fuente: Hartman, 1991

2.1.5.2 Pérdidas por choque. Las pérdidas por choques son de origen local, producidas por turbulencias, remolinos, frenadas del aire al enfrentar diversos accidentes dentro del circuito. Los accidentes son cambios de dirección, entradas, contracciones, etc. También dependen de la velocidad y del peso específico del aire.

Las pérdidas por choques son aquellas que se producen cuando el flujo de aire cambia de dirección o el conducto cambia de sección. Estas pérdidas se calculan la Ecuación 3 como un porcentaje sobre la presión dinámica del fluido:

$$\Delta P_x = le \frac{\rho x V^2}{2} \quad (3)$$

Dónde:

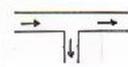
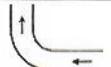
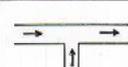
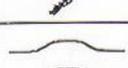
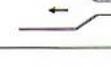
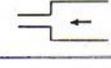
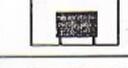
- ΔP_x = Caída de presión por choque (Pa).
- le = Coeficiente de pérdida, valor obtenido experimentalmente.
- ρ = Densidad del aire (kg/m^3).
- V = Velocidad del aire en el ducto (m/s).

En un circuito de ventilación, esto ocurre en elementos como codos, cambios de diámetros o sección, puntos de bifurcación, rejillas de protección del ducto o ventilador, etc.

La única dificultad del cálculo de estas pérdidas está en usar una correcta estimación del factor. Es mucha la literatura, basada principalmente en ensayos experimentales, que se ocupan de este tema.

Figura 5

Cargos equivalentes en pies para fuentes de pérdidas por choque

FORMA		Le	FORMA		Le
	CURVA OBTUSA REDONDEADA	0.5		BIFURCACION	230
	ANGULO RECTO REDONDEADO	1		JUNTURA	80
	CURVA AGUDA REDONDEADA	3		ENTRADA	3
	CURVA OBTUSA QUEBRADA	15		DESCARGA	65
	ANGULO RECTO QUEBRADO	70		PASO SOBRE NIVEL (OPTIMO)	1
	CURVA AGUDA QUEBRADA	150		PASO SOBRE NIVEL (BUENO)	65
	CONTRACCION GRADUAL	1		PASO SOBRE NIVEL (MALO)	290
	EXPANSION GRADUAL	1		HUECO PARA PUERTA	70
	CONTRACCION ABRUPTA	10		CARRO O JAULA 20 % AREA DEL CONDUCTO	100
	EXPANSION ABRUPTA	20		CARRO O JAULA 40 % AREA DEL CONDUCTO	500

Fuente: Hartman, 1991

2.1.5.3 Pérdidas por presión dinámica. Es la pérdida originada por la presión cinética en la dirección del flujo, que es necesaria para hacer que el fluido en reposo fluya a una determinada velocidad.

Al final del circuito, usualmente a la salida del ducto (sistemas soplantes) o la salida del ventilador (sistemas aspirantes) se ha de tener en cuenta la velocidad con la que el aire sale, ya que ésta es una pérdida más. Estas pérdidas no tienen mayor complicación y se calculan por la Ecuación 4:

$$\Delta P_d = \frac{\rho x V^2}{2} \quad (4)$$

Dónde:

ΔP_d = Caída de presión dinámica (Pa).

ρ = Densidad del aire (kg/m^3).

V = Velocidad del aire en el conducto (m/s).

2.1.5.4 Factor de fugas en una manga. Cuando se trabaja con ventilación auxiliar se presenta fugas, inicialmente, dependen de las propias características del ducto, pero ha de tenerse en cuenta que estas tuberías están instaladas en un sistema dinámico, es decir, al mismo tiempo que se aporta aire están trabajando en el frente, por lo que es muy frecuente que se vean deterioradas con el paso del tiempo. El caudal final considerando las fugas se calcula con la siguiente Ecuación 5:

$$Q_{FINAL} = Qx\left(1 - \frac{F}{100}\right)^{-L/100} \quad (5)$$

Dónde:

Q_{FINAL} = Caudal de descarga del ventilador axial (m^3/s).

Q = Caudal requerido en el frente de trabajo (m^3/s).

L = Longitud equivalente del ducto (m).

F = Factor de fuga del ducto otorgada por el fabricante (%).

2.1.6 Ventiladores eléctricos

Un ventilador es una maquina rotativa que pone el aire o un fluido compresible en movimiento. Podemos definirlo como una turbomáquina que transmite energía para generar la presión necesaria manteniendo un flujo continuo de aire.

Para realizar este trabajo el ventilador requiere de una potencia en el eje del motor que lo acciona y que viene dada por la Ecuación 6:

$$Potencia(Watios) = \frac{Caudal(m^3/s) \times Presion\ total(Pa)}{n_{ventilador}(\%)} \quad (6)$$

Un ventilador funcionando a una determinada velocidad y conectado a un sistema que tiene una resistencia dada, desarrolla una presión que representa su capacidad de realizar trabajo útil. Una vez estabilizado el flujo de aire a través del sistema, una parte de la energía impartida por el ventilador se convierte en velocidad (presión de velocidad), y el

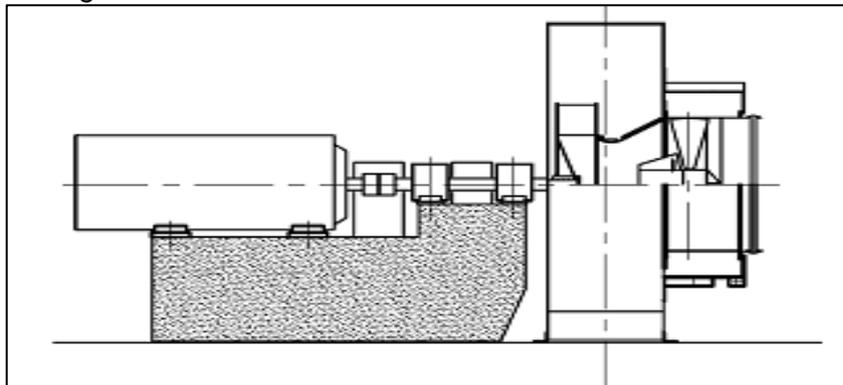
resto será la energía disponible para vencer la resistencia del circuito (presión estática o útil). La suma de estas dos presiones constituye la presión total del aire en un punto determinado del circuito.

2.1.6.1 Clasificación de los ventiladores. Los ventiladores se dividen en el sentido más general en 3 tipos: Ventiladores de centrífugos, hélice y axiales.

2.1.6.1.1 Ventilador centrífugo. El ventilador centrífugo consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral; el aire, que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador, es succionado por el rotor y arrojado contra la envolvente se descarga por la salida en ángulo recto a la flecha; puede ser de entrada sencilla o de entrada doble. Son ventiladores de flujo radial. La trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y está perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta.

Figura 6

Ventilador centrífugo



Fuente: Goldcorp

Estos ventiladores tienen tres tipos básicos de rodetes:

- Álabes curvados hacia adelante,
- Álabes rectos,
- Álabes inclinados hacia atrás/curvados hacia atrás

2.1.6.1.2 Ventilador de hélice. Este ventilador está formado por un rodete dentro de un anillo o carcasa de montaje. La dirección de la corriente de aire es paralela a la flecha del ventilador. Se emplea para movilizar en circuitos cuya resistencia es muy pequeña.

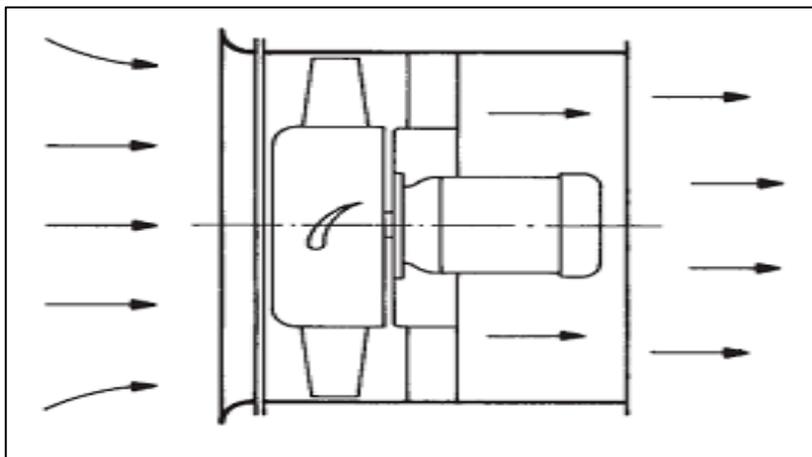
Puede manejar grandes volúmenes de aire a una presión estática baja.

2.1.6.1.3 Ventilador axial. El ventilador axial es de diseño aerodinámico. Este tipo de ventilador consiste esencialmente en un rodete alojado en una envolvente cilíndrica o carcasa. La adición de álabes-guía, detrás del rotor, convierte al ventilador turbo-axial en un ventilador axial con aletas guía.

Puede funcionar en un amplio rango de volúmenes de aire, a presiones estáticas que van de bajas a moderadamente altas y es capaz de desarrollar mayores presiones estáticas que el ventilador centrífugo a la vez que es mucho más eficiente. Los álabes-guía, en la succión o en la descarga, o en ambas partes, se han añadido para enderezar el flujo del aire fuera de la unidad a la vez que sirven de apoyo en el diseño.

Figura 7

Ventilador axial



Fuente: Goldcorp

2.1.6.2 Comparación de ventiladores axiales y centrífugos.

- Los ventiladores axiales ofrecen mejor eficiencia en un amplio rango de puntos de funcionamiento, mientras que los ventiladores centrífugos pueden tener un rendimiento muy alto, pero solamente sobre un rango muy reducido, y sólo sobre una curva característica.
- Este parámetro es muy importante ya que el coste de la energía es un factor que se tiene muy en cuenta. Por tanto, el rendimiento tiene una importancia primordial, y como es lógico, primará conseguir rendimientos elevados en grandes gamas de puntos de funcionamiento, objetivo mucho más difícil de conseguir con ventiladores centrífugos que con ventiladores axiales. Si un ventilador centrífugo diseñado para

un punto de funcionamiento determinado ha de trabajar en otras condiciones, debido, por ejemplo, a un cambio en las condiciones resistentes de la mina, tendrá presumiblemente una disminución de rendimiento considerable.

- Mayor rendimiento mecánico de los ventiladores axiales, ya que los ventiladores centrífugos transmiten el movimiento desde motor al rodete con transmisión por correas o mediante otros tipos transmisiones. Esto implica una serie de complicaciones adicionales frente a un ventilador axial, ya que además de la pérdida de rendimiento por transmisión, podrían aparecer más frecuentemente fenómenos de vibraciones debido a que es un sistema mecánico más complejo.
- En ciertos ventiladores centrífugos se plantean problemas en la transmisión como puede ser el deslizamiento de la correa, destensado, exceso de tensado que repercute sobre los rodamientos, y con cierto peligro de rotura de las correas cuando están expuestas a temperaturas extremas.
- Un ventilador axial, para las mismas prestaciones de presión y caudal, requiere menor espacio físico que un ventilador centrífugo, ya que por el diseño puede utilizar motores de mayor velocidad. El ventilador centrífugo, al contrario, necesita cimentaciones mayores para el ventilador y toda su ductería incrementando el costo de la instalación significativamente.
- La presencia de agua es perjudicial para los ventiladores centrífugos, ya que el rodete de estos, presentan en su configuración huecos que acumulan agua mientras trabajan, produciendo un desequilibrio en el ventilador que degenera en vibraciones.
- Un ventilador axial tiene más versatilidad en la regulación que un ventilador centrífugo, ya que podemos actuar sobre el ángulo de posición de los álabes y sobre la velocidad de rotación con un variador de frecuencia, pudiendo alcanzar una gran gama de puntos de funcionamiento, mientras que el ventilador centrífugo tiene regulación por velocidad, y si queremos conseguir otro punto de funcionamiento,

será a base de aumentar la resistencia del circuito (con un damper de regulación, p.e.), lo que significaría un incremento de potencia debido a la regulación.

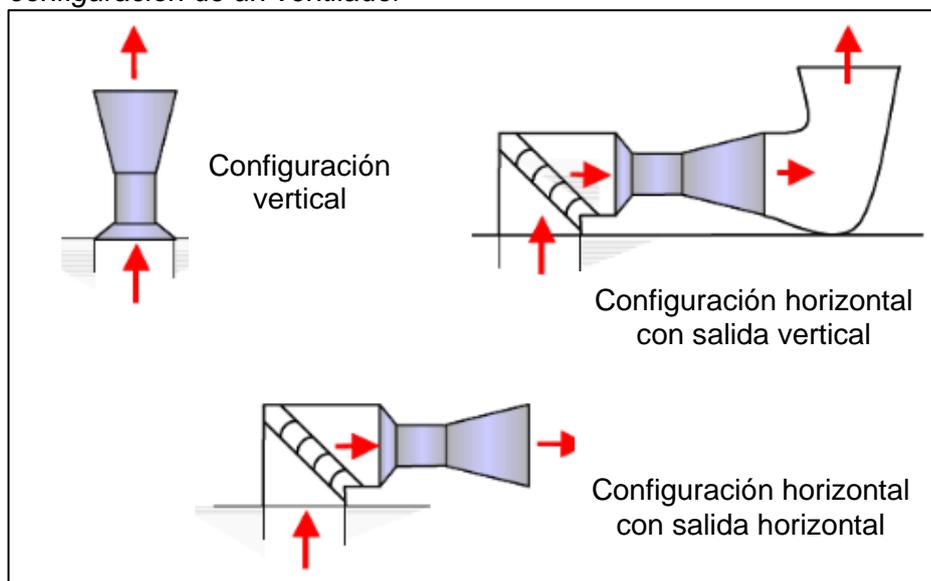
- En este capítulo nos centraremos especialmente en los ventiladores axiales que son los que se utilizan en la mayoría de las instalaciones.

2.1.6.3 Tipos de configuraciones de un ventilador. Un ventilador puede ser, según su forma constructiva, horizontal o vertical.

Los ventiladores horizontales son los más usuales, pero los verticales son más aconsejables para ciertos tipos de aplicaciones. Es este el caso en los ventiladores exteriores de minería profunda, donde la configuración vertical reduce las pérdidas de carga del circuito, al evitarse el tener que construir un codo para dirigir el flujo. Este codo genera unas pérdidas de carga importantes, que se traducen en más potencia a instalar. Todo esto se evita con una configuración de ventilador vertical.

Figura 8

Tipos de configuración de un ventilador



Fuente: Goldcorp

La figura anterior describe tres configuraciones clásicas de ventiladores axiales en minería subterránea: configuración vertical, configuración horizontal con salida vertical y configuración horizontal con salida horizontal. Para dirigir el flujo de aire hacia el ventilador, es necesario un codo, lo que trae inconvenientes. Respecto al accionamiento, los ventiladores pueden conectarse al motor directamente, mediante un eje cardán o poleas y

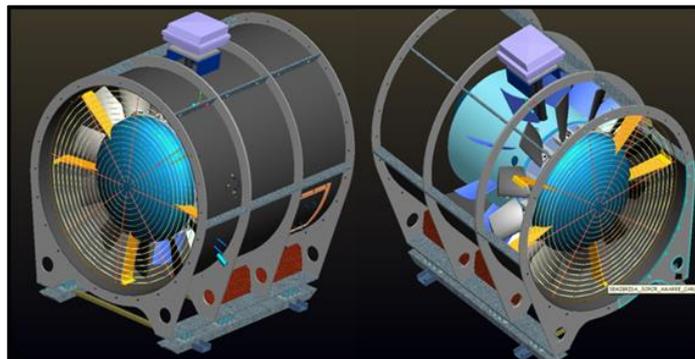
correas. El acoplamiento directo es el más común, pero el cardán se usa en casos de aire corrosivo o explosivo y para facilitar el mantenimiento. El sistema de poleas y correas es menos eficiente y ha caído en desuso.

2.1.6.4 Componentes de un ventilador axial. Los componentes de un ventilador axial incluyen:

- Parte activa: contiene el motor, el rodete con álabes y directrices, generalmente en dos carcasas (una para el rodete y otra para el motor).
- Compuerta motorizada: tipo “todo o nada”, como un damper o guillotina.
- Difusor: reduce la velocidad del aire a la salida de la parte activa, disminuyendo la presión dinámica y pérdidas.
- Carcasas de medición: permiten medir presión y caudal, ubicadas usualmente en el lado de aspiración de la parte activa.
- Conexión al circuito: varía según ubicación, usando codos o conexiones a pared.
- Rodete: compuesto por los álabes y su soporte, que mantiene los álabes en posición durante el giro del motor.

Figura 9

Componentes del ventilador axial



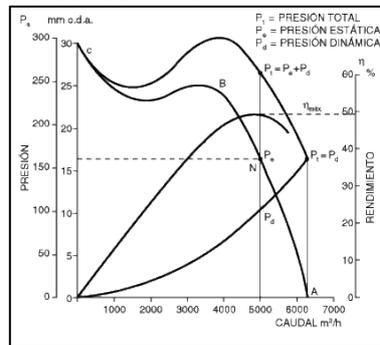
Fuente: Goldcorp

2.1.6.5 Curva característica de un ventilador. Un ventilador podemos caracterizarlo por su curva, que es el lugar geométrico de los puntos de funcionamiento del mismo. Para cada ángulo de regulación de los álabes tendremos una curva distinta. El punto de corte de la curva del ventilador con la resistencia del circuito es el punto de funcionamiento del ventilador, (P_o, Q_o) .

Con un punto de funcionamiento, estamos definiendo el punto de corte de la curva característica del ventilador con la curva resistente del circuito de ventilación. Por tanto, el punto Po y Qo pertenece a la curva resistente de la mina.

Figura 10

Curva característica de un ventilador de mina



Fuente: Goldcorp

2.1.6.6 Acoplamiento de ventiladores. En instalaciones importantes de ventilación, cuando es necesario disponer de caudales o presiones con grandes variaciones, puede resultar conveniente de dotarlas de equipos acoplados de forma que trabajando en conjunto o bien separados proporcionen la prestación exigida en cada momento. Si las variaciones necesarias son discretas puede bastar un único aparato con un sistema de regulación, pero cuando sean precisas unas capacidades muy elevadas, hay que recurrir a un sistema de acoplamiento de equipos, tanto en serie como en paralelo.

2.1.6.6.1 Ventiladores en serie. Con el trabajo en serie de dos ventiladores, el caudal de aire que pasa por ambos ventiladores debe ser igual, de valor Q1 y la depresión total es igual a la suma de las depresiones producidas por cada ventilador $PT = PT/2 + PT/2$.

En consecuencia, la curva característica totalizada de ambos ventiladores se construye sumando las ordenadas de sus curvas características individuales.

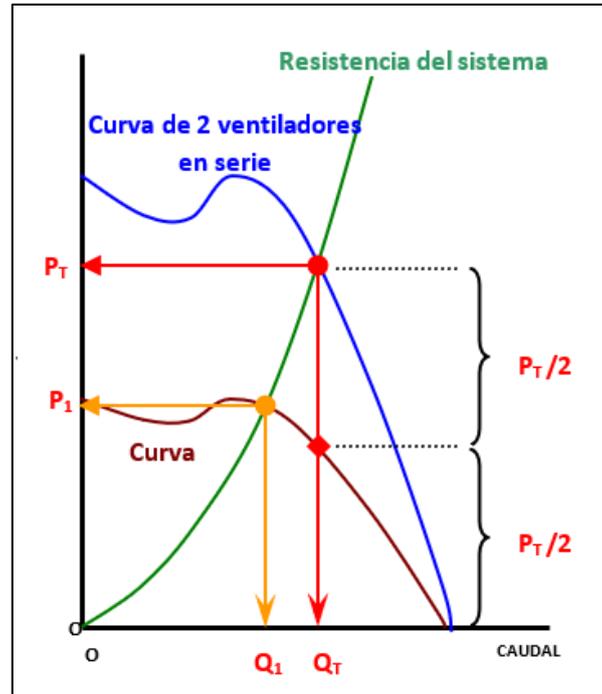
El caudal total de dos ventiladores iguales, instalados en serie y que giran con igual número de revoluciones, es mayor que cada caudal parcial, pero, siempre inferior a la suma de los caudales del trabajo individual.

Es decir, $Q1 < QT < Q1 + Q2 = 2xQ1$

Para una resistencia dada, como podemos ver en el gráfico adjunto, un solo ventilador podría trabajar en un punto próximo al bombeo, en cambio, al acoplarle otro ventilador, se puede observar que (P_T, Q_T) , está bastante alejado del régimen inestable.

Figura 11

Curva característica de ventiladores en serie



Fuente: Goldcorp

2.1.6.6.2 Ventiladores en paralelo. En un sistema de trabajo de dos ventiladores en paralelo, cada ventilador es concebido para la mitad del caudal de diseño. Cuando dos ventiladores trabajan en paralelo, forman un sistema que estará caracterizado por la curva resultante de la suma las abscisas de sus curvas características individuales.

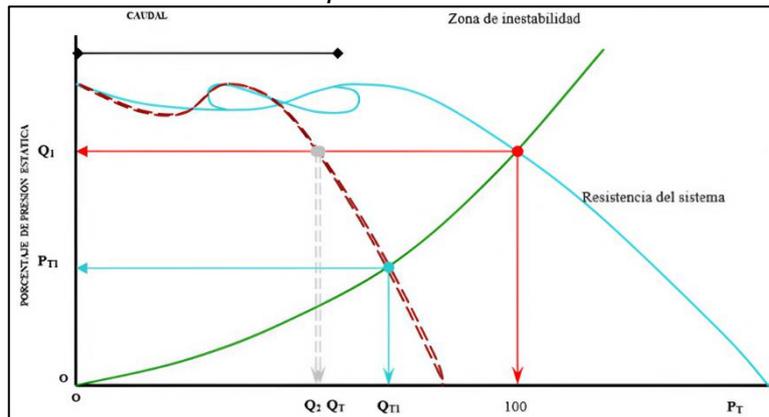
La resistencia del circuito corta la curva del sistema en un punto (P_T, Q_T) . El punto de funcionamiento de cada ventilador, como se puede ver en el gráfico anexo, corresponde a $(P_T, Q_1=Q_2)$, tal que $Q_1+Q_2= Q_T$ para el caso de dos ventiladores idénticos.

Si sólo uno de los ventiladores trabajase, su punto de funcionamiento sería distinto, con una presión más baja y con un caudal de aire mayor, (P_{T1}, Q_{T1}) .

Al contrario del trabajo en serie de 2 ventiladores, si la resistencia del circuito de ventilación es importante, si se arrancan 2 ventiladores en paralelo, estos pueden entrar en régimen inestable a pesar de que individualmente trabajen bien.

Figura 12

Curva característica de ventiladores en paralelo



Fuente: Goldcorp

2.1.6.7 Fenómeno de bombeo. Los mayores problemas con la inestabilidad de los ventiladores se producen en el trabajo de múltiples ventiladores en paralelo.

Incluso, aunque la resistencia sea apta para poder trabajar en paralelo dos ventiladores, debido al sistema o la secuencia de arranque, se pudiera no alcanzar nunca la estabilidad, (Efecto Eck).

Para un solo ventilador en funcionamiento, si la resistencia del circuito fuese mayor de lo estimado, el punto de funcionamiento se desplazaría hacia caudales mayores, pero, si la resistencia fuese más elevada en punto de funcionamiento tendería a caudales inferiores, llegando incluso a hacer que el ventilador trabajase en régimen inestable, es decir en bombeo. Este fenómeno se evita ya en fase de diseño calculando un tipo de álabe que defina una curva del ventilador, tal que el corte con la curva resistente esté fuera de la zona inestable del ventilador.

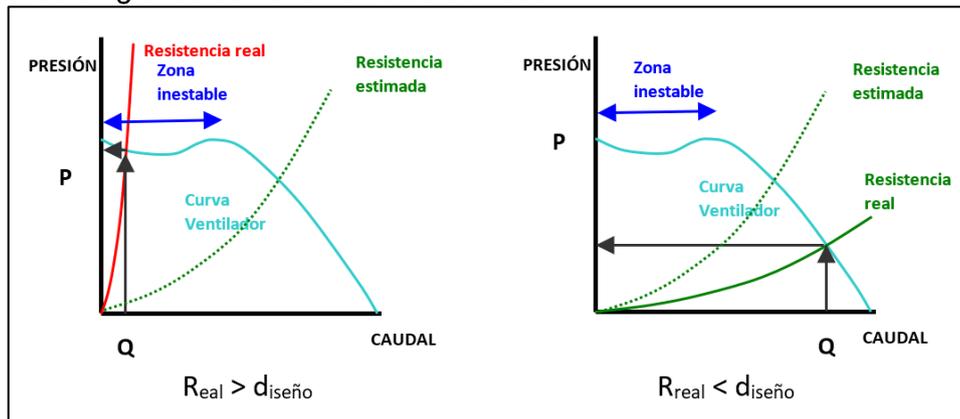
Para cada curva característica del ventilador tendremos un punto de bombeo, por tanto, si tenemos en cuenta que un ventilador tiene un haz de curvas que abarca el rango de regulación de los álabes, definimos la curva formada por los puntos de bombeo del haz como “curva límite de bombeo”.

Un ventilador operando cerca del punto de bombeo tendrá un severo incremento de ruido. En algunos ventiladores sonará casi como si el rodete estuviese siendo impactado por un objeto sólido (“hammering”).

Un ventilador trabajando continuamente en bombeo puede provocar una fatiga estructural de los álabes. Esto es especialmente cierto para ventiladores axiales que tienen álabes largos, como es el caso de los ventiladores que entregan un alto caudal a presiones moderadas.

Figura 13

Representación gráfica del fenómeno de bombeo



Fuente: Goldcorp

2.1.6.8 Potencia eléctrica de consumo. Gran parte de los ventiladores de las minas son impulsados por motores eléctricos (de corriente alterna); la energía eléctrica que consume dicho motor puede calcularse en la siguiente Ecuación 7:

$$W = E \cdot I \cdot \text{pf} \cdot \sqrt{3} \quad (7)$$

Dónde:

W: = Potencia Eléctrica en Kw.

E = Voltaje en kv.

I = Corriente en Amp.

pf = Factor de potencia, $\cos\phi$.

Las consideraciones que debemos tener en cuenta para calcular la potencia del motor son:

- El caudal de aire que necesitamos mover, ello depende de nuestro requerimiento, según el personal que labora, los equipos diésel, el tipo y cantidad de explosivo a utilizar. (Q)

- Cuál es la presión del sistema, ello está sujeto al caudal y la topografía de los ductos de la mina. (H)
- La eficiencia centrífuga del ventilador, la cual varía entre 60 a 80%, dependiendo de la fabricación, tamaño y punto de trabajo. (η)
- Cuanto es la potencia mecánica necesaria para mover el caudal Q de aire en un circuito cuya depresión es H, en Kw. (AHP).

$$AHP = Q \times H \quad (8)$$

- La potencia eléctrica del ventilador en Kw. (BHP)
- La eficiencia de la transmisión, la cual varía entre 90% para transmisión por poleas y correas, y 100% para transmisión directa. (DE)

$$BHP = \frac{Q \times H \times DE}{\eta} \quad (9)$$

- Cuanto es el costo de operación, que está en función de la potencia del ventilador BHP, el costo unitario de energía por hora C_e y el tiempo de trabajo t. (C_o)

$$C_o = BHP \times C_e \times t \quad (10)$$

2.2 Marco conceptual

- **Sistema de ventilación mina:**

Consiste en el proceso con el que se ventila un espacio interior. En este procedimiento se suministra y extrae aire mediante el uso de distintos sistemas.

- **Modelo de ventilación:**

Diseño o modo como se realizará el Sistema de ventilación.

- **Optimización del sistema ventilación:**

Modo más eficiente en el funcionamiento del sistema.

- **Velocidad de aire:**

Medida física de la rapidez del aire.

- **Flujo de aire:**

Medida volumétrica del aire.

- **Simulación de flujo de aire:**

Formas del comportamiento o funcionamiento del sistema planteado.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Unidad de estudio

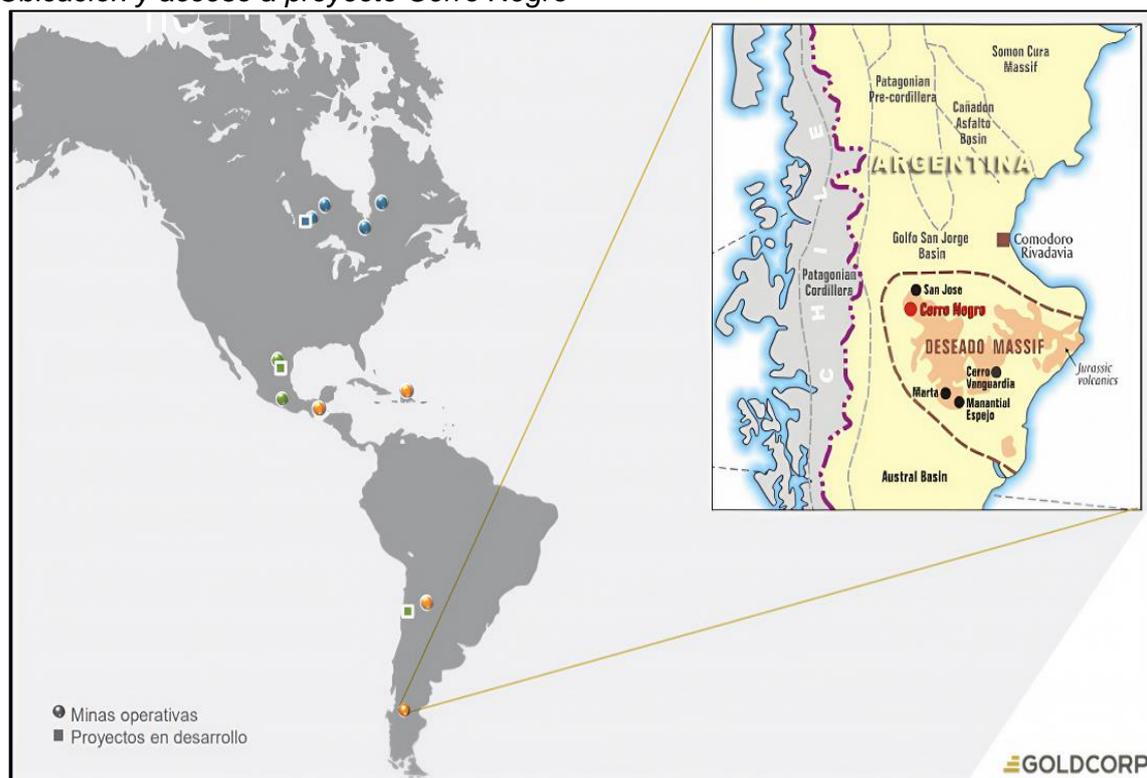
3.1.1 Ubicación y acceso

El proyecto Cerro Negro es el principal emprendimiento de Goldcorp en Argentina. Está ubicado a 70 kilómetros de la ciudad de Perito Moreno, al noroeste de la provincia de Santa Cruz, en un área comprendida por 21548 hectáreas. Es una explotación minera subterránea de vetas de cuarzo que contienen oro y plata.

Se encuentra a 600 metros sobre el nivel del mar en las llanuras bajas de la Patagonia en el sur de Argentina. Se trata de un viaje de seis horas al suroeste de Comodoro Rivadavia, a sí mismo un vuelo de dos horas y media al sur de Buenos Aires.

Figura 14

Ubicación y acceso a proyecto Cerro Negro



Fuente: Goldcorp

3.1.2 Clima y topografía

El proyecto Cerro Negro consta de depósitos epitérmicos de oro y plata de baja sulfuración en un extenso terreno poco explorado de 250 kilómetros cuadrados. Está

ubicada cerca del borde noroeste del Macizo del Deseado de 60,000 kilómetros cuadrados, un bloque rígido de corteza terrestre delimitado por Río Deseado, Río Chico, la costa del Atlántico y la Cordillera de los Andes.

3.2 Levantamiento de ventilación

Al principio la mina Eureka no contaba con un sistema de aforo no planeamiento en el levantamiento de caudales, por lo que fue necesario realizar una implementación de la metodología de trabajo. El aforo se daría en las principales estaciones de monitoreo asignadas en varios puntos de la mina, así como estaciones en los niveles en zonas donde se tenga flujo de aire continuo que permitiesen realizar mediciones periódicas. De esta manera se podría ayudar a la operación en los cambios de flujo que ocurren en las diferentes zonas de la mina de acuerdo al método de minado y los ciclos de minado, de esta manera se podría corregir las posiciones de los ventiladores y la posición de las mangas de ventilación.

3.2.1 Método de Medición

El método empleado para las mediciones de velocidades de aire en estaciones de monitoreo es el "Método del Barrido". El método consiste en mediante el uso de una anemómetro electrónico o mecánico durante un tiempo determinado, realizar un barrido como se muestra en la figura en la sección de la estación de monitoreo. Se puede realizar hasta 2 veces el procedimiento para comprobar las mediciones y realizando un promedio.

- Anemómetro de paletas (2 lecturas dentro del 5%).
- Asegurar que se realice una travesía transversal completa.
- Tiempo mínimo de 1 minuto para las vías respiratorias típicas.
- Tubos de humo (en corrientes de aire inferiores a 0,25 m / s).
- Cinta métrica de acero para el área (3 medidas horizontales y 3 verticales, luego el promedio del área).

Se desarrollo estaciones de medición de flujo de aire - marque la costilla para uso futuro

Figura 15

Método de medición de ventilación



Fuente: Goldcorp

3.2.2 Metodología del trabajo de campo

Se detallan las actividades:

- Se debe de conocer e identificar las entradas y salidas de aire sean principales o secundarias.
- Conociendo las entradas y salidas de aire se deben codificar todas las estaciones de monitoreo, dichas estaciones deben estar ubicadas en los planos de ventilación, dichas estaciones deben estar acondicionadas y remarcadas, las estaciones deben tener información del nivel donde se encuentran, la dirección del flujo, la velocidad promedio, el área, así como el caudal medido, y condiciones psicométricas.
- Se debe realizar un levantamiento de la infraestructura de ventilación como ventiladores, puertas, reguladores, mangas, etc. De esta manera se tendrá una relación detallada de la infraestructura instalada en ventilación.
- Concluido el levantamiento de caudales, se debe determinar el balance de entradas y salidas de aire, no debe exceder en más de un 10%. Cabe resaltar que los

levantamientos deben incluir datos físicos como temperatura, HR, gases, etc. Los cuales pueden ponerse en las estaciones de ventilación principales y las más visitadas.

- Al elegir la estación de monitoreo en una galería tomar en cuenta que la estación deberá estar en una zona recta y sección uniforme de la galería para evitar turbulencias, las cuales se generan por los cambios bruscos en el área y curvas.
- La medición de caudales se puede realizar en las galerías que comunican tanto al pie como a la cabeza de las mismas, debida que al acercarse a la chimenea la turbulencia que se genera arroja datos erróneos.

3.2.3 Equipos de medición.

Se nombran el equipo de medición utilizada:

- Anemómetro Digital con sonda molinete de 60 mm \varnothing
- Medidor de distancia laser (distanciómetro)
- Medidor de Gases que registre O₂, CO y NO₂.)
- Un flexómetro (wincha) de 5 m.
- Un cronometro digital.

Figura 16

Equipos de medición de parámetros de ventilación



Fuente: Goldcorp

3.2.4 Estaciones principales

Las estaciones principales de la Mina Eureka se instalaron a partir del mes de abril del 2012 como una necesidad al mejoramiento en el cambio de los circuitos de ventilación. Las estaciones servirían como puntos de partida para la calibración del programa Ventsim tanto en la condición actual como para simulaciones futuras en la mina.

Se muestran las mediciones de caudales de las estaciones principales:

Tabla 4

Estaciones principales – mina Eureka

ESTACIÓN	UBICACIÓN	
	NIVEL	LABOR
V1	650	Bocamina Eureka
V10 – A	502	Portón ventilación – Pie RB 1
V13	476	Pie RB 3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

Mediciones de caudales estaciones principales – mina Eureka

Estación	Ubicación		Medición de velocidades (m/seg)										Caudal		
	Nivel	Labor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Área m ²	Caudal m ³ /seg	Caudal cfm	
V1	650	Bocamina Eureka	3.2	3.5	3.4	3.1	3.3	3.3	3.1	3.2	3.3	22.63	73.94	156,647	
V10 – A	502	Portón ventilación – Pie RB 1	3.0	3.7	5.2	3.3	4.3	4.2	4.5	5.2	5.7	9.52	41.04	86,953	
V13	476	Pie RB 3	7.2	7.2	7.3	6.9	6.4	6.1	4.4	4.4	4.2	20.77	124.86	264,527	

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Estaciones secundarias

Las estaciones secundarias de la Mina Eureka se instalaron a partir del mes de abril del 2012 como una necesidad al mejoramiento en el cambio de los circuitos de ventilación. Las secundarias fueron colocadas en accesos a niveles, rampas, etc. para complementar las estaciones principales, al tener un sistema mediano las entradas y salidas son muy limitadas, por lo que la distribución de caudales se realizara mediante ventilación secundaria a través de ventiladores medianos con sus respectivos ductos. Las estaciones

secundarias fueron ubicadas principalmente en los Niveles 502, 476 y 450, los demás niveles como el 554 y 528, aunque ya se tenían un avance inicial no estaban dentro del planeamiento a corto y mediano plazo. Se muestran las mediciones de caudales de las estaciones secundarias:

Tabla 6

Estaciones Secundarias – Mina Eureka

ESTACIÓN	UBICACIÓN	
	NIVEL	LABOR
V10	502	Acceso nivel 502
V11	502	Rampa principal – alt. R18 debajo nv. 502
V10 – 2	502	Ventana RB 2
V12	476	Acceso nivel 476
V13	476	Pie Raise Bore 3
V17	476	Acceso a las dos chimeneas que vienen de los nvs. 502 y 450
V14	450	Pie ch. 450 al 476
V15	450	Acceso nivel 450

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7

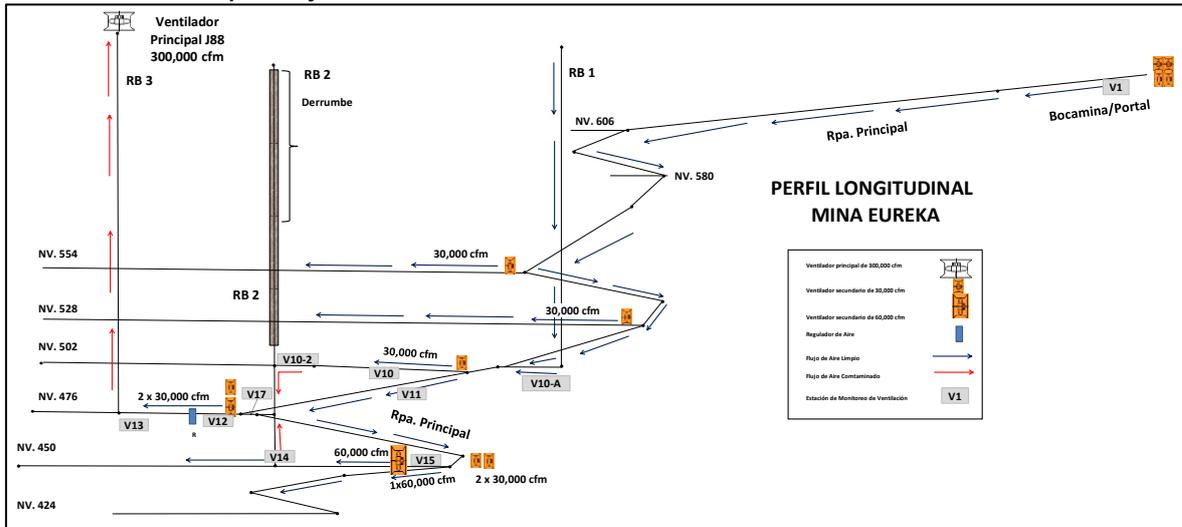
Mediciones de Caudales Estaciones Secundarias – Mina Eureka

Estación	Ubicación		Medición de velocidades (m/seg)									Caudal		
	Nivel	Labor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Área m ²	Caudal m ³ /seg	Caudal cfm
V10	502	Acceso nivel 502	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	22.46	15.72	33,309
V11	502	Rampa principal	4.5	4.8	5.1	5.3	5.4	6.0	5.4	5.6	5.9	20.66	110.19	233,446
V10 – 2	502	Ventana RB 2	0.7	0.8	0.7	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	23.82	13.23	28,037
V12	476	Acceso nivel 476	2.5	2.7	2.6	3.0	3.3	3.4	3.0	2.7	3.1	22.58	65.98	139,796
V13	476	Pie Raise Bore 3	7.2	7.3	7.2	6.9	6.4	6.1	4.4	4.4	4.2	20.77	124.85	264,514
V17	476	Acceso chimeneas	2.4	2.6	2.8	2.4	2.2	2.4	2.2	2.2	2.2	22.22	52.83	111,937
V14	450	Pie ch. 450 al 476	0.9	0.9	0.9	0.4	0.6	0.7	0.5	0.4	0.8	21.34	14.46	30,644
V15	450	Acceso nivel 450	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	25.55	5.11	10,826

Fuente: Elaboración propia

Figura 17

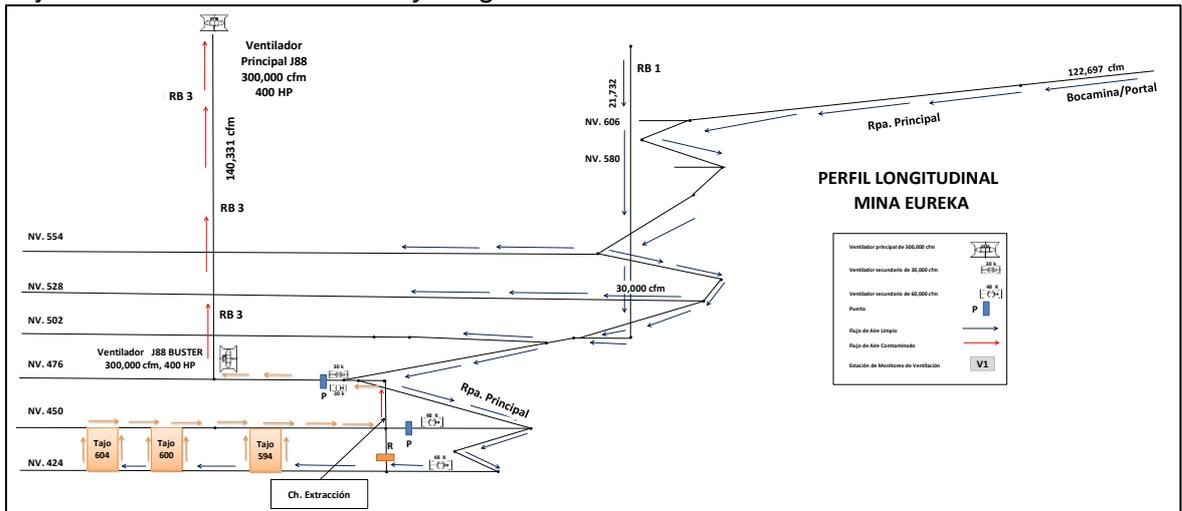
Estaciones Principales y Secundarias de Ventilación



Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Tajeos Planificados a Mediano y Largo Plazo – Mina Eureka



Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Análisis de Velocidades por Niveles

Para los análisis de velocidades por niveles se presenta el cálculo previo de la cantidad de aire requerida por cada nivel, al mes de abril del año 2012 se contaban con 3 niveles en desarrollo y preparación para los minados de los tajeos, cabe resaltar que cada nivel contaba con una entrada de aire el cual era el acceso al mismo y la extracción se realizaba a través de la chimenea RB 3, el cual estaba comunicada desde el Nivel 476 a superficie.

- **Q1:**

Caudal requerido por personal, para una altura de 600 msnm se requiere un caudal de 160 cfm por persona.

Tabla 8

Caudal requerido por personal

PERSONAL	CANTIDAD TRABAJADORES X GUARDIA	CFM X PERSONA	CFM TOTAL
Trabajadores	10	160	1,600
Total			1,600

Fuente: Elaboración propia

- **Q2:**

Caudal requerido x dilución de gases de la combustión de equipos Diesel, para una altura de 600 msnm se requiere 106 cfm por cada HP.

Tabla 9

Caudal requerido por dilución de gases por equipos Diesel

EQUIPOS	HP	CANT.	CFM X HP	% SIMULTANEIDAD	% UTILIZACIÓN	CFM
Scoop 6yd3	295	1	106	0.7	0.85	18,606
Damper 30 tn	400	1	106	0.5	0.85	18,020
Telescope Crane	100	1	106	0.2	0.60	1,272
Jumbo vertical	99	1	106	0.2	0.30	630
Total						38,527

Fuente: Elaboración propia

- **Q3:**

Caudal requerido x dilución de gases de voladura.

Tabla 10

Caudal requerido por dilución de gases de voladura

LABORES	SECCIÓN		ÁREA M ²
	ANCHO M	ALTO M	
Galerías	4.3	4.7	20.21
Rampas	4.3	4.7	20.21
Chimeneas	2.4		4.52
Área promedio m²			14.98

$$Q3 = A \times N \times V$$

A: Área promedio m²

N: Cantidad de niveles (3)

V: Velocidad de aire para dilución de gases (25 m/min)

$$Q3 = \text{Total m}^3/\text{seg} = 18.73$$

$$Q3 = \text{Total cfm} = 39,672$$

Fuente: Elaboración propia

- **Caudal requerido por nivel.**

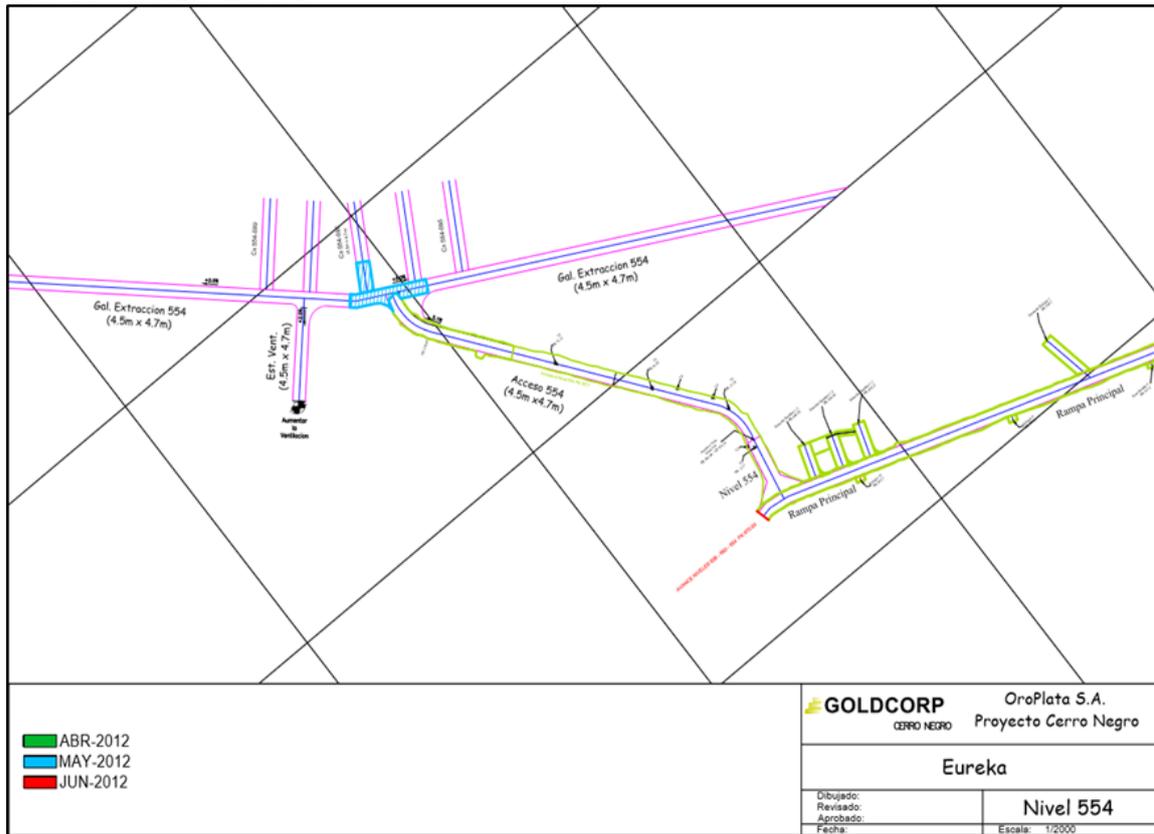
Caudal (cfm) = 40,127

Se tomará el caudal requerido por nivel a la suma del Q1 + Q2, debido a que los equipos diésel son retirados cuando se efectúa la voladura y el caudal Q1 y Q2 cubre la dilución de los gases de voladura.

3.2.6.1 Nivel 554. Las mediciones de caudales en el Nivel 554 al mes de abril 2012 no se efectuaban por la razón a que se daba prioridad a los desarrollos de los niveles 502 al 424 para realizar el armado de los tajeos de producción que iban a salir en los próximos meses, se muestra el avance que tenía el Nivel 554 en aquel momento, cabe resaltar que el nivel estaba parado sin ningún tipo de trabajo:

Figura 19

Nivel 554 – Mina Eureka



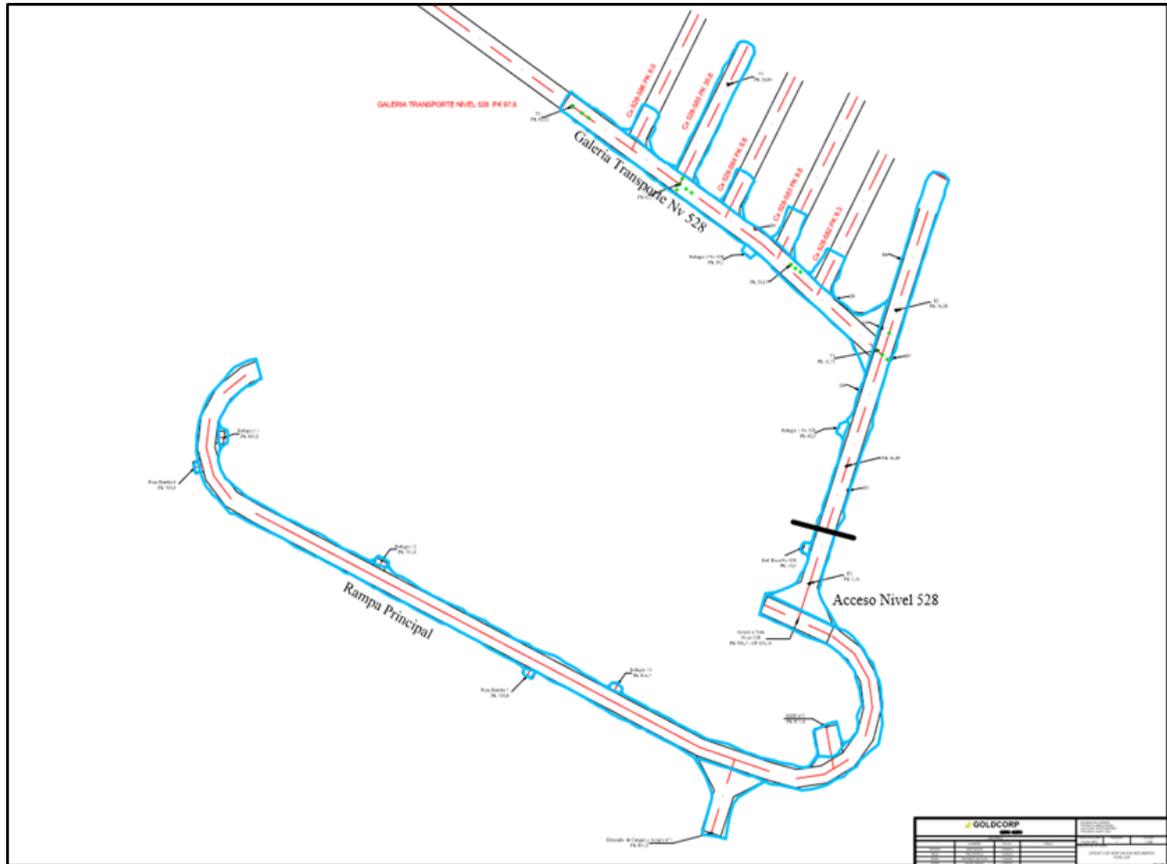
Fuente: Goldcorp

3.2.6.2 Nivel 528. Las mediciones de caudales en el Nivel 528 al mes de abril 2012 no se efectuaban por la razón a que se daba prioridad a los desarrollos de los niveles 502 al 424, para realizar el armado de los tajeos de producción que iban a salir en los

próximos meses, se muestra el avance que tenía el Nivel 528 en aquel momento, cabe resaltar que el nivel estaba parado sin ningún tipo de trabajo:

Figura 20

Nivel 528 – Mina Eureka



Fuente: Goldcorp

3.2.6.3 Nivel 502. Las estaciones de medición que se instalaron en un principio en el Nivel 502 fueron las siguientes:

Tabla 11

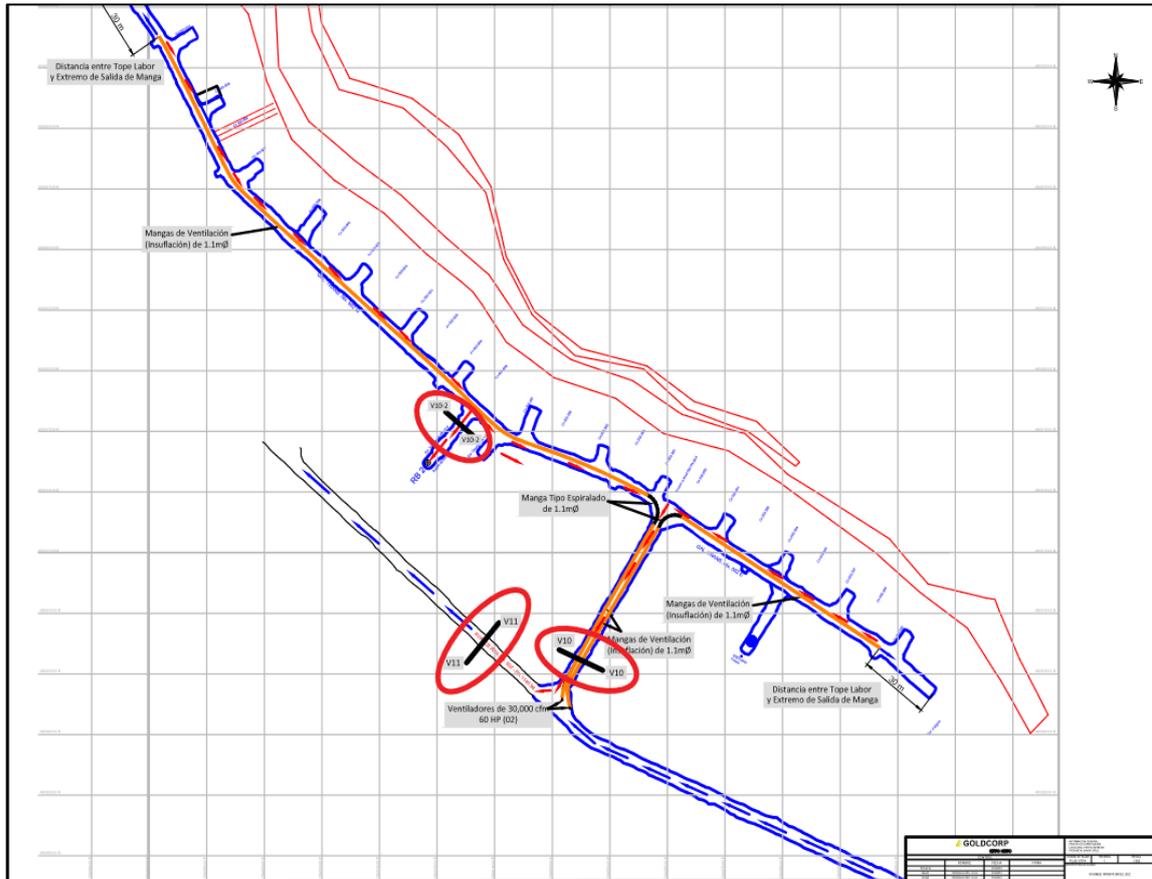
Estaciones Secundarias y Mediciones de Caudales Nivel 502

Estación	Ubicación		Medición de velocidades (m/seg)									Caudal		
	Nivel	Labor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Área m ²	Caudal m ³ /seg	Caudal cfm
V10	502	Acceso nivel 502	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	22.46	15.72	33,309
V11	502	Rampa principal	4.5	4.8	5.1	5.3	5.4	6.0	5.4	5.6	5.9	20.66	110.19	233,446
V10 – 2	502	Ventana RB 2	0.7	0.8	0.7	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	23.82	13.23	28,037

Fuente: Elaboración propia

Figura 21

Ubicación de Estaciones Secundarias Nivel 502



Fuente: Goldcorp

De acuerdo al DECRETO SUPREMO N.º 023-2017-EM Artículo 252 las velocidades de aire deben ser de un mínimo de 30 m/min (0.2 m/seg) para mantener las condiciones termo ambientales adecuadas y una adecuada ventilación en el área de trabajo para evitar la acumulación de gases y una buena dilución de los mismos.

Como se muestra en la tabla anterior las mediciones de velocidades superan los 30 m/min por lo que las condiciones estarían adecuadas de acuerdo a las normas.

3.2.6.4 Nivel 476. Las estaciones de medición que se instalaron en un principio en el Nivel 476 fueron las siguientes:

Tabla 12

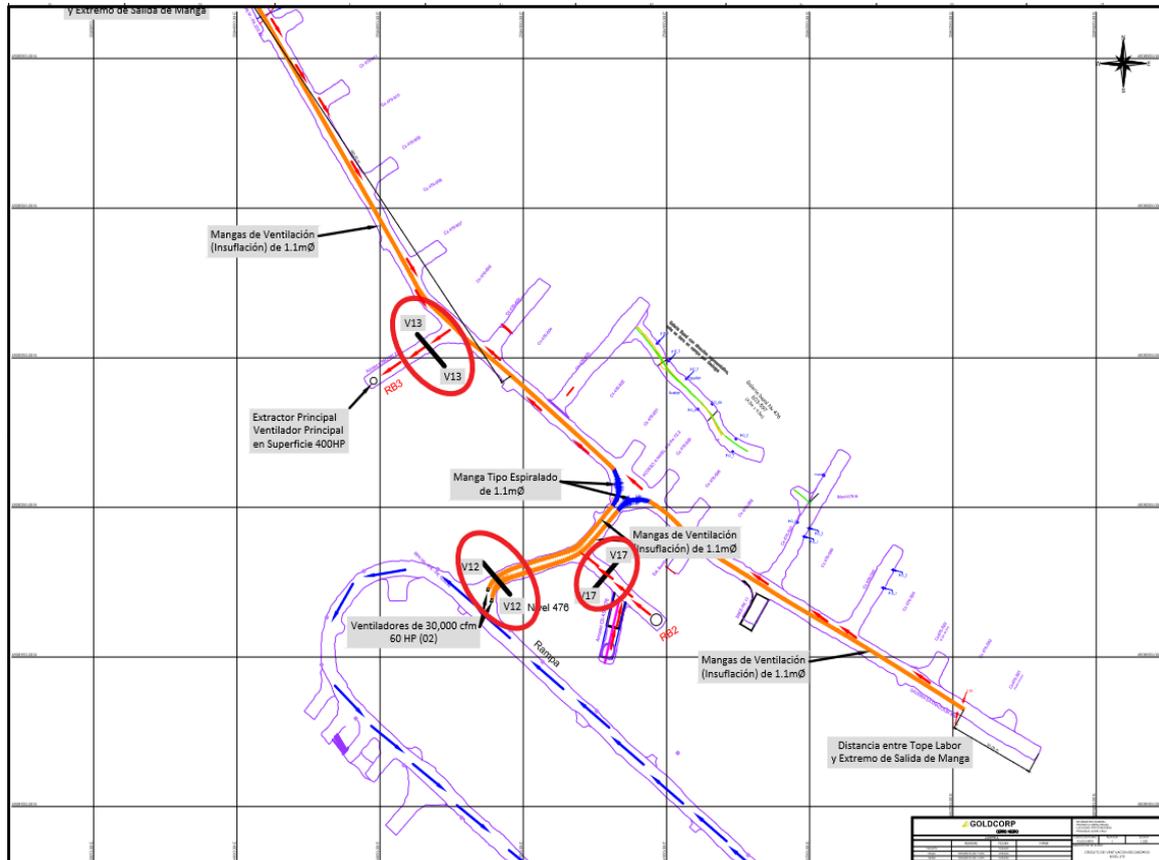
Estaciones Secundarias y Mediciones de Caudales Nivel 476

Estación	Ubicación		Medición de velocidades (m/seg)									Caudal		
	Nivel	Labor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Área m2	Caudal m2/seg	Caudal cfm
V12	476	Acceso nivel 476	2.5	2.7	2.6	3.0	3.3	3.4	3.0	2.7	3.1	22.58	65.98	139,796
V13	476	Pie Raise Bore 3	7.2	7.3	7.2	6.9	6.4	6.1	4.4	4.4	4.2	20.77	124.85	264,514
V17	476	Acceso chimeneas	2.4	2.6	2.8	2.4	2.2	2.4	2.2	2.2	2.2	22.22	52.83	111,937

Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Ubicación de Estaciones Secundarias Nivel 476



Fuente: Goldcorp

3.2.6.5 Nivel 450. Las estaciones de medición que se instalaron en un principio en el Nivel 450 fueron las siguientes:

Tabla 13

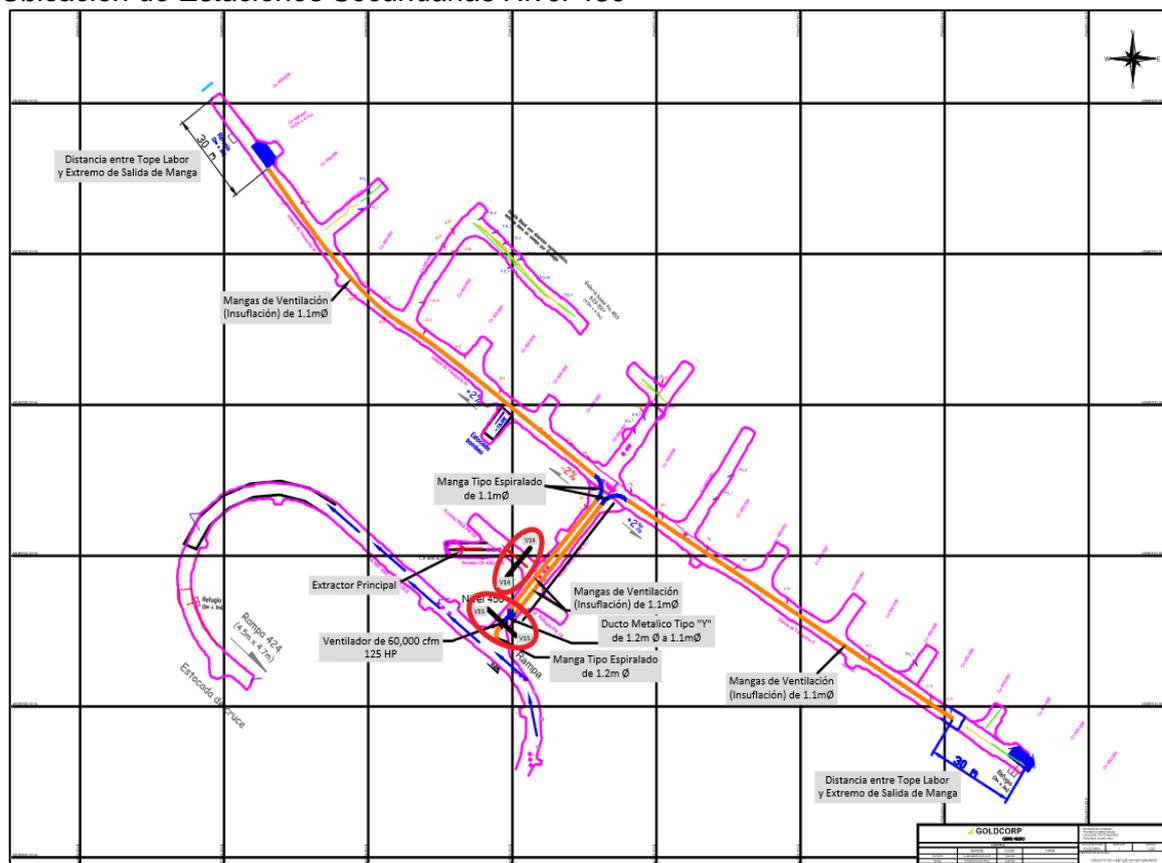
Estaciones Secundarias y Mediciones de Caudales Nivel 450

Estación	Ubicación		Medición de velocidades (m/seg)									Caudal		
	Nivel	Labor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Área m2	Caudal m2/seg	Caudal cfm
V14	450	Pie ch. 450 al 476	0.9	0.9	0.9	0.4	0.6	0.7	0.5	0.4	0.8	21.34	14.46	30,644
V15	450	Acceso nivel 450	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	25.55	5.11	10,826	

Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Ubicación de Estaciones Secundarias Nivel 450



Fuente: Goldcorp

3.3 Ventiladores

En esta parte se realizó un levantamiento de los ventiladores que estaban en operación y los que estaban en stand by. Cerro Negro contaba con una cantidad considerable de ventiladores secundarios y algunos principales. Muchos de los ventiladores debían ser reubicados y otros retirados. A medida que las operaciones se

incrementaban se tenía que recomendar ventiladores adicionales, con características específicas.

3.3.1 Inventario de ventiladores

De acuerdo al levantamiento realizado en los diversos puntos de acopio, así como en las zonas instaladas se tiene la relación de ventiladores, se cuenta con información de las características de los ventiladores que se muestra a continuación:

Tabla 14

Ventiladores Principales – Cerro Negro

Caudal (m3/hr)	Caudal (cfm)	Motor HP	Marca	Presion estatica (mm c.a.)	Presion estatica (" c.a.)	Presion total (" c.a.)	Diametro mm	RPM	Situacion
521,900	307,145	400	Cirigliano	45	1.77	4.99	2220	970	Operativo
521,900	307,145	400	Cirigliano	45	1.77	4.99	2220	970	Stand by

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15

Ventiladores Secundarios – Cerro Negro

Caudal (m3/hr)	Caudal (cfm)	Motor (HP)	Marca	Presion estatica (mm c.a.)	Presion estatica (" c.a.)	Presion total (" c.a.)	Diametro mm	RPM	Situacion
100,000	58,851.2	450	Cirigliano	110	4.33	5.7	1220	1450	Operativo
100,000	58,851.2	600	Cirigliano	110	4.33	5.7	1220	1450	Stand by
100,000	58,851.2	600	Cirigliano	110	4.33	5.7	1220	1450	Stand by

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16*Ventiladores auxiliares – Cerro Negro*

Numero	Caudal (cfm)	Motor HP	MARCA	Presion estatica (mm c.a.)	Presion estatica (" c.a.)	Presion total (" c.a.)	Diametro mm	RPM	Situación
1	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
2	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
3	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
4	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
5	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
6	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
7	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
8	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
9	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
10	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
11	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
12	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
13	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
14	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Operativo
15	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
16	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
17	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
18	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
19	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
20	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
21	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by
22	30,017.3	60	Cirigliano	150	5.91	8.24	760	300	Stand by

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Balance de energía

Con el fin de tener un control de los consumos eléctricos, así como la eficiencia en la entrega de caudales de los ventiladores mineros, se requiere realizar un relevamiento de los consumos de energía de los equipos, de esta manera se puede dar a conocer los consumos reales de los ventiladores.

Los consumos eléctricos dependerán del sistema al cual forma parte, dependerá de los ductos acoplados, así como las restricciones y resistencias de los mismos.

Se realizaron mediciones en campo de voltaje y amperaje de los ventiladores instalados en mina, el trabajo se realizó en conjunto con el área de mantenimiento eléctrico.

Tabla 17

Consumo de Energía en Ventiladores Instalados – Mina Eureka

Nivel	Labor	Caudal Nominal cfm	Motor HP nominal	Caudal Llegada cfm	Amp. A	Volt. V	Potencia Absorbida HP	% Variación
600	Raise Bore 3	307,145	400	264,527	410	489	395	99
450	Acceso nivel	58,851	125	55,000	410	106	86	69
600	Portal superficie	30,017	60	12,500	380	61	46	77
600	Portal superficie	30,017	60	12,500	380	61	46	77
600	Portal superficie	30,017	60	11,500	380	63	47	78
600	Portal superficie	30,017	60	11,500	380	63	47	78
554	Acceso principal	30,017	60	26,000	380	60	45	75
528	Acceso principal	30,017	60	21,000	410	66	54	89
502	Acceso principal	30,017	60	26,000	410	60	48	81
502	Rampa principal RB1	30,017	60	17,902	380	57	43	71
502	Rampa principal RB1	30,017	60	17,905	380	57	43	71
502	Rampa principal RB1	30,017	60	17,902	380	57	43	71
502	Rampa principal RB1	30,017	60	17,902	380	57	43	71
476	Acceso principal	30,017	60	27,500	410	56	46	76
479/450	Rampa principal	30,017	60	32,415	380	54	41	68
476/450	Rampa principal	30,017	60	31,150	380	54	41	68
		Total	1365				1111	

Fuente: Elaboración propia

Para hallar el valor de la potencia absorbida en el eje se usará la siguiente fórmula:

$$BHP = \frac{V \times A \times 1.73 \times e_f}{746} \quad (11)$$

BHP : Potencia Absorbida en el eje en HP

V : Voltaje

A : Amperaje

Ef : Eficiencia Motor

3.3.3 Curva característica de los ventiladores

En la siguiente sección se muestran las curvas características de los ventiladores entregados por el proveedor local de los tres modelos que se comenzaron a usar en el proyecto de Cerro Negro.

3.3.3.1 Ventilador axial de 30 000 cfm

Tabla 18

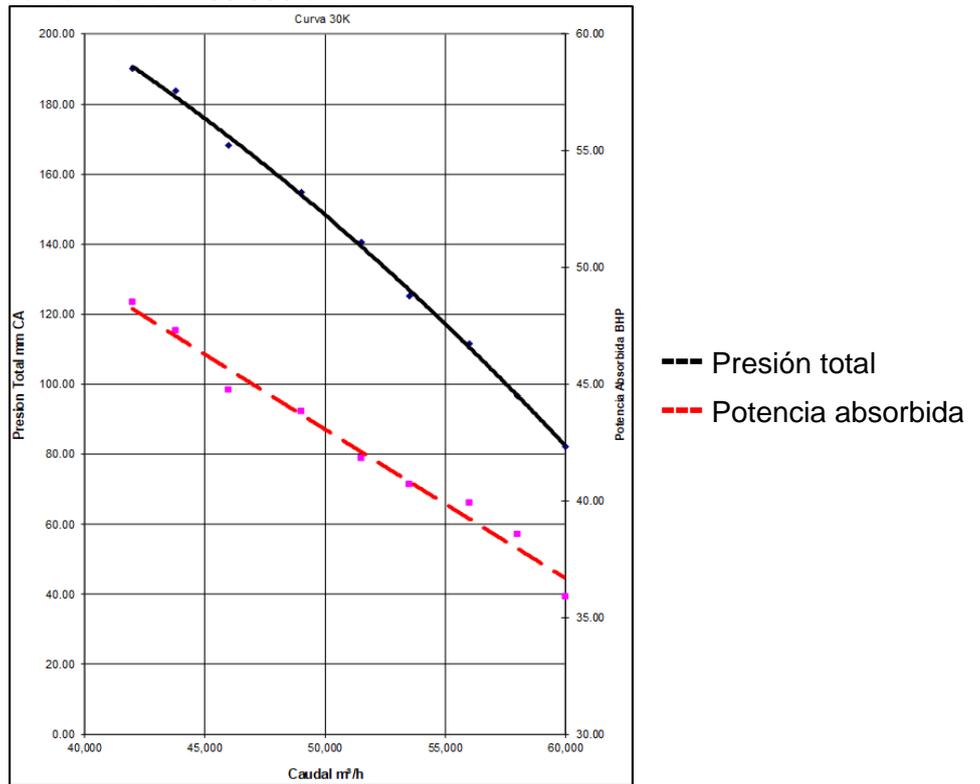
Características de ventilador axial de 30,000 cfm

TIPO	AXIAL CAJA LARGA
Modelo	30K AF5046
Tipo de pala	AEROFOIL
Arreglo constructivo	4
Clase	I
Dirección de descarga	AU
Cantidad	2
Temperatura máxima aire	20°C
Temperatura aire	20°C
Temperatura de selección	20°C
Peso específico aire (con corrección)	1.2 Kg/m ³
Altura sobre el nivel del mar	0
Caudal	51,000 m ³ /H
Presión estática	150 mm CA
Presión total	209.34 mm CA
Velocidad de salida	31.06 m/s
RPM ventilador	2970
Nivel sonoro	98 dB
Rendimiento	75 %
Potencia absorbida	51.86
Motor	60 HP a 2970 RPM
Corriente	3x380V - 50Hz
Acople	Directo
Accesorios	Aleta guiadora de flujo, pies de montaje, cono de entrada

Fuente: Cirigliano

Figura 24

Curva característica de ventilador – 30 000 cfm



Fuente: Cirigliano

3.3.3.2 Ventilador axial de 60 000 cfm

Tabla 19

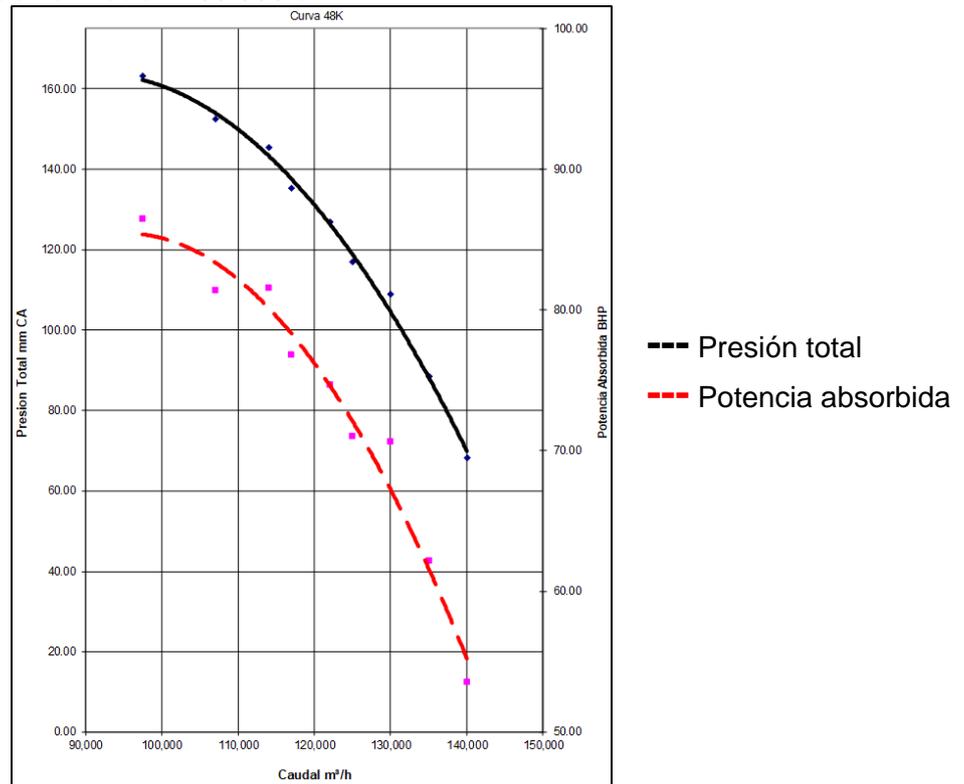
Características de ventilador axial de 60,000 cfm

TIPO	AXIAL BIFURCADO – VERTICAL JET
Modelo	48K AF5046
Tipo de pala	AEROFOIL
Arreglo constructivo	4
Clase	I
Dirección de descarga	AU
Cantidad	1
Temperatura máxima aire	20°C
Temperatura aire	20°C
Temperatura de selección	20°C
Peso específico aire (con corrección)	1.2 Kg/m3
Altura sobre el nivel del mar	0
Caudal	100,000 m3/H
Presión estática	110 mm CA
Presión total	144.81 mm CA
Velocidad de salida	23.79 m/s
RPM ventilador	1450
Nivel sonoro	91 dB
Rendimiento	65 %
Potencia absorbida	81.16
Motor	125 HP a 1450 RPM
Corriente	3x380v 50Hz
Acople	Directo

Fuente: Cirigliano

Figura 25

Curva característica de ventilador – 60 000 cfm



Fuente: Cirigliano

3.3.3.3 Ventilador axial de 300 000 cfm

Tabla 20

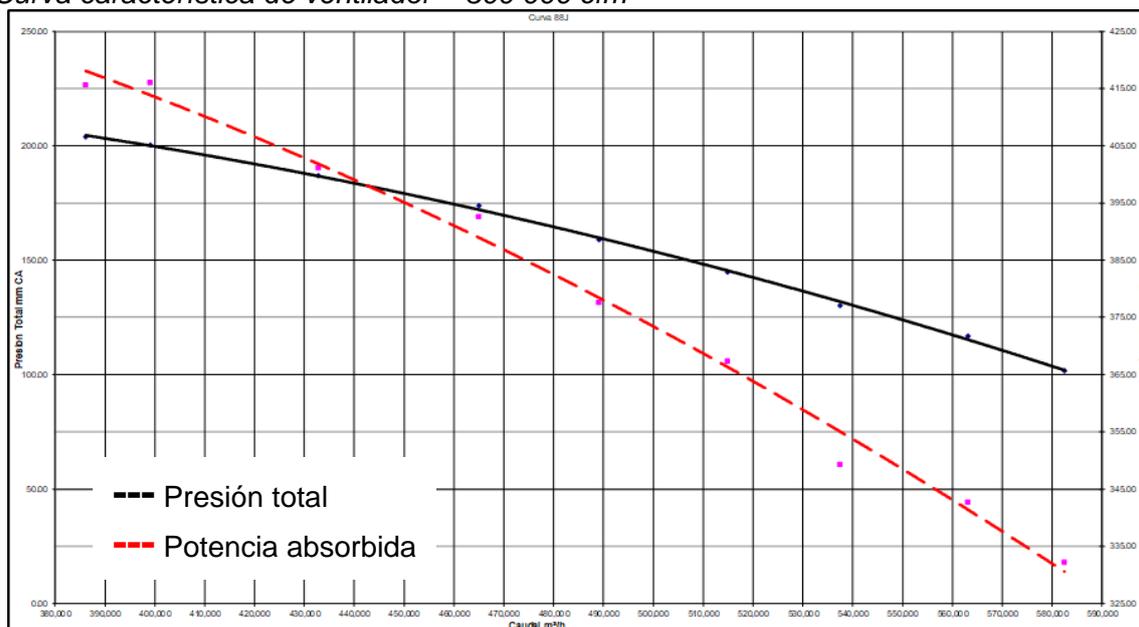
Características de ventilador axial de 300,000 cfm

TIPO	AXIAL CAJA LARGA
Modelo	88J AF5066
Tipo de pala	AEROFOIL
Arreglo constructivo	4
Clase	I
Dirección de descarga	AU
Cantidad	2
Temperatura máxima aire	20°C
Temperatura aire	20°C
Temperatura de selección	20°C
Peso específico aire (con corrección)	1.2 Kg/m3
Altura sobre el nivel del mar	0
Caudal	521,900 m3/H
Presión estática	45 mm CA
Presión total	126.69 mm CA
Velocidad de salida	36.44 m/s
RPM ventilador	970
Nivel sonoro	107 dB
Rendimiento	70 %
Potencia absorbida	344.11
Motor	400 HP a 970 RPM
Corriente	3x380v 50Hz
Acople	Directo
Accesorios	Aleta guiadora de flujo, pies de montaje, cono de entrada

Fuente: Cirigliano

Figura 26

Curva característica de ventilador – 300 000 cfm



Fuente: Cirigliano

3.4 Valoración de requerimientos según normas

Para satisfacer la necesidad de aire fresco se requiere saber el requerimiento de aire de acuerdo parámetros establecidos por normas legales, dichas normas dan las pautas para establecer un ambiente adecuado de trabajo de los trabajadores, donde los gases, polvos y calores producidos en una mina subterránea sean eliminados de una manera eficiente, así mismo para el trabajo de equipos diésel.

3.4.1 Marco legal

De acuerdo a las normas legales argentinas Ley 19587 y la resolución 295/03 del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, cuenta con límites máximos permisibles para gases los cuales se detallan a continuación:

Tabla 21

Valores de acuerdo a resolución M.T.S.S. N°295/03

Compuesto	CPM	Unid.	CMP – CPT CMP – C	Unid.	Notaciones	Peso molecular	Efecto crítico
CO2	5000	Ppm	30 000	Ppm	No	44.01	Asfixia
NO2	3	Ppm	5	Ppm	A4	46.01	Irritación, edema pulmonar
SH3	(10)	Ppm	(15)	Ppm	No	34.08	Irritación, SNC
CO	25	Ppm	No	Ppm	BEI	28.01	Anoxia, SCV, SNC, reproducción
SO2	2	Ppm	5	Ppm	A4	67.07	Irritación

Fuente: M.T.S.S.

Definiciones:

- CMP: concentración máxima permisible para 8 horas de trabajo y 40 horas semanales.
- CMP – CPM: concentración máxima permisible para cortos periodos de tiempo.
- CMP – C: valor techo, este valor no debe sobrepasarse en ningún momento

De acuerdo a las normas peruanas El reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional del Estado Peruano DS-023-2017-EM se cuenta con las siguientes normativas (Anexo 1)

3.4.2 *Calculo del caudal global requerido – actual*

3.4.2.1 Requerimiento por personal. El caudal requerido para la zona de trabajo se encuentra entre los 200 m y 650 msnm, el caudal requerido por personal es de:

Q1: caudal requerido por personal, para una altura de 600 msnm se requiere un caudal de 3 m³/min <> 160 cfm por persona.

Tabla 22

Requerimiento de aire por personal

PERSONAL	CANTIDAD TRABAJADORES X GUARDIA	CFM X PERSONA	CFM TOTAL
Trabajadores	25	160	4,000
Total			4,000

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2 **Requerimiento equipo diésel.**

Q2: caudal requerido x dilución de gases de equipo Diesel, para una altura de 600 msnm se requiere 106 cfm por cada HP.

Tabla 23

Requerimiento de aire por equipo diésel

EQUIPOS	HP	CANT.	CFM X HP	% SIMULTANEIDAD	% UTILIZACIÓN	CFM
Scoop 6yd3	295	2	106	0.7	0.85	47,843
Damper 30 tn	400	2	106	0.5	0.85	64,872
Telescope Crane	100	2	106	0.2	0.60	2,544
Jumbo vertical	99	2	106	0.2	0.30	1,259
Minibús	180	1	106	0.3	0.80	4,579
Camioneta	140	5	106	0.3	0.80	17,808
Total						138,906

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.3 Requerimiento dilución gases (explosivos).

Tabla 24

Requerimiento de aire por dilución de gases

LABORES	SECCIÓN		ÁREA M ²
	ANCHO M	ALTO M	
Galerías	4.3	4.7	20.21
Rampas	4.3	4.7	20.21
Chimeneas	2.4		4.52
			Área promedio m² 14.98
Q3 = A x N x V			
A: Área promedio m2			
N: Cantidad de niveles (3)			Q3 = Total m3/seg = 18.73
V: Velocidad de aire para dilución de gases (25 m/min)			Q3 = Total cfm = 39,672

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.4 Requerimiento global de aire actual. De acuerdo a los puntos A, B y C, el caudal más representativo que se requiere es la Opción 3 que es Q1 + Q2, la razón fundamental es que, según norma interna de la mina, ningún equipo diésel y personal quedaran dentro de la mina a la hora que se realiza las voladuras de frentes o tajeos, de esta manera el aire destinado a los equipos diésel se distribuirá en los frentes de desarrollo y tajeos de producción. Se aplica un factor de seguridad del 10% para prevenir recirculaciones y pérdidas de aire.

Tabla 25

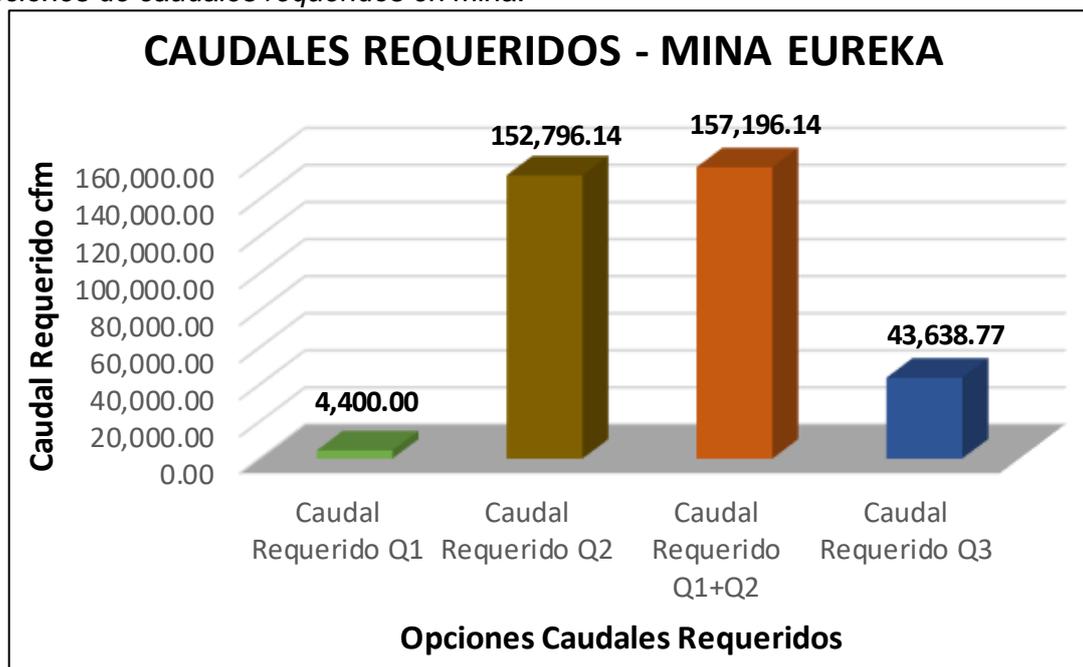
Opciones de Caudales Requeridos en Mina

OPCIÓN	CAUDAL DE AIRE	M3/SEG	CFM	CFM*1.1
1	Caudal requerido Q1	1.89	4,000	4,400
2	Caudal requerido Q2	65.56	138,906	152,796.14
3	Caudal requerido Q1+Q2	67.45	142,906	157,196.14
4	Caudal requerido Q3	18.73	39,672	43,638.77

Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Opciones de caudales requeridos en mina.



Fuente: Elaboración propia

3.4.2.5 Balance de ventilación actual. La cobertura del sistema de ventilación actual es de 170%, caudal necesario para cubrir la demanda de aire limpio en la mina, siendo la demanda de 142 906 cfm, se tiene un superávit de 100 694 cfm, al revisar el sistema in situ se determina que mucho del caudal que ingresa a la mina tiene problemas de recirculación o está mal distribuido, por ser un sistema inicial y provisional bastante volumen de aire se destina a la rampa principal, esto se debe a que mucha infraestructura de ventilación aun faltas culminar, como el caso de chimeneas de ventilación.

Tabla 26

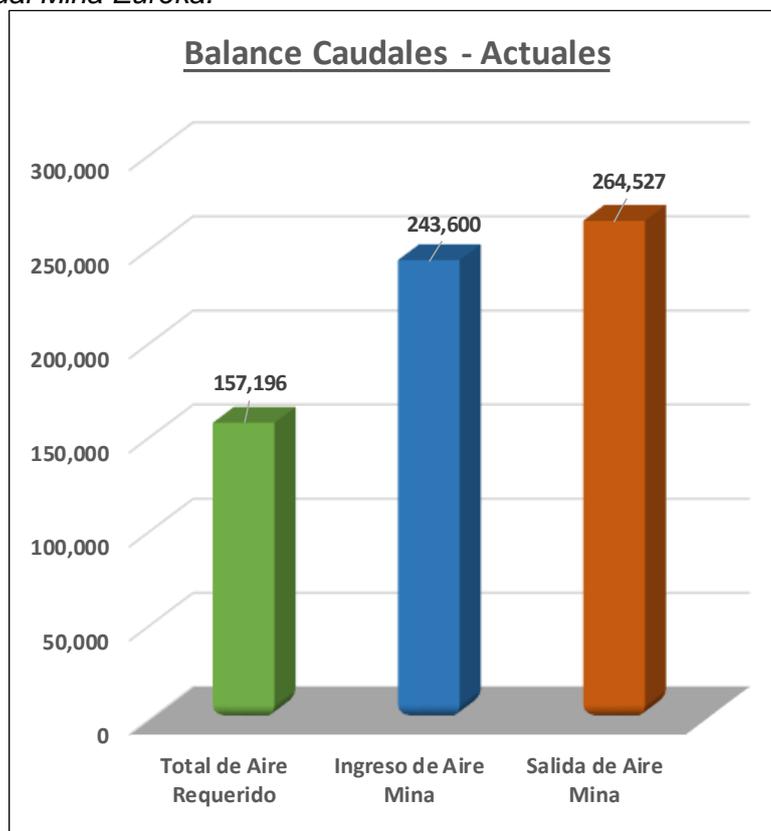
Balance de aire actual Mina Eureka

	CAUDAL DE AIRE	M3/SEG	CFM
Aire total requerido		74	157,196
Ingreso de aire mina		115	243,600
Salida de aire mina		125	264,527
Cobertura		155 %	
superavit		86,404	

Fuente: Elaboración propia

Figura 28

Balance de aire actual Mina Eureka.



Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Cálculo de caudal global requerido – proyectado

3.4.3.1 Requerimiento por personal

Q1: caudal requerido por personal, para una altura de 600 msnm se requiere un caudal de 3 m³/min <> 160 cfm por persona.

Tabla 27

Requerimiento de aire por personal - proyectado

PERSONAL	CANTIDAD TRABAJADORES X GUARDIA	CFM X PERSONA	CFM TOTAL
Trabajadores	60	160	9,600
		Total	9,600

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.2 Requerimiento equipo diésel,

Q2: caudal requerido x dilución de gases de equipo Diesel, para una altura de 600 msnm se requiere 106 cfm por cada HP.

Tabla 28*Requerimiento de aire por equipo diésel – proyectado*

EQUIPOS	HP	CANT.	CFM X HP	% SIMULTANEIDAD	% UTILIZACIÓN	CFM
Scoop 6yd3	295	6	106	0.70	0.85	111,634
Scoop 3.5 yd3	201	2	106	0.70	0.85	25,354
Dumper 30 tn	400	4	106	0.70	0.85	100,912
Dumper 40 tn	474	5	106	0.70	0.85	149,476
Jumbo AXERA	99	6	106	0.35	0.85	18,732
Jumbo vertical	99	4	106	0.35	0.70	10,284
DTH 420	148	2	106	0.30	0.50	4,706
Camión explosivo	138	1	106	0.30	0.50	2,194
Robot shoot spray	73	2	106	0.30	0.50	2,321
Telescope Crane	100	7	106	0.50	0.60	22,260
Cargador de ANFO	138	3	106	0.20	0.40	3,511
Mixer Huron	174	1	106	0.30	0.40	2,213
Skid Steer loader	73	1	106	0.20	0.30	464
Compresor 400 cfm	177	1	106	0.20	0.30	1,126
Minibús	181	2	106	0.50	0.50	9,593
Ultimec 1420	161	1	106	0.30	0.30	1,536
Camioneta	140	10	106	0.50	0.50	37,100
Total						503,417

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.3 Requerimiento dilución gases (explosivos).**Tabla 29***Requerimiento de aire por dilución de gases – proyectado*

LABORES	SECCIÓN		ÁREA M ²
	ANCHO M	ALTO M	
Galerías	4.3	4.7	20.21
Rampas	4.3	4.7	20.21
Chimeneas	2.4		4.52
Área promedio m²			14.98
Q3 = A x N x V A: Área promedio m ² N: Cantidad de niveles (3) V: Velocidad de aire para dilución de gases (25 m/min)			Q3 = Total m ³ /seg = 18.73 Q3 = Total cfm = 39,672

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.4 Requerimiento global de aire proyectado.

Tabla 30

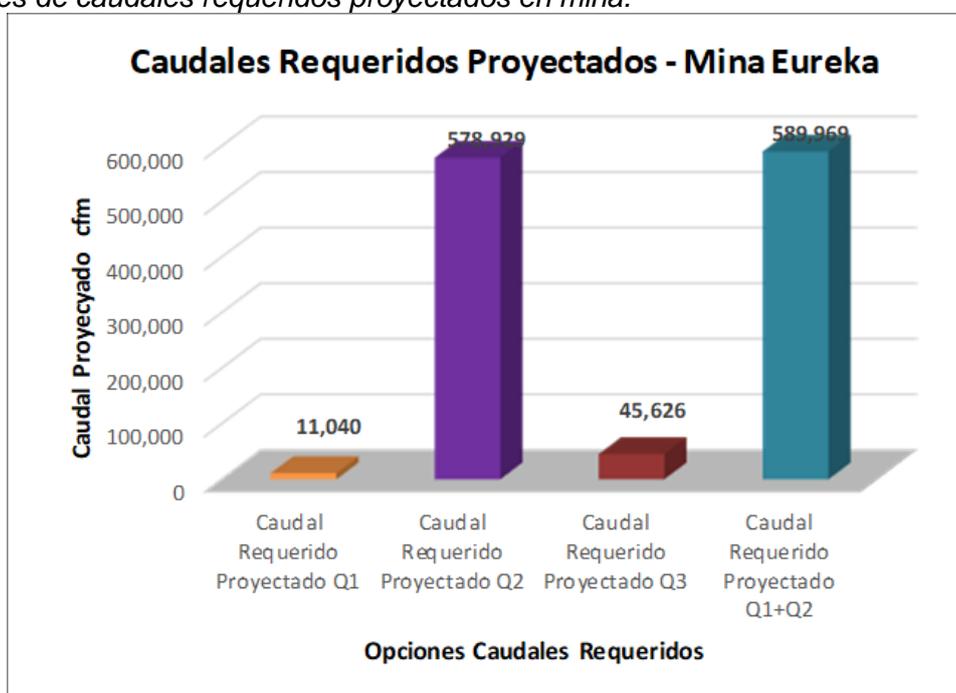
Opciones de caudales requeridos proyectados en Mina

OPCIÓN	CAUDAL DE AIRE	M3/SEG	CFM	CFM*1.1
1	Caudal requerido Q1	4.53	9,600	11,040
2	Caudal requerido Q2	237.61	503,417	578,929
3	Caudal requerido Q3	18.73	39,672	45,626
4	Caudal requerido Q1+Q2	242.14	513,017	589,969

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Opciones de caudales requeridos proyectados en mina.



Fuente: Elaboración propia

3.4.3.5 Balance de ventilación proyectado.

De acuerdo a las proyecciones de caudales requeridos se necesitan 589 969 cfm para ventilación a futuro de la mina, se tiene un déficit de 346,369 cfm, los cuales serán cubiertos con las implementaciones que se ejecutarán.

Tabla 31

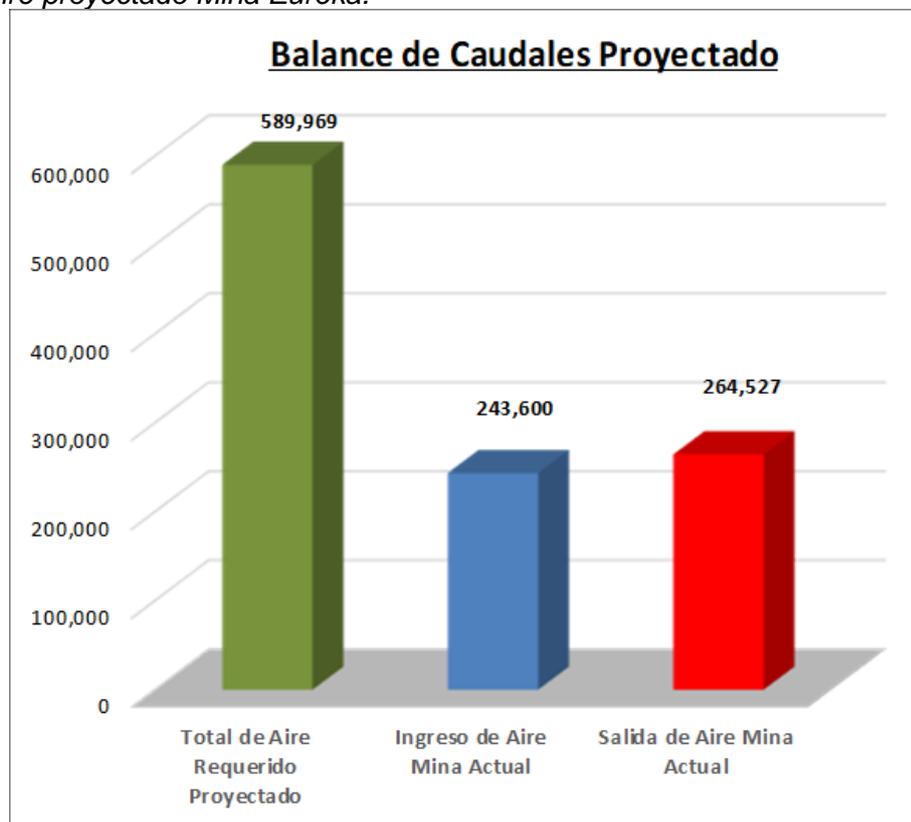
Balance de aire proyectado Mina Eureka

CAUDAL DE AIRE	M3/SEG	CFM
Aire total requerido proyectado	278	589,969
Ingreso de aire mina	115	243,600
Salida de aire mina	125	264,527
Cobertura	41 %	
Superavit	-346,369	

Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Balance de aire proyectado Mina Eureka.



Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Cálculo de caudal global requerido – frente de desarrollo

3.4.4.1 Requerimiento por personal

Q1: caudal requerido por personal, para una altura de 600 msnm se requiere un caudal de 3 m³/min <> 160 cfm por persona.

Tabla 32*Requerimiento de aire por personal – frente de desarrollo*

PERSONAL	CANTIDAD TRABAJADORES X GUARDIA	CFM X PERSONA	CFM TOTAL
Trabajadores	10	160	1,600
Factor de seguridad 10%			160
Total			1,760

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.2 Requerimiento equipo diésel.

Q2: caudal requerido x dilución de gases de equipo Diesel, para una altura de 600 msnm se requiere 106 cfm por cada HP.

Tabla 33*Requerimiento de aire por equipo diésel – frente de desarrollo*

EQUIPOS	HP	CANT.	CFM X HP	% SIMULTANEIDAD	% UTILIZACIÓN	CFM
Scoop 6yd3	295	1	106	0.50	0.80	12,508
Dumper 30 tn	400	1	106	0.25	0.80	8,480
Telescope Crane	100	1	106	0.10	0.50	530
Jumbo	99	1	106	0.10	0.50	525
Factor de seguridad 10%						2,204
Total						24,247

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.3 Requerimiento dilución gases (explosivos).**Tabla 34***Requerimiento de aire por dilución de gases – frente de desarrollo*

LABORES	SECCIÓN		ÁREA M2
	ANCHO M	ALTO M	
Galerías	4.3	4.7	20.21
Rampas	4.3	4.7	20.21
Chimeneas	2.4		4.52
Área promedio m²			14.98
Q3 = A x N x V A: Área promedio m2 N: Cantidad de niveles (1) V: Velocidad de aire para dilución de gases (25 m/min)			Factor de seguridad 10% 0.62
			Q3 = Total m3/seg = 6.87
			Q3 = Total cfm = 14,546

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.4 Requerimiento de aire en frente de desarrollo

El caudal requerido para un frente en desarrollo es de 24,247 cfm, cabe resaltar que, de acuerdo al sistema de extracción del material del frente, el scoop acarrea y acumula material para después cargar al damper o también el damper se acercara a una distancia considerable apagando el motor y esperando que el scoop realice la labor de carguío. No está permitido tener muchos damper en un solo nivel operando al mismo tiempo, pueden esperar su turno a una distancia considerable del frente.

Tabla 35

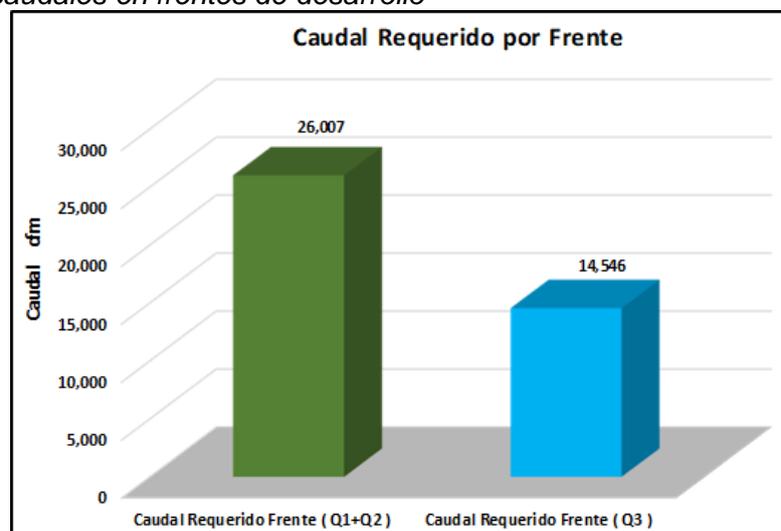
Opciones de Caudales en frentes de desarrollo

OPCIÓN	CAUDAL DE AIRE	M3/SEG	CFM
1	Caudal requerido Q1+Q2	12.28	26,007
2	Caudal requerido Q3	6.87	14,546

Fuente: Elaboración propia

Figura 31

Opciones de caudales en frentes de desarrollo



Fuente: Elaboración propia

3.5 Metodología para simulación en software Ventsim

De acuerdo a los requerimientos a largo plazo se requiere un caudal de 500,000 cfm, de la misma forma en los frentes de trabajo un caudal de 26,000 cfm, para tener una ayuda en la elaboración del sistema de ventilación proyectado se necesitará la ayuda de un programa de ventilación como el Ventsim, con el referido programa se podrá elegir los

ventiladores adecuados, así como el dimensionamiento de las chimeneas y las posibles rutas de entrada y salida de aire.

3.5.1 Modelamiento del sistema actual

Para el modelamiento del sistema actual la data utilizada está contenida en los programas Promine y Deswik, se solicitó la data actual topográfica tanto en interior como exterior mina, para la realización de las simulaciones se tomó como referencia la cota al piso de las labores y para el caso de chimeneas los ejes centrales.

3.5.2 Recopilación sistema actual

Con apoyo del área de Servicios Técnicos se obtuvo la data topográfica actualizada tanto en vista en planta como en 3D. Con data recopilada se puede realizar la modelación del sistema actual de ventilación en el programa Ventsim.

3.5.3 Estudio geométrico

Para tener una data confiable se requiere realizar una visita de campo detallada de las labores de interior mina, así como convalidar la información topográfica con la realidad, se pueden encontrar casos donde la data existente faltase actualizar o las labores estén más avanzadas que los planos topográficos.

Se pueden describir los pasos donde se muestre las secuencias a seguir en el programa Ventsim.

Paso 1:

Relevamiento de información de campo

Paso 2:

Análisis de la data topográfica recibida la cual debe contener la vista en planta en cota real de las labores horizontales ya sean rampas, galerías, chimeneas, accesos a tajeos, cruceros, etc.

Paso 3:

La información recopilada que inicialmente estará en formato de programa de planeamiento (Datamine, Vulcan, Promine, etc.) o AutoCAD, debe pasar a formato DXF. Cabe resaltar que la información que se grave en DXF debe ser información depurada, es

decir construcciones irrelevantes como pequeños cruceros o galerías, si estas son grabadas al momento de realizar la corrida en el Ventsim el tiempo de adecuarla será mayor dependiendo del tamaño de la red de ventilación.

Paso 4:

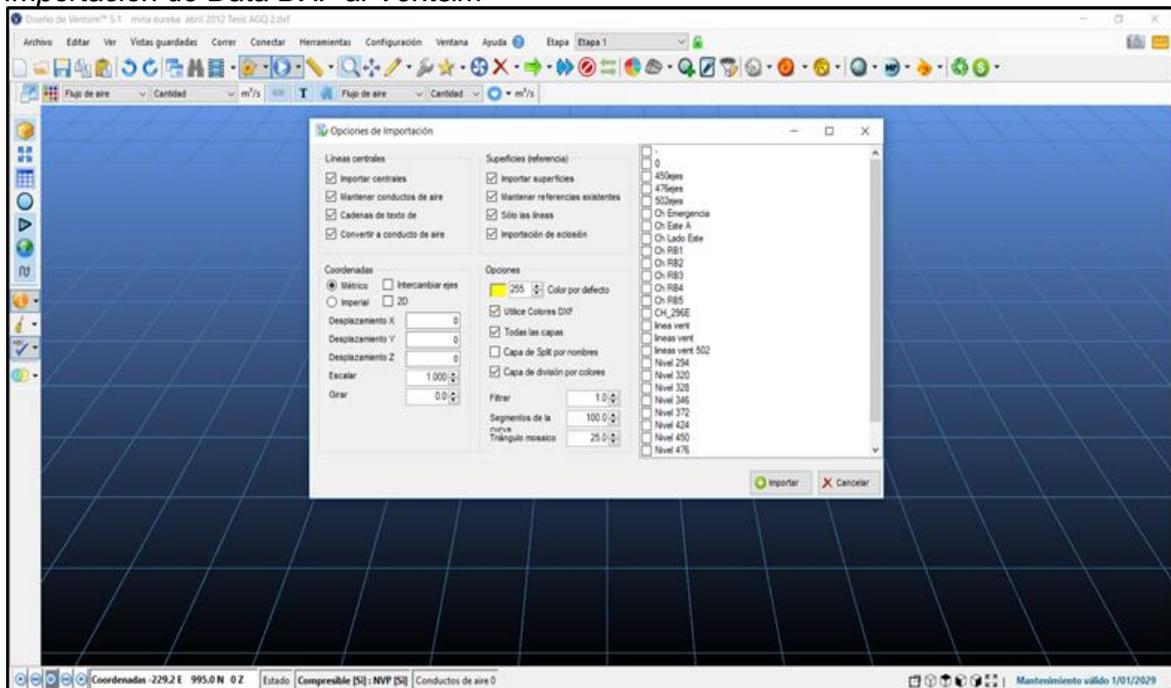
Una vez obtenida la información en formato DXF dicha información debe ser importada al programa Ventsim, usando la siguiente metodología:

Paso 5:

En esta parte se debe comparar la información importada con la información base, deben ser congruentes e iguales las informaciones, cabe resaltar que a veces la información importada pueda contener información adicional que muchas veces no se observa en el proceso, como líneas superpuestas o capas adicionales.

Figura 32

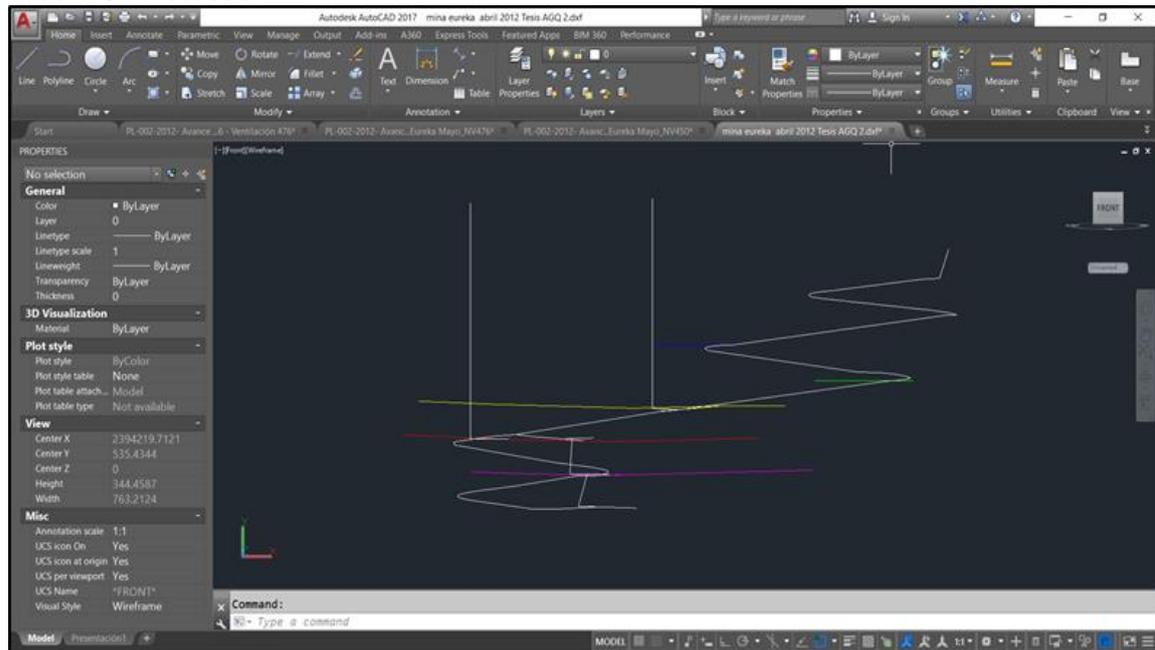
Importación de Data DXF al Ventsim



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

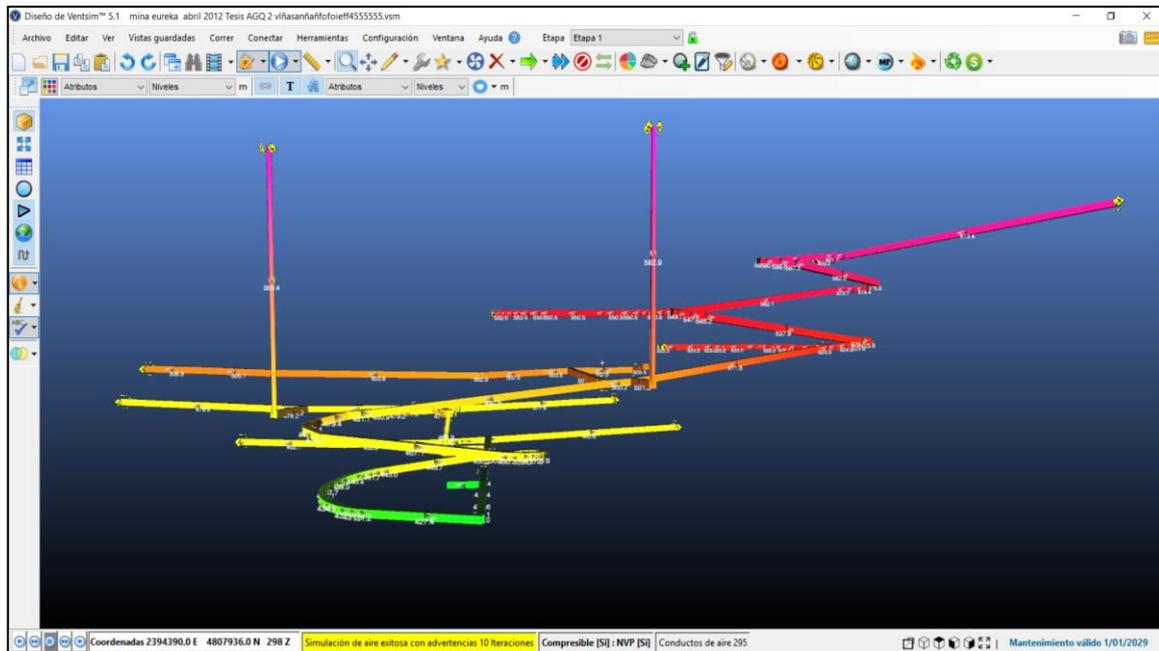
Modelo 3D Autocad.



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Modelo Solidos Ventsim



Fuente: Elaboración propia

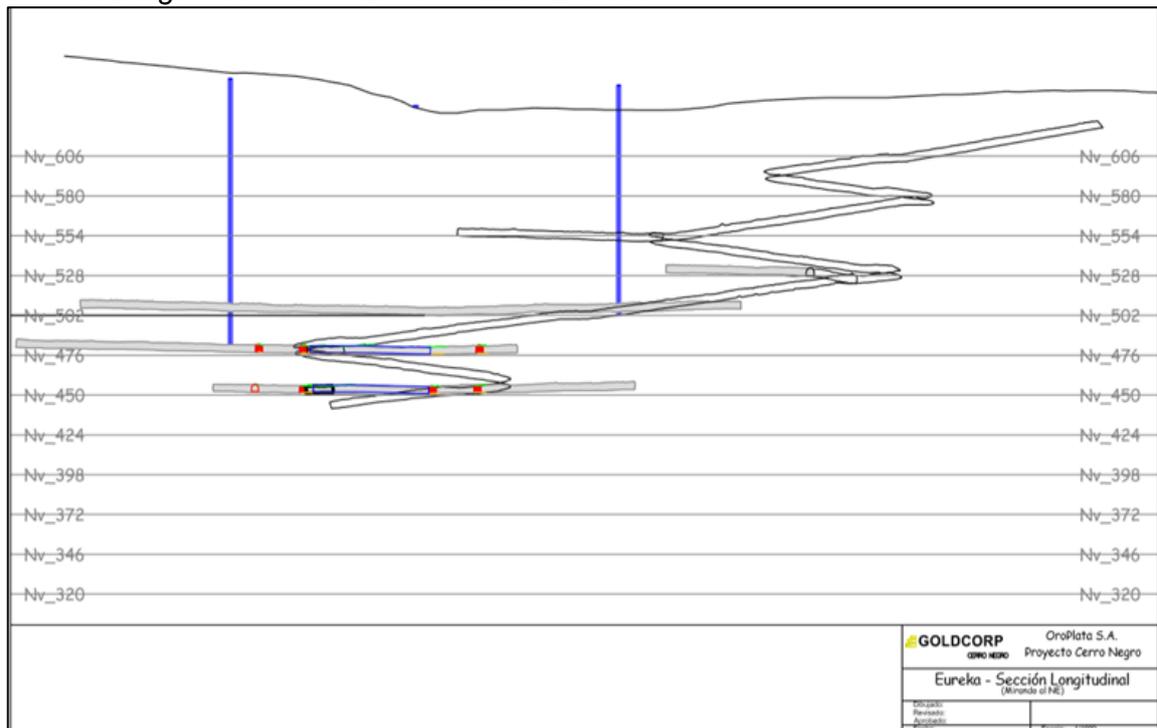
3.5.4 Planos de referencia

La información de referencia se usará para determinar la ubicar labores existentes como tajeos existentes, labores construidas como talleres o infraestructuras que se considere relevante para la construcción del circuito de ventilación.

Cabe mencionar que dicha información no interviene directamente en el programa Ventsim.

Figura 35

Sección Longitudinal de las Labores Mina Eureka.



Fuente: Goldcorp

3.5.5 Calibración

Para calibrar el programa, se requiere ingresar datos del tipo de roca, sección de galerías, recubrimientos, ventiladores instalados con sus respectivos ductos (mangas ventilación), reguladores, puertas, bloqueos, etc.

Toda la información recolectada en campo debe ser suministrada en el programa para modelar el sistema final en el Ventsim.

Los datos obtenidos deben llegar a tener similitud, si esto no se logra obtener se debe calibrar nuevamente los datos obtenidos de campo y del programa hasta obtener

datos muy similares y poder tener resultados confiables, de esta manera las simulaciones que se obtengan den resultados que estén acorde con la realidad y los planes a futuro.

3.6 Modelamiento y simulación del sistema actual de ventilación

Siendo la mina una operación que recién comienza a desarrollarse aún no cuenta con tajeos abiertos, en los próximos meses se comenzara con la explotación y acarreo por lo que las necesidades de aire se incrementaran.

Los resultados de las simulaciones se ajustarán al modelo planteado, dichos resultados darán un diagnóstico y alternativas que tendrán que analizarse para seleccionar la mejor de ellas, las alternativas que se planteen tendrán que discutirse con el área involucrada que es operación Mina de acuerdo a las condiciones que se tengan en la mina y adecuarlas a las mismas.

3.6.1 Parámetros actuales de operación

- Tipo de Minado: Corte y Relleno Ascendente.
- Perforación: Desarrollos y Tajeos (Equipo Electrohidráulico).
- Número de Guardias: 02 g/día.
- Horas de Trabajo por Guardia: 10 horas.
- Personal Mina por Guardia: 60 personas/guardia.
- Horario de Voladura: 6:45 am (Turno Noche) – 6:45 pm (Turno Día).
- Tiempo de Ventilación: 2 horas.
- Tipo de Explosivo: Emulsión.
- Velocidad Mínima de Aire: 25 m/min.
- Velocidad Máxima de Aire: 250 m/min (tránsito de personal).
- Mina en Etapa de Desarrollo.

3.6.2 Configuración de parámetros Ventsim

Se toma como referencia el Portal de Eureka, del cual se pueden obtener los siguientes datos de campo:

- **Portal Eureka:**
624.5 msnm

- **Temperatura Bulbo Seco:**
30°C
- **Temperatura Bulbo Húmedo:**
20°C
- **Presión Barométrica:**
95.5 KPa
- **Manga de Ventilación Valor de Fricción:**
0.0029 kg/m³.
- **Manga de Ventilación Espiral Valor de Fricción:**
0.011 kg/m³.
- **Costo de Energía:**
0.262 US\$ / KW-h

El costo de energía como se muestra es muy alto, esto se debe a que se depende de generadores a base de petróleo, por lo que el aumento de volúmenes de caudales va en forma directa con el uso de más ventiladores, el costo de energía subiría sustancialmente, en los proyectos futuros de la mina está destinado la construcción de una red interconectada de energía eléctrica que haría que los costos bajen en forma sustancial.

3.6.3 Aplicación del software Ventsim

Cuando el modelo es creado y la data es introducido en el programa los datos de campo que son correlacionados con los resultados que se obtienen del programa pueden llegar a tener una aproximación o variación del 10%, es un valor óptimo.

Cabe mencionar que los datos de campo en forma constante cambian por lo que los levantamientos en campo pueden darse en un momento dado cuando la mina tiene muchas variables cambiando en forma constante, por esta razón la aproximación se da en un rango aceptable, estos cambios pueden darse por las puertas, reguladores, tajeos abiertos, el paso de equipos, operación de ventiladores, etc.

Cuando se tengan tajeos abiertos los circuitos que se establezcan pueden sufrir variaciones, para lo cual se debe tener en cuenta que las ventanas de extractoras de aire

de aire cercanas, la alimentación de aire fresco para diluir los gases y la temperatura cumplirán un factor importante en el éxito de la ventilación.

$$Variacion = \frac{Flujo\ campo - Flujo\ simulado}{Flujo\ campo} \times 100 \quad (12)$$

Debido a que la mina no tiene grandes dimensiones y no cuenta con muchas entradas y salidas de aire las variaciones entre las medidas tomadas de campo y las simulaciones con el Ventsim el rango no sobrepasa el 10%, la mina tiene menos del 30% desarrollado, por lo que en los próximos años las variaciones pueden llegar a sobrepasar dicho porcentaje.

A continuación, se muestra los resultados de los datos levantados en campo con los valores obtenidos de la simulación:

Tabla 36

Comparación de Caudales Campo y Ventsim – Ingreso de Aire.

ESTACIÓN	UBICACIÓN		CAUDAL CFM		VAR %
	NIVEL	LABOR	CAMPO	VENTSIM	
V1	650	Bocamina Eureka	156,647	143,100	9
V10 – A	502	Portón ventilación, Pie RB 1	86,953	93,800	8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37

Comparación de Caudales Campo y Ventsim – Salida de Aire

ESTACIÓN	UBICACIÓN		CAUDAL CFM		VAR %
	NIVEL	LABOR	CAMPO	VENTSIM	
V13	476	Pie RB 3	264,527	236,800	10

Fuente: Elaboración propia

3.6.4 Simulación del modelo actual

En la siguiente tabla se muestra el resumen de la simulación de la situación actual de la mina Eureka, se muestra los caudales, resistencias, cantidad de ventiladores así como el costo de energía anual, cabe indicar que modificaciones realizadas en el sistema simulado hare que la data resultante cambie.

Tabla 38*Resumen de la simulación actual de la mina*

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Flujo de aire compresible	Si
Presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapa	0: Etapa 1
Conductos de aire	272
Longitud total	6,381.0 m
Caudal de aire total de admisión	236.9 kcfm
Caudal de aire total de escape	238.3 kcfm
Flujo de masa total	121.05 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0.09255 Ns ² /m ⁸
Resistencia de la mina (incluyendo el conducto)	0.16278 Ns ² /m ⁸
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia del aire (perdida por fricción)	229.6 kW total
	111.9 kW chimenea
	18.7 kW conducir
	99.1 kW conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0.0 kW
Potencia eléctrica de entrada	403.7 kW
Costo de energía anual de la red	US\$ 926,576
Eficiencia de la red	56.9 %
Que consta de ...	
7 ventiladores	403.7 kW
0 presiones fijadas	0.0 kW
0 flujos fijados	0.0 kW
0 refrigeración	0.0 kW

Fuente: Elaboración propia

3.6.5 Distribución de energía

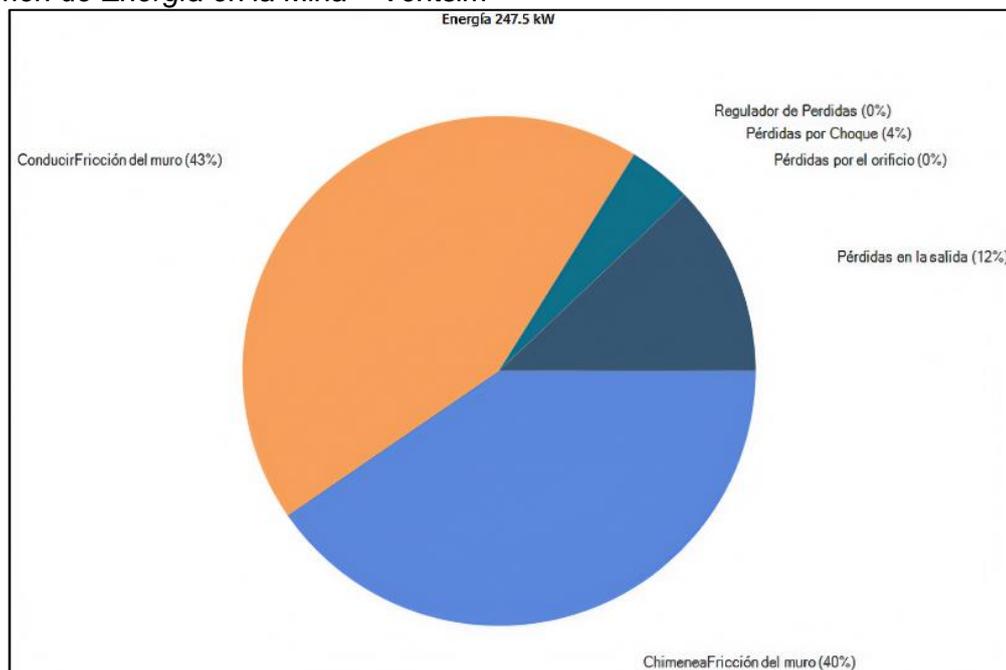
Así mismo el Ventsim nos puede dar un resumen de la distribución de la energía en la mina, como se observa en el gráfico.

Las principales pérdidas son con un 43% se tiene Perdidas por fricción en galerías rampas, etc.; con un 40% Perdidas por fricción en las chimeneas, después con un 12% Perdidas en la Salida como los ventiladores y por último con un 4% perdidas por Choque por la forma de las galerías.

El grafico nos muestra que las pérdidas por fricción determinan un aumento sustancial en el consumo de energía, con un desarrollo controlado en cuanto a la construcción de infraestructura dentro de mina, llevando un control de la voladura se reduciría drásticamente el uso de ventiladores principales con alta presión.

Figura 36

Resumen de Energía en la Mina – Ventsim



Fuente: Elaboración propia

3.6.6 Curvas características de ventiladores operativos

En este punto se muestra los parámetros de los ventiladores principales, secundarios y auxiliares que se cuentan en la mina Eureka, los cuales fueron simulados en el programa Ventsim.

Tabla 39*Resumen de Parámetros de Ventiladores Mina Eureka*

Ítem	Nivel	Tipo de manga	Longitud manga m	K estándar Kg/m3	Caudal entrada cfm	Resistencia Ns2/m8	Potencia motor kW	Costo energía US\$/año
1	600	Instalada en ch RB3		0.005	238,300	0.0678	205.8	472,398
2	554	Instalada en ch RB	147	0.0029	35,900	0.12414	13.6	31,287
3	528	Instalada en ch RB	157	0.0029	36,300	0.12219	29.1	66,794
4	502	Instalada en ch RB	340	0.0029	36,500	0.0029	10.7	24,647
5	476	Instalada en ch RB	209	0.0029	37,000	0.00011	26.7	61,213
6	450	Instalada en ch RB	208	0.0029	70,300	0.16256	55.4	127,083
7	476/450	Instalada en ch RB	379	0.0029	41,900	0.11137	62.4	143,163

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Modelamiento y simulación del nuevo sistema de ventilación

En esta parte se diseñará el circuito de ventilación final para la mina, donde de acuerdo al planeamiento previo se han ubicado la posición de la rampa principal, accesos a niveles, ubicación de chimeneas de inyección y extracción de aire, del mismo modo el tipo de ventiladores que se usaran en la mina.

4.1.1 Ventilación principal zona mecanizada

De acuerdo al requerimiento a futuro se necesita de un caudal de 497,872 cfm para toda la mina, actualmente se tiene un caudal de 243,600 cfm, para este caso se requiere adquirir un ventilador principal adicional de las mismas características de los actuales, es decir un ventilador 400 HP.

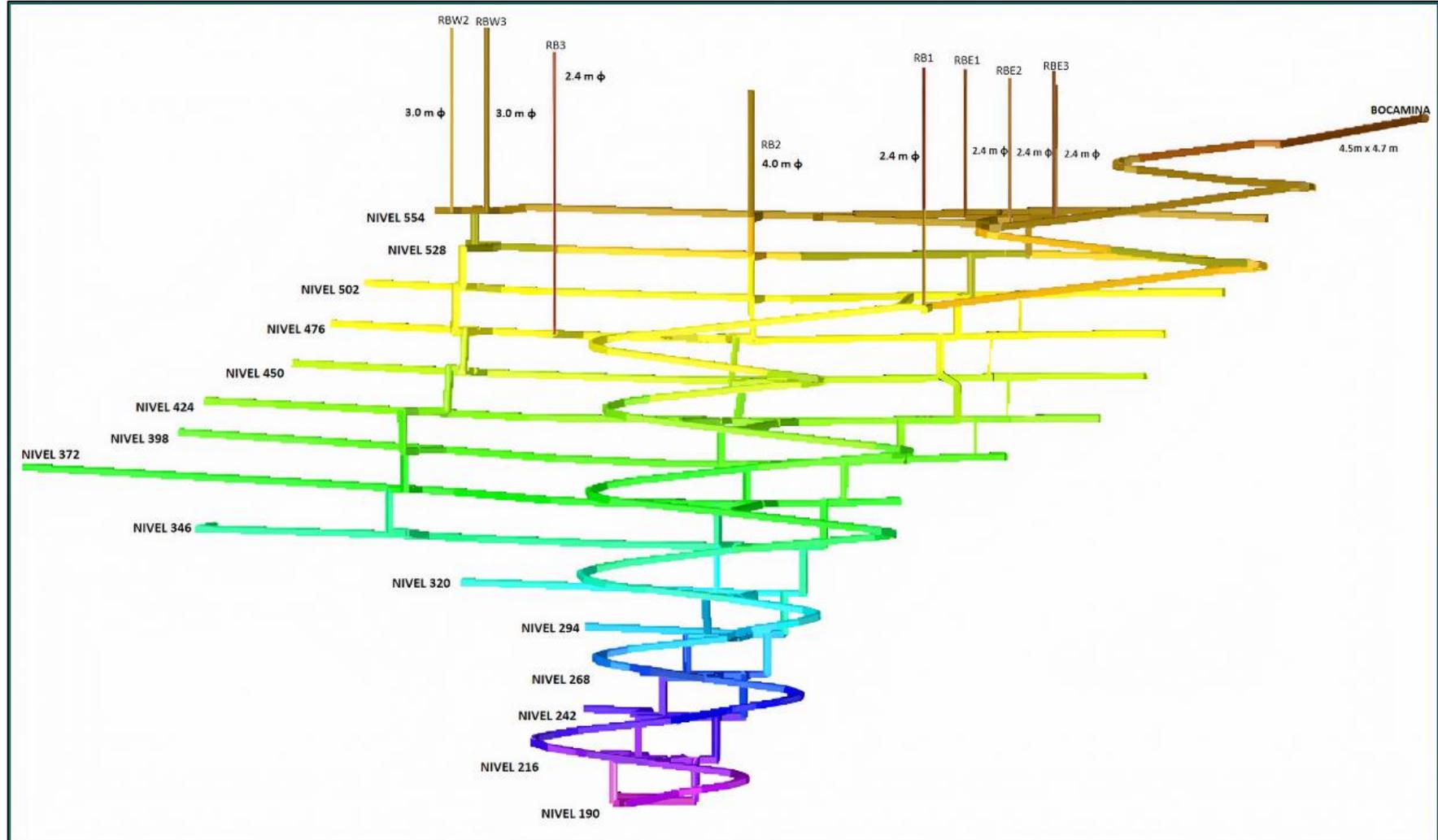
4.1.1.1 Ubicación de chimenea de ventilación. Como ya se había nombrado se requiere la instalación de dos ventiladores de 400 HP en la mina, para cubrir con la demanda a futuro de aire limpio.

A mayo del 2012 se cuenta con un ventilador principal de 400 HP instalado en la cabeza del Raise Bore 3. Dicha instalación es provisional hasta contar con las chimeneas finales de ingreso y salida de aire.

Se muestra a continuación el diseño final de la mina donde se muestran las chimeneas.

Figura 37

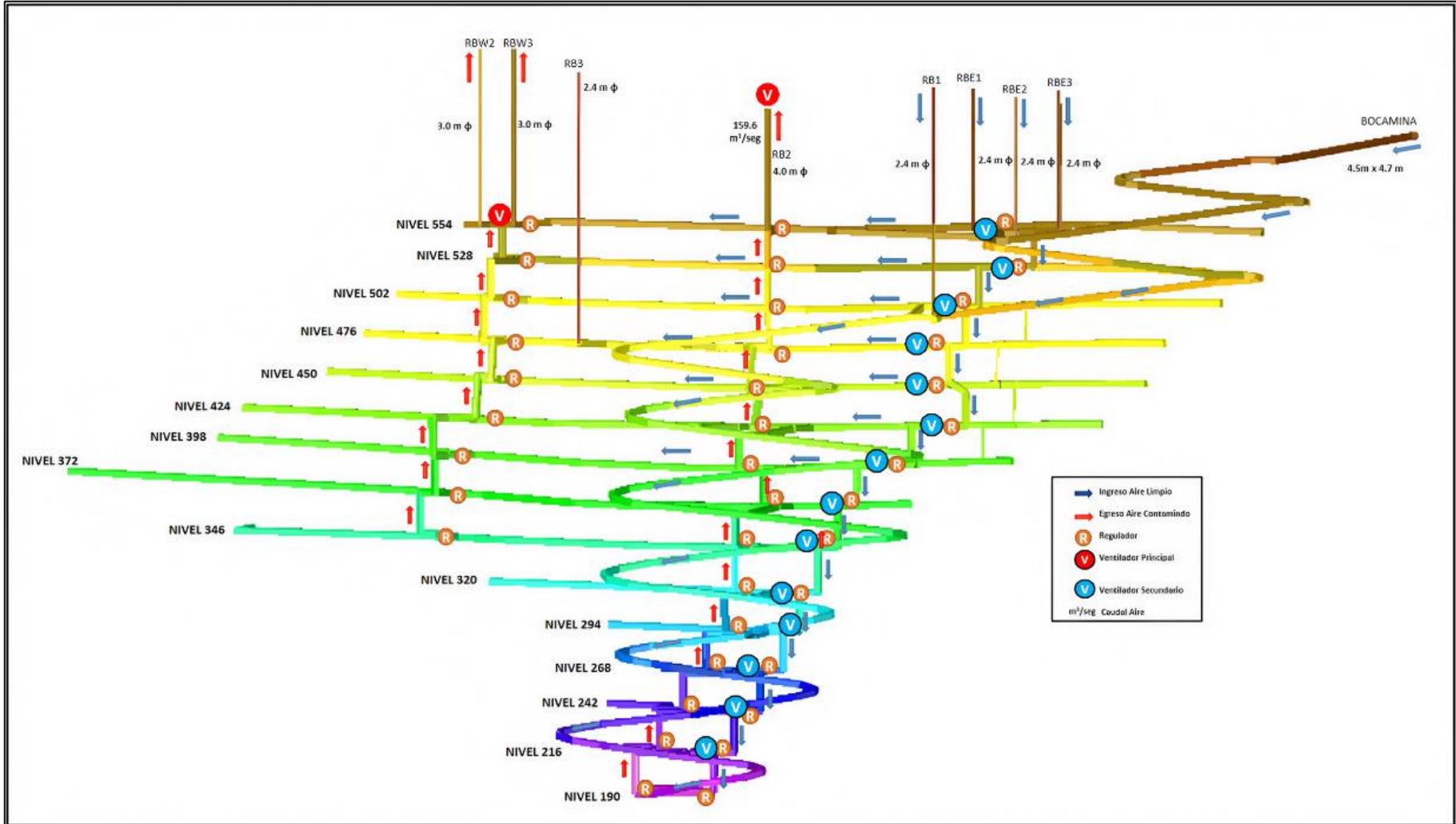
Unifilar - Proyecto final planeamiento mina Eureka



Fuente: Elaboración propia

Figura 38

Simulación – Proyecto final planeamiento mina Eureka



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2 Selección del tamaño óptimo de la chimenea. De acuerdo a las informaciones dadas por planeamiento se han determinado las ubicaciones de las chimeneas principales y secundarias, en dichas ubicaciones no se considera el diámetro de las mismas, los datos que se tienen a la mano para el dimensionamiento son costos de excavación, costos operacionales, costos de capital, etc. casi como el caudal que debe de inyectarse o extraerse por las mismas.

Para el cálculo de las dimensiones nos vamos a basar en una serie de fórmulas las cuales al final de derivaran para determinar en base a datos concretos el diámetro óptimo.

Se muestran los datos que se deben tener:

- Costo Energía = 0.262 US\$/Kw-h <> 1.2 \$ /Kw-h
- Costo RB 3.5Mø = 3624 US\$/m
- Costo Avance = 907 US\$/m avance
- Tiempo de Amortización = 10 años
- Interés Anual Capital = 10% Anual
- Total, Aire Requerido Proyectado: 278 m3/seg <> 589,969 cfm

Para la selección de el diámetro (lado óptimo) de la chimenea nos basaremos en el cálculo de los siguientes parámetros:

- **Resistencia aerodinámica de la chimenea.**

$$R = K * \frac{S}{A^3} * \frac{\rho}{12} * L \quad (13)$$

Donde:

- K = Es el factor de fricción de la chimenea = 0.004 en Ns²/m⁸
- S = Es el perímetro de la chimenea
- A = Es la sección transversal de la chimenea
- L = Es la longitud de la chimenea (en m)
- ρ = Es la densidad del aire en la mina = 1.1 kg/m³

Para una chimenea de sección transversal circular y longitud L

$$R = \frac{0.024}{D^5} * L \text{ (en } \text{Ns}^2/\text{m}^8\text{)} \quad (14)$$

▪ **Caída de presión de la chimenea.**

$$\Delta p = R * Q^2 \quad (15)$$

Donde:

R = Es la resistencia aerodinámica de la chimenea = $\frac{0.024}{D^5} * L$ (en Ns^2/m^8)

Q = Es el caudal de aire que circula a través de ella (en m^3/s)

$$\Delta p = \frac{0.024}{D^5} * Q^2 \text{ (en Pa)} \quad (16)$$

▪ **Potencia consumida en hacer circular el aire a través de la chimenea.**

$$Pot = \frac{\Delta p * Q}{n} \text{ (en Watts)} \quad (17)$$

Donde:

Δp = Es la caída de presión a través de la chimenea (en Pa)

Q = Es el caudal de aire que circula a través de ella (en m^3/s)

n = Es la eficiencia mecánica del ventilador = 70 %

▪ **Costo operativo de la chimenea de ventilación.**

$$Cop = Cen * Pot = Cen * 0.7 * \Delta p * Q \quad (18)$$

Donde:

Cen = Es el costo de energía eléctrica (en US\$/watt-año)

Por lo tanto:

$$Cop = 0.0107 * \frac{Q^3}{D^5} * L * Cen \quad (19)$$

▪ **Costo de capital de la chimenea de ventilación.**

$$Ccap = Cexc * Crec * V \quad (20)$$

Donde:

Cexc = Es el costo de excavación de la chimenea en US\$/ m^3

Crec = Es el factor de recuperación anual de inversión

V = Es el volumen de excavación de la chimenea

Por lo tanto:

$$C_{cap} = 0.785 * D^2 * L * C_{exc} * C_{rec} \quad (21)$$

▪ **Costo total de la chimenea de ventilación.**

$$C_{tot} = C_{cap} + C_{op} \quad (22)$$

Reemplazando:

$$C_{tot} = 0.785 * D^2 * L * C_{exc} * C_{rec} + 0.0107 * \frac{Q^3}{D^5} * L * C_{en} \quad (23)$$

▪ **Cálculo del diámetro óptimo de la chimenea de ventilación.**

El diámetro óptimo de la chimenea de ventilación será aquél para el cual el costo total es mínimo, es decir, derivando la ecuación del costo total con respecto al diámetro e igualando a cero, se obtendrá el diámetro que representa el menor costo total:

$$\frac{\delta C_{tot}}{\delta D} = 2 * 0.785 * C_{exc} * C_{rec} * D * L - 5 * 0.0107 * C_{en} * Q^3 * L * D^{-6}$$

$$= 1.570 * C_{exc} * C_{rec} * D * L - 0.054 * C_{en} * Q^3 * L * D^{-6} = 0$$

$$1.570 * C_{exc} * C_{rec} * D * L = 0.054 * C_{en} * Q^3 * L * D^{-6}$$

$$D^7 = 0.034 * \frac{C_{en} * Q^3}{C_{exc} * C_{rec}} \quad (24)$$

Costo de excavación: $C_{exc} = 1105 \text{ US\$/m}^3$

Costo de energía: $C_{en} = 0.262 \text{ US\$/kW-h}$

$C_{en} = 2.295 \text{ US\$/W-año}$

Costo de recuperación de inversión:

$C_{rec} = 0.163$ plazo de amortización: 10 años

Interés anual del capital: 10% anual

Asumiendo un 3% adicional de seguros + mantenimiento, el costo total sería:

Costo total de recuperación de la inversión:

$$C_{rec} = 0.16275 + 0.03 = 0.1927$$

Por lo tanto:

$$D^7 = 0.034 * 2.295 * Q^3 / 212.984$$

$$D^7 = 0.0004 * Q^3$$

$$L_{optimo} = 0.3407 * Q^{3/7} \quad (25)$$

$$D_{optimo} = 0.3235 * Q^{3/7} \quad (26)$$

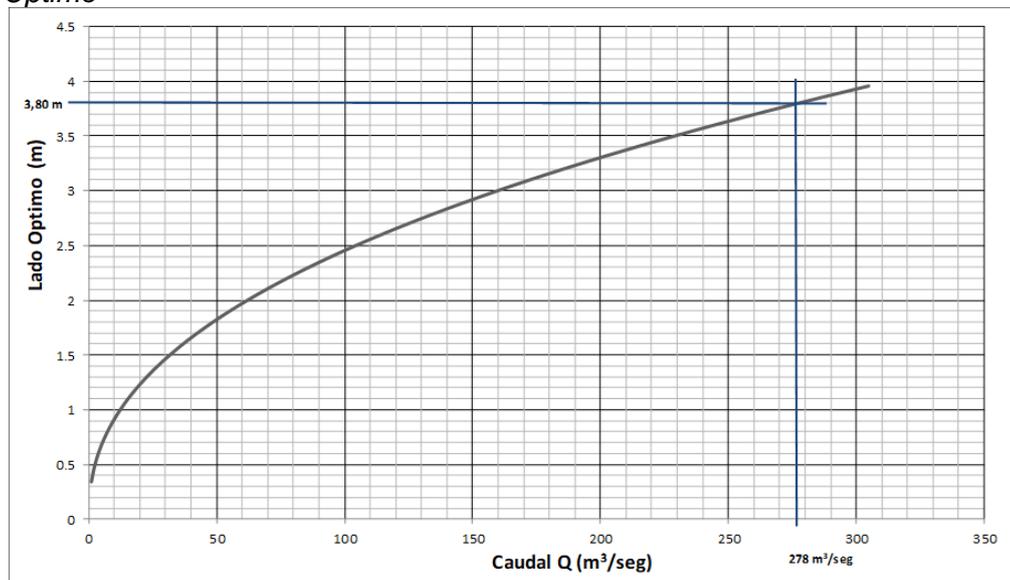
Se debe cumplir que para poder mover los caudales de aire calculados las chimeneas deben tener las dimensiones solicitadas.

Cabe resaltar que las chimeneas al tener que cumplir con cierta área y dependiendo del método que se efectuó la chimenea, se podrán realizar una o varias chimeneas que juntas sumen el área total requerida para el ingreso o salida de aire, las cuales deberán estar lo más cerca posible.

Para el caso de la mina Eureka al tener una formación de roca tipo toba desde superficie hasta el primer nivel, la decisión tomada fue la ejecución de chimeneas por el método Raise Bore, tres (3) chimeneas Raise bore de 2.4 m de diámetro que en conjunto sumen el área solicitada. A continuación, se realiza las gráficas para seleccionar el diámetro o lado óptimo de la chimenea. De acuerdo a la Figura 39, el lado óptimo de la chimenea es de 3.8 m y de acuerdo a la Figura 40, el diámetro óptimo es de 4.3 m.

Figura 39

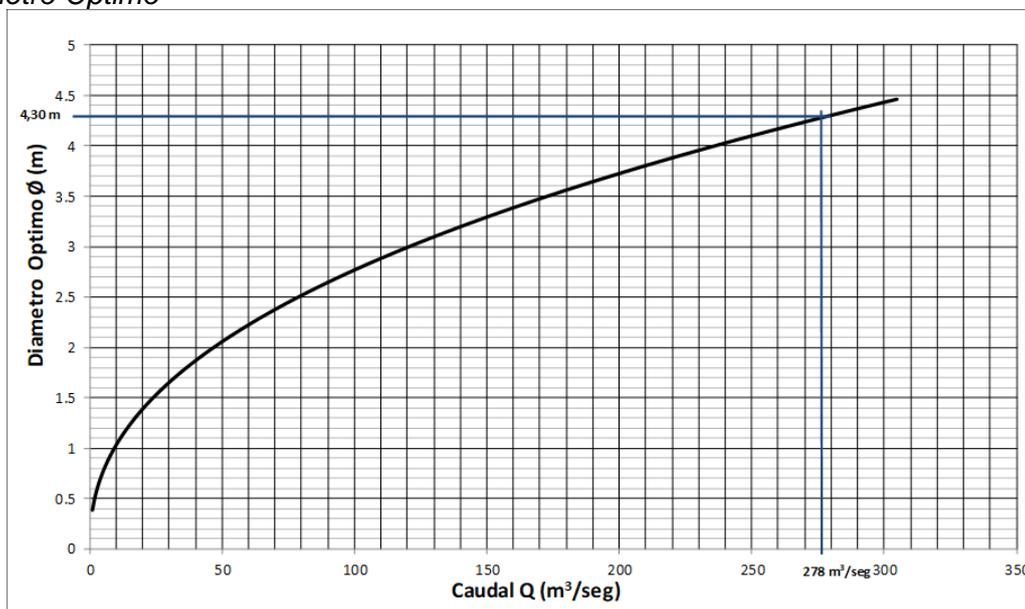
Lado Optimo



Fuente: Elaboración propia

Figura 40

Diámetro Optimo



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.3 Selección del ventilador principal. Para la selección del ventilador principal se cuenta con ventiladores de la Marca Cirigliano Modelo de 88J AF5066 con una potencia nominal de 400 HP, con un caudal de 300 000 cfm con una presión total de 4.99" CA. En la Tabla 20, se muestran las características del ventilador principal y en la Figura 26, se muestra la curva característica de dicho ventilador.

4.1.2 Selección de ventiladores auxiliares

Actualmente se cuenta con ventiladores de 40 000 cfm (Modelo 48KG, 100 HP Marca Cirigliano, para cubrir con la demanda de aire por niveles, dicho ventilador esta ubicados en la ventana de la Chimenea Este que sirve de ingreso de aire fresco. Para el cálculo de los ventiladores auxiliares adecuados primero nos basamos en el requerimiento del caudal por nivel.

Por nivel se requiere un caudal de 24 247 cfm, considerando los equipos mostrados en la Tabla 33, cuando se da un aumento de equipos por acarreo (dámper) en la extracción de mineral, se coordinó que los equipos deben mantenerse en espera en zonas cercanas al nivel de extracción para evitar la saturación de la zona de trabajo.

4.1.2.1 Cálculo del caudal. Mediante la Ecuación 5 calculamos el caudal que debe generar el ventilador axial auxiliar.

$$Q_{FINAL} = Qx\left(1 - \frac{F}{100}\right)^{-L/100}$$

Para el presente estudio tenemos:

- Q f. 24,247 cfm. (Valor calculado)
- F: 3% (Dato otorgado por el fabricante).
- L: 427 m.

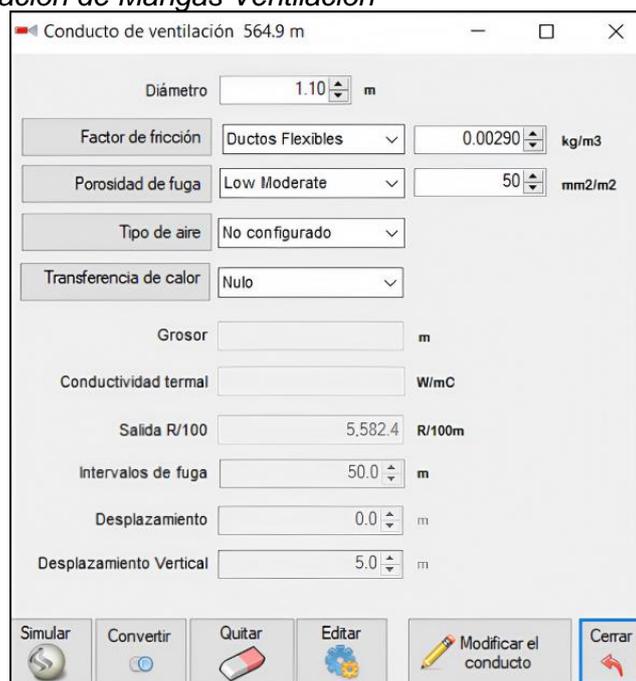
$$Q_{INICIAL} = 27,615 \text{ cfm}$$

Para cuestiones de facilidad y calculo el caudal inicial se estará redondeando al caudal de 30,000 cfm.

4.1.2.2 Cálculo de la presión. Para el cálculo de la presión del ventilador se debe determinar las características de la manga de ventilación con la cual se trabajará. Para nuestro caso se usará el diámetro de 1.1 m. Las secciones en la mina son de 4.0m x 4.5m donde se cuenta con equipos de grandes dimensiones. Se usará el programa Ventsim para determinar el caudal final y presión de la manga.

Figura 41

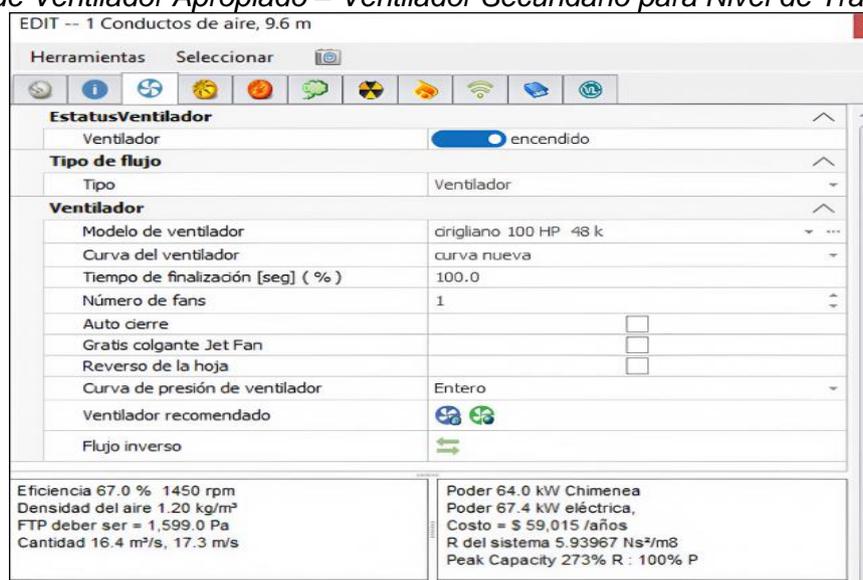
Construcción/Simulación de Mangas Ventilación



Fuente: Elaboración propia

Figura 42

Resumen de Ventilador Apropriado – Ventilador Secundario para Nivel de Trabajo



Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Simulación del diseño final

Tabla 40

Resumen de la Simulación del nuevo sistema de la Mina

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Flujo de aire compresible	Si
Presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapas	0: Etapa 1
Todos los conductos de aire	1159
Actual etapas conductos	851
Longitud total	20,689.1 m
Caudal de aire total de admisión	268.0 m³/s
Caudal de aire total de escape	267.4 m³/s
Flujo de masa total	321.25 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0.00645 Ns²/m8
Resistencia de la mina (incluyendo el conducto)	0.02811 Ns²/m8
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia del aire (perdida por fricción)	539.3 kW total
	73.4 kW chimenea
	50.4 kW conducir
	415.5 kW conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0.0 kW
Potencia eléctrica de entrada	1,377.1 kW
Que consta de ...	
17 ventiladores	1,377.1 kW
0 presiones fijadas	0.0 kW
0 flujos fijados	0.0 kW
0 refrigeración	0.0 kW

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Resumen del sistema de ventilación proyectado

El sistema final de ventilación esta descrito de la siguiente manera:

- El Sistema final de ventilación de la mina Eureka está definido por tres ejes principales de extracción:
 - Zona Este, Ingreso de aire limpio a través de tres chimeneas Raise bore de 2.4 m de diámetro desde superficie hasta el Nivel 554. A partir de este nivel el aire se canaliza a través de una chimenea de 4m x 4m hacia todos los niveles.
En cada nivel desde el nivel 554 hacia profundización se cuenta con una ventana hacia dicha chimenea este, donde se tiene instalado un ventilador de 100 HP como inyector de aire limpio.
 - Zona Oeste, Extracción de aire viciado a través de dos chimeneas de 3.1 m de diámetro desde superficie hasta el nivel 554, desde dicho nivel se cuenta con una chimenea de extracción de 4m x 4 m hasta profundización, se controla mediante reguladores en todos los niveles instalado en cada ventana.
Se cuenta con un ventilador extractor de 400 HP en el Nivel 554 el cual es el encargado de extraer el aire viciado de todos los niveles para luego derivarlo a superficie.
La extracción de aire viciado es direccionada para la zona de tajeos.
 - Zona Centro, se cuenta con una chimenea de 4 m de diámetro desde superficie hasta el Nivel 476, donde por transferencia se cuenta con una chimenea de 4m x 4m hasta profundización, el control de extracción por nivel se realiza mediante reguladores. Se cuenta con un ventilador de 400 HP instalado en superficie (caseta de ventilación). Este eje de extracción se usa básicamente para el desarrollo de la rampa principal y el desarrollo de los niveles, cuando se cumple el objetivo pasa al siguiente tramo de rampa y nivel por desarrollar.
- Con el presente diseño y distribución de ventiladores se tiene una mejora sustancial en el sistema de ventilación de la mina, inyección y extracción de aire se hace de

una manera más ordenada y sencilla. Conjuntamente con el sistema de bombeo se buscan alternativas para automatizar el sistema de ventilación a distancia.

- Las diluciones de gases tóxicos se realizan en menor tiempo haciendo que los ciclos de minado se realicen más rápido. Complementado con el sistema de monitoreo centralizado y la liberación de áreas después de las voladuras mediante los supervisores o jefes de guardia.
- Con el diseño propuesto se estaría coberturando un 113.7 % del caudal requerido en mina, el requerimiento de caudal es de 497 872 cfm y el caudal resultante mediante la simulación es de 566 313 cfm.

Tabla 41

Resumen de balance de caudales del nuevo sistema

INGRESO DE AIRE	
Zona de ingreso	Caudal m ³ /seg
Bocamina Eureka	76.2
Chimenea Raise Bore RB 1	5.4
Chimenea Raise Bore RBE – 1	47.5
Chimenea Raise Bore RBE – 2	48.6
Chimenea Raise Bore RBE – 3	49.6
Chimenea Raise Bore RB 3	40.0
Total (m ³ /seg)	267.3
Total (cfm)	566,377
EGRESO DE AIRE	
Zona de egreso	Caudal m ³ /seg
Chimenea Raise Bore RBW – 2	69.1
Chimenea Raise Bore RBW – 3	69.0
Chimenea Raise Bore RB 2	129.2
Total (m ³ /seg)	267.3
Total (cfm)	566,377

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de costos

Con base en la evaluación del ratio de extracción propuesta y el método de extracción, la operación de la flota de equipos diésel y el análisis mensual del nivel de trabajo real, el volumen de aire de la mina en Eureka se ha estimado en 267 m³/s (560.000 CFM). El sistema es una combinación de "Push – Pull" con los ventiladores de suministro de superficie primarios que proporcionan la presión requerida. Un sistema de elevación de escape dedicado y ventiladores de superficie proporcionan la presión de escape requerida para los planes de expansión actuales y futuros potenciales. El portal de la rampa principal se eleva principalmente durante el invierno y se puede revertir durante las operaciones de verano ajustando la configuración de la velocidad de los ventiladores de admisión y escape principales.

El aire fresco se suministra a través del pozo de entrada y la elevación de salida con conexiones en cada nivel operativo de la mina. El aire fluye a lo largo de cada nivel operativo para expulsarlo a través de una conexión de elevación de aire de retorno regulada. La cantidad de aire se ajusta para proporcionar una ventilación adecuada para el equipo diésel en funcionamiento, es decir, 25,8 m³/s (54.700 cfm) para un camión Dumper de 40 T y una unidad LHD LH410.

Se desarrolla una elevación de salida independiente de 1,8 m de diámetro que se utiliza como ruta de suministro de aire de admisión para el desarrollo inicial de la pendiente principal. Se utiliza un ventilador de suministro auxiliar de superficie para presurizar el sistema con aire "fresco". Todas las ubicaciones de acceso a nivel requieren un mamparo con acceso con puerta para personas.

Al evaluar las alternativas generales del sistema de ventilación principal, se revisaron tres opciones:

Opción 1

Se perfora un pozo de 4 metros de diámetro desde superficie hasta el nivel de 450 metros aproximadamente con excavación sostenida y equipada con un acceso para personal.

Tabla 42*Requerimientos de excavación – Opción 1*

UBICACIÓN	DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN	VELOCIDAD DE AIRE
Superficie hasta nivel 450	Chimenea de diámetro 4 metros	18.8 m/s 3700 fpm
	Con sostenimiento Malla, pernos y shotcrete	
Nivel 450 hasta nivel 216	Plataforma de 4m x 4m	14.8 m/s 2900 fpm
	Con sostenimiento Malla, pernos y shotcrete En intervalos verticales de 26 m	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43*Puntos de servicio de ventiladores principales – Opción 1*

SISTEMA	NUMERO DE VENTILADORES	OPERATIVIDAD	VENTILADOR CONECTADO KW
Admisión	2	118 m ³ /s a 2225 Pa 301 kW a 84% eficiencia de ventilador	2 x 378 kW (500 HP)
Escape	2	100 m ³ /s a 600 Pa 95 kW a 84% eficiencia de ventilador	2 x 112 kW (150 HP)
Total		792 kW	980 kW
Costo de operación por año @ 0.08 US\$ kW-h			555,035 US\$

Fuente: Elaboración propia

Opción 2

Se perfora un pozo de 3 m de diámetro desde la superficie hasta el nivel de aproximadamente 450 m. También se perfora un pozo de salida independiente de 1,8 m, se asegura y se equipa con una rampa para personas desde la superficie hasta el nivel de aproximadamente 470 m.

Tabla 44*Requerimientos de excavación – Opción 2*

UBICACIÓN	DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN	VELOCIDAD DE AIRE
Superficie hasta nivel 450	Chimenea de diámetro 3 metros	31.4 m/s 6180 fpm
Nivel 450 hasta nivel 216	Plataforma de 4m x 4m En intervalos verticales de 26 m	13.9 m/s 2730 fpm
SALIDA Superficie hasta nivel 470	Chimenea de diámetro 1.8 metros Con sostenimiento	5.5 m/s 1080 fpm
SALIDA Nivel 470 hasta nivel 216	Plataforma de 2.5 m de diámetro Con sostenimiento Malla, pernos y shotcrete En intervalos verticales de 26 m	2.85 m/s 560 fpm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45*Puntos de servicio de ventiladores principales – Opción 2*

SISTEMA	NUMERO DE VENTILADORES	OPERATIVIDAD	VENTILADOR CONECTADO KW
Admisión	2	112 m ³ /s a 2750 Pa 333 kW a 91% eficiencia de ventilador	2 x 448 kW (600 HP)
Escape	2	100 m ³ /s a 600 Pa 95 kW a 65% eficiencia de ventilador	2 x 112 kW (150 HP)
Salida	1	14.2 m ³ /s a 2000 Pa 40.6 kW a 70% eficiencia de ventilador	1 x 45 kW (60 HP)
Total		896.6 kW	1165 kW
Costo de operación por año @ 0.08 US\$ kW-h			628,340 US\$

Fuente: Elaboración propia

Opción 3

Se perfora un pozo de 4 m de diámetro desde la superficie hasta el nivel de aproximadamente 450 m. También se perfora un pozo de salida independiente de 1,8 m, se asegura y se equipa con una rampa para personas desde la superficie hasta el nivel de aproximadamente 470 m.

Tabla 46*Requerimientos de excavación – Opción 3*

UBICACIÓN	DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN	VELOCIDAD DE AIRE
Superficie hasta nivel 450	Chimenea de diámetro 4 metros	18.8 m/s 3700 fpm
Nivel 450 hasta nivel 216	Plataforma de 4m x 4m En intervalos verticales de 26 m	13.9 m/s 2730 fpm
SALIDA Superficie hasta nivel 470	Chimenea de diámetro 1.8 metros Con sostenimiento	5.5 m/s 1080 fpm
SALIDA Nivel 470 hasta nivel 216	Plataforma de 2.5 m de diámetro Con sostenimiento Malla, pernos y shotcrete En intervalos verticales de 26 m	2.85 m/s 560 fpm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47*Puntos de servicio de ventiladores principales – Opción 3*

SISTEMA	NUMERO DE VENTILADORES	OPERATIVIDAD	VENTILADOR CONECTADO KW
Admisión	2	112 m ³ /s a 1750 Pa 226 kW a 85.4% eficiencia de ventilador	2 x 300 kW (400 HP)
Escape	2	100 m ³ /s a 600 Pa 95 kW a 65% eficiencia de ventilador	2 x 112 kW (150 HP)
Salida	1	14.2 m ³ /s a 1750 Pa 35.5 kW a 70% eficiencia de ventilador	1 x 45 kW (60 HP)
Total		677.6 kW	869 kW
Costo de operación por año @ 0.08 US\$ kW-h			474,845 US\$

Fuente: Elaboración propia

En todos los casos, el sistema de elevación de aire de retorno consta de una elevación perforada de 4 m de diámetro hasta el nivel 554 aproximadamente, con todas las extensiones de elevación inferiores posteriores desarrolladas como elevaciones de caída de 4 m x 4 m. Se requerirán algunos desplazamientos horizontales de la deriva de aire de retorno para conectar todos los niveles.

También se modeló una expansión a largo plazo o potencial futura al sistema de ventilación de profundidad utilizando la configuración del sistema de admisión de la Opción 3 para mostrar el impacto en los puntos de servicio operativos de los ventiladores principales de la superficie cuando se entregan y se expulsan hasta 165 m³/s (350.000 cfm) desde el nivel 216 m.

Los puntos de servicio operativos de los ventiladores principales y los costos operativos anuales se enumeran en la Tabla 48.

Tabla 48

Puntos de servicio de ventiladores principales – Largo plazo

SISTEMA	NUMERO DE VENTILADORES	OPERATIVIDAD	VENTILADOR CONECTADO KW
Admisión	2	112 m ³ /s a 1650 Pa 217 kW a 85% eficiencia de ventilador	2 x 300 kW (400 HP)
Escape	2	100 m ³ /s a 1500 Pa 200 kW a 75% eficiencia de ventilador	2 x 224 kW (300 HP)
Salida	1	14.2 m ³ /s a 1200 Pa 24.4 kW a 70% eficiencia de ventilador	1 x 45 kW (60 HP)
Total		858.4 kW	1093 kW
Costo de operación por año @ 0.08 US\$ kW-h			601,566 US\$

Fuente: Elaboración propia

Se recomienda proceder con la Opción 3, que proporcionaría una conexión temprana al pozo de ventilación para el desarrollo inicial y tendría la menor resistencia y pérdidas de presión, es decir, costos operativos para el desarrollo actual y futuro de la mina Eureka.

Conclusiones

Con las simulaciones realizadas en el programa Ventsim se pudo reafirmar la necesidad de construir chimeneas de ventilación a superficie de diámetros grandes para el ingreso de aire limpio a las labores de profundización. Los requerimientos de aire principalmente son de los equipos diésel lo cuales se incrementaban a medida que la producción se estabilizada a 4000 t/día.

Siendo una herramienta importante el empleo del Ventsim también se confirmaron que era necesario el uso de ventiladores secundarios de mayor presión para ventilar distancias más largas.

Las simulaciones determinaron el empleo de reguladores de aire en los diferentes niveles de producción para la extracción de aire viciado.

Con la construcción de un sistema de extracción principal más robusto se realizaron planificaciones de producción más sostenidas. El sistema de ventilación en un principio dependía de un suministro de energía basado en grupos generadores mediante la combustión de petróleo, con el ingreso de la interconectada se puede sostener la demanda de energía para los ventiladores principales y secundarios.

La red de ventilación que se proyectó y ejecuto es sencilla y fácil de comprender, debido a la geología del cuerpo mineralizado se realizaron circuitos de ingreso y salida para los niveles de producción y rampa principal.

El sistema de ventilación de basa en Ventilación Forzada mediante el empleo de ventiladores de 200 kcfm como extractores principales los cuales inducen al aire ingrese por la rampa principal y chimeneas de ventilación, en cada nivel se cuenta con ventana a la chimenea de ingreso donde se instalaron ventiladores secundarios para inyectar aire fresco a las zonas de trabajo. Es indispensable contar con secciones adecuadas para la instalación de los ventiladores y ductos de ventilación.

En el desarrollo de los niveles de producción y rampa principal se consideró dentro del planeamiento la ejecución de secciones amplias que permitan la instalación de

ventiladores y ductos de mayor diámetro. Se consideró también el dimensionamiento de los equipos de acarreo para evitar las roturas de mangas de ventilación y servicios en las galerías.

Se concluye que el circuito de ventilación de la Mina Eureka y de las demás minas como Mariana Central y Mariana Norte, el sistema de ventilación implementado, opera con un circuito de ventilación forzado a través de rampas y chimeneas de ventilación como ingreso de aire limpio construidas con el sistema Raise Bore al inicio y la continuación con el sistema de Taladros Largos, el sistema de extracción del aire viciado por chimeneas de tipo escalonado en un sistema mecanizado lo que permite una resistencia baja. Se ubicaron estaciones de monitoreo a lo largo de la rampa de ingreso, chimeneas de ingreso y salida.

Cada Nivel contaba con un ingreso y salida de aire independiente, permitiendo que el aire contaminado de las voladuras y de la combustión de equipos pesados se mantengan en el nivel de producción sin afectar la ventilación de la rampa principal.

Las normativas de Límites Máximos Permisibles de Gases usadas en las Operaciones Argentinas se basaron en normativas peruanas vigentes del año 2012.

Se concluye que la Opción 3, proporcionaría una conexión temprana al pozo de ventilación para el desarrollo inicial y tendría la menor resistencia y pérdidas de presión, es decir, costos operativos para el desarrollo actual y futuro de la mina Eureka, por lo que es la opción más recomendada.

Como parte final del estudio, se concluye que el nuevo sistema de ventilación implementado obtuvo una eficiencia de ventilación de 113.7% lo que representa un incremento de 23% respecto al sistema anterior. Respecto a la productividad del sistema, se evaluaron tres opciones, la opción 3 generan costos de operación de 474,845 US\$ por año, lo que representa una reducción de 17% respecto a la opción 1 y 32% respecto a la opción 2.

Recomendaciones

De acuerdo a la ubicación geográfica de la mina, la temperatura superficial debe aprovecharse encausándolo hacia las zonas más profundas de las operaciones, donde los problemas de temperatura son más constantes. La entrada de aire frío deben ser encausadas de la manera más eficiente posible. De esta manera se podrán contar con temperaturas que estén dentro de los rangos de operación y mantener temperaturas aceptables en las diferentes zonas de trabajo. Los ingresos de aire se recomiendan estar libre de gases, humos, vapores nocivos e inflamables manteniendo niveles de oxígeno aceptable con un mínimo de 20 % de concentración.

Se recomienda realizar monitorios permanentes de gases y llevar tableros de control, que sirvan como informativo al personal que entra a trabajar a su labor.

A medida que la mina se profundice se recomienda contar con un sistema de comunicación que permita introducir equipos de monitoreo de gases y ventiladores principales y secundarios instalados en interior mina, el fin de contar con un sistema que monitoree el sistema de ventilación dará como resultado la toma de decisiones de los cambios que se puedan presentar en la operación y llegar a obtener un sistema de ventilación por demanda.

Se recomienda contar con un sistema de control del número de personal y equipos diésel que trabajan por turno en interior mina, para determinar el requerimiento real y realizar regulaciones en el sistema de ventilación tanto en el ingreso como en la salida, con estos parámetros se podrán realizar ahorros de energía en los ventiladores principales y secundarios.

Los ingresos y salidas principales de aire, deben estar en constante revisión y mantenimiento para evitar obstrucciones y ocasionen interrupciones en el flujo de aire. Las obstrucciones ocasionan aumento en la resistencia del sistema teniendo efectos en forma directa en los ventiladores principales como desgaste prematuro del equipo e inestabilidad en su rango de operación.

A medida que las áreas de trabajo o minado aumenten se contarán con mayor número de labores abandonadas, las cuales se deberán de aislar de los circuitos de ventilación, para evitar aumentar la resistencia del sistema o recirculaciones de aire sea limpio o contaminado.

Se recomienda realizar la calibración del modelo para llevar a cabo las simulaciones de ventilación y diseñar la sección óptima de las chimeneas de ventilación, a fin de bajar los costos de energía

Se recomienda dimensionar de una manera adecuada las chimeneas de ingreso y salida de aire para un plazo de mediano a largo plazo, de esta manera el sistema de ventilación a medida que la mina se expanda se reemplace con ventiladores de mayor capacidad y presión adecuándose a los nuevos requerimientos de la operación.

Se recomienda aislar las zonas donde se concentren temperaturas altas en el ambiente para evitar la propagación del mismo a otras zonas de la mina.

Para minimizar el uso de kW del ventilador operativo, se recomienda que todos los ventiladores estén equipados con variadores de frecuencia para optimizar el funcionamiento de los ventiladores principales durante las distintas etapas de desarrollo y producción.

Referencias bibliográficas

- Castillo, D. (2017), *“Evaluación del sistema de ventilación de la mina el Roble”*.
- Carabajo, C. (2015), *“Diseño del circuito de ventilación de la zona norte de la Mina Cabo de Hornos, ubicada en el distrito aurífero polimetálico Portovelo - Zaruma”*.
- Condori, V. (2016), *“Optimización del sistema de ventilación con el software Ventsim Visual en la U.M. Heraldos Negros de la compañía minera San Valentín S.A - Huancavelica”*.
- Chambergó, G. (2013), *“Propuesta de un sistema de ventilación, aplicando tecnologías de información y manejo de escenarios técnico económico en la unidad productiva San Cristóbal, de Minera Bateas S.A.C.”*.
- García, E. (2016), *“Evaluación de la situación actual del sistema de ventilación y Propuesta para su optimización en mina subterránea carbonífera Mi Grimaldina I - Cajamarca - 2016.”*
- Ibáñez, V. (2017), *“Diseño del sistema de ventilación en el nivel 4050 veta Don Hernesto Unidad Minera El Porvenir - Milpo”*.
- Licas, V. (2014), *“Proyecto de ventilación, para aplicar el derribo por subniveles en la Unidad Minera de Caudalosa Chica”*.
- Mallqui, A. (2006), *“Ventilación de Minas.”*
- Morales, F. (2017), *“Optimización del sistema de ventilación de la Mina Charito, Compañía Minera Poderosa S.A.”*.
- Meneses, E. (2016), *“Análisis y diseño para la propuesta de un sistema de ventilación adecuado para FOGEL de Centroamérica”*.
- Piérola, O. (2015), *“Evaluación integral del sistema de ventilación, modelamiento y diseño mediante el uso del Software Ventsim visual avanzado en la U. M. Animon CIA. Minera Chungar”*.
- Sutty, J. (2016), *“Influencia de la ventilación mecánica, en el diseño del sistema de ventilación del nivel 4955 mina Urano SAC – Puno”*.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional DS-023-2017-EM.....	1
Anexo 2: Configuración de sistema de ventiladores de admisión.....	4
Anexo 3: Esquema de ventilación de la Opción 3	5
Anexo 4: Esquema de ventilación de la Opción 3 a Largo plazo.....	6

Anexo 1: Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional DS-023-2017-EM

Subcapítulo VIII Ventilación

Artículo 246.- El titular de actividad minera velará por el suministro de aire limpio a las labores de trabajo de acuerdo a las necesidades del trabajador, de los equipos y para evacuar los gases, humos y polvo suspendido que pudieran afectar la salud del trabajador, así como para mantener condiciones termo-ambientales confortables. Todo sistema de ventilación en la actividad minera, en cuanto se requiere a la calidad del aire, deberá mantenerse dentro de los límites de exposición ocupacional para agentes químicos de acuerdo al ANEXO N.º 15 y lo establecido en el Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo, aprobado por Decreto Supremo N° 015-2005-SA o la norma que lo modifique o sustituya. Además, debe cumplir con lo siguiente:

a) Al inicio de cada jornada o antes de ingresar a labores mineras, en especial labores ciegas programadas, como son chimeneas y piques, deberá realizar mediciones de gases de monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, oxígeno y otros, de acuerdo a la naturaleza del yacimiento, al uso de explosivos y al uso de equipos con motores petroleros, las que deberán ser registradas y comunicadas a los trabajadores que tienen que ingresar a dicha labor.

b) En todas las labores subterráneas se mantendrá una circulación de aire limpio y fresco en cantidad y calidad suficientes de acuerdo con el número de trabajadores, con el total de HPs de los equipos con motores de combustión interna, así como para la dilución de los gases que permitan contar en el ambiente de trabajo con un mínimo de diecinueve puntos cinco por ciento (19.5%) de oxígeno.

c) Las labores de entrada y salida de aire deberán ser absolutamente independientes. El circuito general de ventilación se dividirá en el interior de las minas en ramales para hacer que todas las labores en trabajo reciban su parte proporcional de aire fresco, evitando toda recirculación de aire.

d) Cuando la ventilación natural no sea capaz de cumplir con los artículos precedentes, deberá emplearse ventilación mecánica, instalando ventiladores principales, secundarios o auxiliares, según las necesidades.

e) Los ventiladores principales, secundarios y auxiliares serán instalados adecuadamente, para evitar cualquier posible recirculación del aire.

No está permitido que los frentes de desarrollo, de chimeneas y labores de explotación sean ventiladas con aire usado.

f) En labores que posean sólo una vía de acceso y que tengan un avance de más de sesenta metros (60 m), es obligatorio el empleo de ventiladores auxiliares. En longitudes de avance menores a sesenta metros (60 m) se empleará también ventiladores auxiliares sólo cuando las condiciones ambientales así lo exijan.

En las labores de desarrollo y preparación se instalará mangas de ventilación a no más de quince metros (15 m) del frente de disparo.

g) Cuando existan indicios de estar cerca de una cámara subterránea de gas o posibilidades de un desprendimiento súbito de gas, se efectuará taladros paralelos y oblicuos al eje de la labor, con por lo menos diez metros (10 m) de avance.

Artículo 247.- En los lugares de trabajo de las minas ubicadas hasta mil quinientos (1,500) metros sobre el nivel del mar, la cantidad mínima de aire necesario por hombre será de tres metros cúbicos por minuto (3 m³/min). En otras altitudes la cantidad de aire será de acuerdo a la siguiente:

1. De 1,500 a 3,000 msnm aumentará en 40% que será igual a 4 m³/min
2. De 3,000 a 4,000 msnm aumentará en 70% que será igual a 5 m³/min
3. Sobre los 4,000 msnm aumentará en 100% que será igual a 6 m³/min

Artículo 248.- En ningún caso la velocidad del aire será menor de veinte metros por minuto (20 m/min) ni superior a doscientos cincuenta metros por minuto (250 m/min) en las labores de explotación, incluido el desarrollo y preparación. Cuando se emplee explosivo ANFO u otros agentes de voladura, la velocidad del aire no será menor de veinticinco metros por minuto (25 m/min).

Artículo 249.- Se tomarán todas las providencias del caso para evitar la destrucción y paralización de los ventiladores principales. Dichos ventiladores deberán cumplir las siguientes condiciones:

1. Ser instalados en casetas incombustibles y protegidas contra derrumbes, golpes, explosivos y agentes extraños. Los ventiladores en superficie, así como las instalaciones eléctricas deben contar con cercos perimétricos adecuados para evitar el acceso de personas extrañas.

Contar con otras precauciones aconsejables según las condiciones locales para protegerlas.

2. Tener, por lo menos, dos (2) fuentes independientes de energía eléctrica que, en lo posible, deberán llegar por vías diferentes.

3. Estar provistos de silenciadores para minimizar los ruidos en áreas de trabajo o en zonas con poblaciones donde puedan ocasionar perjuicios en la salud de las personas.

Artículo 250.- En casos de falla mecánica o eléctrica de los ventiladores principales, secundarios y auxiliares que atienden labores mineras en operación, éstas deben ser paralizadas y clausuradas su acceso, de forma que se impida el pase de los trabajadores y equipos móviles hasta verificar que la calidad y cantidad del aire haya vuelto a sus condiciones normales. Los trabajos de restablecimiento serán autorizados por el ingeniero supervisor.

Artículo 251.- Para los ventiladores principales con capacidades iguales o superiores a 2,831 metros cúbicos por minuto o su equivalente de 100,000 pies cúbicos por minuto, se instalarán paneles de control remoto que permitan su monitoreo de operación, su regulación a parámetros requeridos, invertir la corriente de aire en caso necesario y emitir señales de alarma en caso de paradas y disminución de velocidad.

Para el caso de ventiladores extractores de aire usado el monitoreo también comprenderá el contenido de gases de monóxido de carbono, gases nitrosos, oxígeno y temperatura en el aire circulante.

Los paneles de control contarán con baterías de respaldo que le permite seguir funcionando en caso de fallas en el suministro de energía eléctrica.

La operación de los paneles de control será realizada sólo por la supervisión autorizada.

Artículo 252.- Se efectuarán evaluaciones integrales del sistema de ventilación de una mina subterránea cada semestre y evaluaciones parciales del mismo cada vez que se produzcan comunicaciones de labores y cambios en los circuitos de aire. Controles permanentes de ventilación se efectuarán en las labores de exploración, desarrollo, preparación y explotación donde haya personal trabajando.

La evaluación integral de ventilación deberá considerar:

- a) Ubicación de estaciones de control de ventilación.
- b) Circuitos de aire de la mina.
- c) Balance de ingresos y salidas de aire de la mina. La diferencia de caudales de aire entre los ingresos y salidas de aire no deberá exceder el diez por ciento (10%).
- d) Demanda de aire de la mina, teniendo en cuenta el número de trabajadores de la guardia más numerosa, la operación de los equipos diésel, los gases originados en las voladuras y la temperatura de las labores en trabajo. La demanda de la mina será la cantidad de aire requerida para los trabajadores y la cantidad mayor resultante de comparar el aire requerido para la operación y dilución de los gases de escape de los equipos diésel, el aire requerido para diluir los gases de las voladuras y el aire requerido para mantener una temperatura del ambiente de trabajo igual o menor a 29 °C.
- e) Los requerimientos de aire para los equipos diésel deberá considerar la capacidad máxima de Hps.
- f) Cobertura de la demanda de aire de la mina con el aire que ingresa a la misma.
- g) Cobertura de las demandas de aire en las labores de exploración, desarrollo, preparación y explotación de la mina.
- h) Mediciones de Oxígeno, Dióxido de Carbono, gases tóxicos y temperatura ambiental en las vías principales de la mina y labores en operación.
- i) Ubicación de ventiladores, indicando capacidad de diseño y operación.
- j) Disponibilidad de las curvas de rendimiento de los ventiladores.
- k) Planos de ventilación de la mina, indicando los circuitos de aire y estaciones de control, ubicación de ventiladores, puertas de ventilación, tapones y otros.

Las evaluaciones de ventilación y mediciones de la calidad del aire se harán con instrumentos adecuados y con calibración vigente para cada necesidad.

Artículo 253.- Está terminantemente prohibido el ingreso de vehículos con motores de combustión a gasolina a minas subterráneas.

Artículo 254.- En las labores mineras subterráneas donde operan equipos con motores petroleros deberá adoptarse las siguientes medidas de seguridad:

- a) Los equipos deben estar diseñados para asegurar que las concentraciones de emisión de gases al ambiente de trabajo sean las mínimas posibles y las concentraciones en el ambiente de trabajo se encuentren siempre por debajo del límite de exposición ocupacional para agentes químicos.
- b) La cantidad de aire circulante no será menor de tres (3) m³/min por cada HP que desarrollen los equipos; asegurándose que las emisiones de gases en sus escapes no superen las concentraciones indicadas en los literales d) y e) subsiguientes.
- c) Monitorear y registrar diariamente las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en el escape de los equipos operando en los mismos frentes de trabajo de la mina, las que se deben encontrar por debajo de quinientos (500) partes por millón (ppm) de CO.
- d) Monitorear y registrar diariamente concentraciones de dióxido de nitrógeno en el escape de las máquinas operando en interior mina, no debiendo superar 100 partes por millón.
- e) Las operaciones de los equipos a petróleo se suspenderán, prohibiendo su ingreso a labores de mina subterránea en los siguientes casos:

1. Cuando las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y/o gases de dióxido de nitrógeno (NO) en el ambiente de trabajo estén por encima del límite de exposición ocupacional para agentes químicos establecidos en el ANEXO N° 15 del presente reglamento.

2. Cuando la emisión de gases por el escape de dicha máquina exceda de quinientos (500) ppm de monóxido de carbono o de cien (100) ppm de dióxido de nitrógeno, medidos en las labores subterráneas donde desarrollen sus actividades.

- f) Establecer y ejecutar programas mensuales de mantenimiento preventivo de los equipos, de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes, para reducir las emisiones de gases y material particulado (ollín) de los motores diésel.

Artículo 255.- En toda mina subterránea, donde se utilicen explosivos y equipos diésel, todos los trabajadores deberán ingresar portando en forma obligatoria respiradores auto rescatadores para la protección contra gases de monóxido de carbono. Estos respiradores serán utilizados por los trabajadores sólo en casos de emergencia individual o colectiva cuando estos gases pongan en riesgo inminente su vida, para salir de la mina o para ubicarse en una zona de aire fresco. Estos respiradores deben estar fabricados para una protección mínima de treinta (30) minutos.

Artículo 256.- En las labores mineras subterráneas donde haya liberación de gases o labores abandonadas gaseadas deberán adoptarse las siguientes medidas de seguridad:

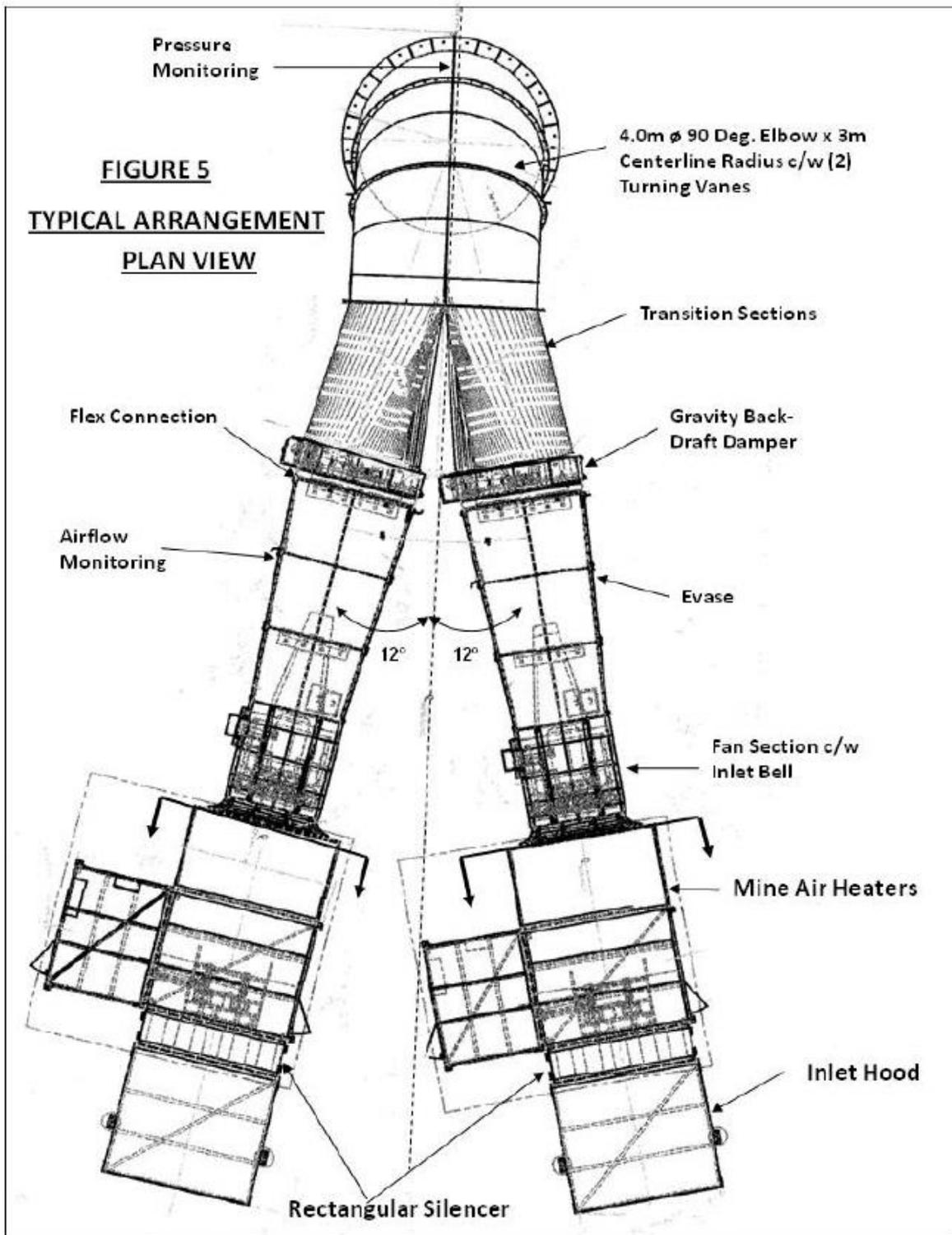
- a) Contar con equipos de ventilación forzada capaz de diluir los gases a concentraciones por debajo del límite de exposición ocupacional para agentes químicos.
- b) Clausurar las labores por medio de puertas o tapones herméticos que impidan el escape de gases y señalizarlos para evitar el ingreso de personas.

Artículo 257.- La sala o estación de carguío de baterías, deberán estar bien ventiladas con un volumen suficiente de aire para prevenir la acumulación de gas hidrógeno.

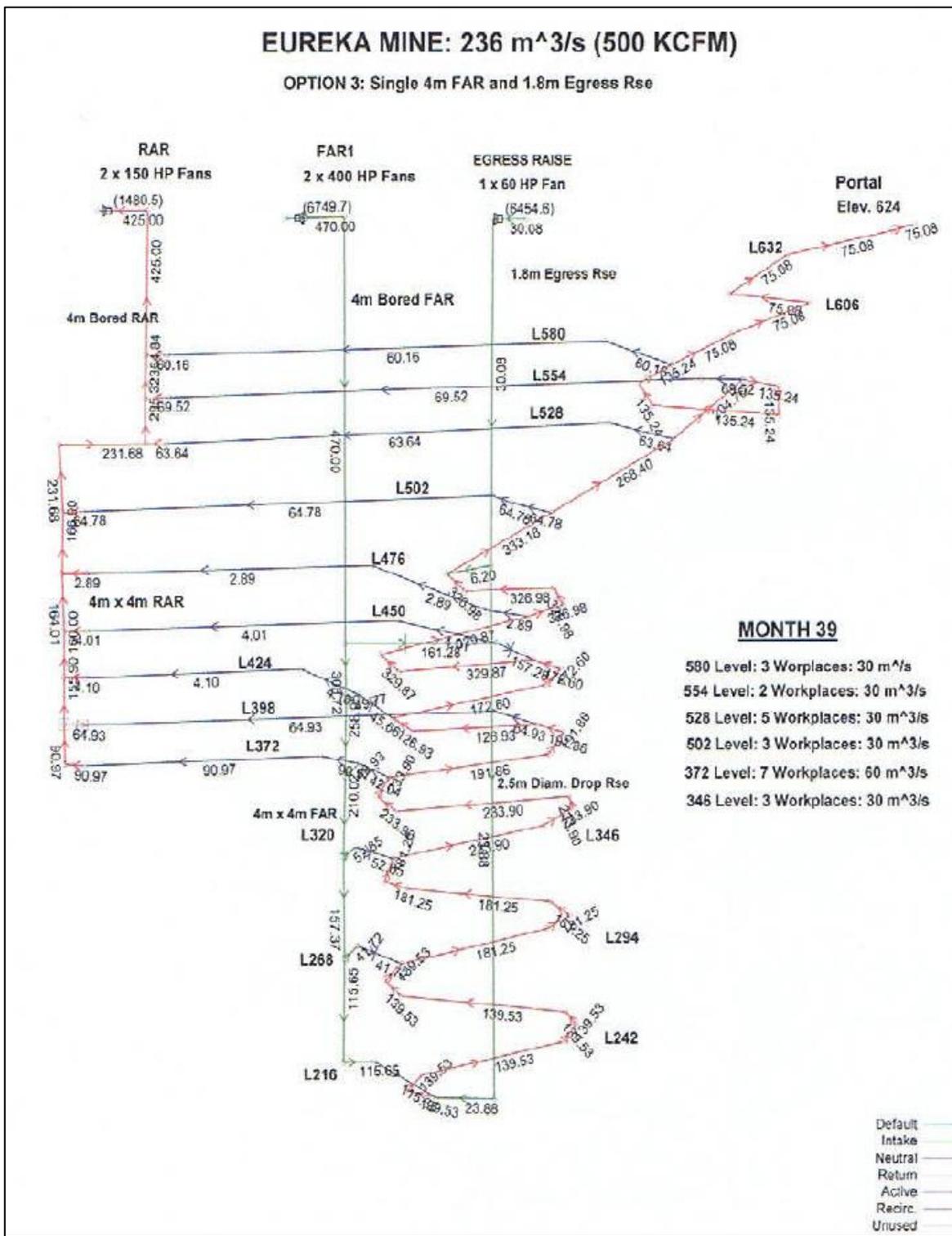
La sala o estación debe tener avisos de prohibición de fumar, del uso de llamas abiertas o del desarrollo de otras actividades que pudieran crear una fuente de ignición durante la actividad de cargado de baterías.

Para el funcionamiento de la sala o estación en el subsuelo, previamente se deberá presentar a la autoridad competente la memoria descriptiva, el plano de ubicación y el plano de ventilación. El cumplimiento de esta obligación será verificado en la fiscalización que realice la autoridad competente.

Anexo 2: Configuración de sistema de ventiladores de admisión



Anexo 3: Esquema de ventilación de la Opción 3



Anexo 4: Esquema de ventilación de la Opción 3 a Largo plazo

