

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA**  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**PROPUESTA TÉCNICA DE MEJORA DEL SISTEMA DE  
VENTILACIÓN PRINCIPAL DE UNA OPERACIÓN MINERA  
SUBTERRÁNEA POLIMETÁLICA - 2015**

Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, que presentan los bachilleres:

**Renzo Eyreem Portilla Salazar**

**Bryan Pier Velarde Macukachi**

**ASESOR: Christian Espinoza**

Lima, febrero de 2018

## AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres y profesores, que con su esfuerzo y sacrificio pudimos lograr ser profesionales. Además, agradecemos al ingeniero Edgard Vilela Acosta, profesor de la especialidad de ingeniería de minas, que con su apoyo incondicional se logró dar inicio al presente proyecto de tesis. A los ingenieros Camila Yépez y Christian Espinoza por su asesoría y apoyo técnico, a José Yupanqui por brindarnos información bibliográfica y asesoría en modelamiento computacional y al ingeniero Carlos Soldi por todo lo enseñado en ventilación de minas.

## Resumen de Tesis

El siguiente estudio propone la optimización del sistema de ventilación principal de una minera polimetálica ubicada a 4500 msnm, la cual no cuenta con un modelo computacional actualizado que le permita llevar el control operativo de los flujos de aire circulantes dentro de su red subterránea. La metodología a desarrollar incluye la recolección de data específica (mediciones en campo de las condiciones termo ambiental del flujo de aire en mina), diagnóstico de condiciones actuales y propuestas de optimización. La simulación computacional fue realizada utilizando el software de ventilación VentSim Visual 4. El estudio busca cumplir con todos los requisitos y parámetros normados en el Reglamento de Seguridad Minera DS 024-2016-MEM (MEM, 2016)

En la optimización, se evalúan dos alternativas de mejora; primero mediante la construcción de dos ductos “*raise borer*” principales de gran diámetro y longitud que aseguren la demanda de aire en la profundización de la veta principal, que es, a largo plazo, el futuro de la mina; segundo mediante la eficiencia en el uso de energía de los ventiladores principales mediante la optimización de la demanda de aire de acuerdo al requerimiento total de mina considerando la alternativa de uso de variadores de frecuencia de voltaje en los ventiladores principales de extracción, que tienen una capacidad de extracción de 300 000 CFM. Estas optimizaciones logran reducir el costo operativo en más del 60%, dando un margen de ahorro de más de US\$ 200 000 anuales y reduciendo la cantidad de agentes químicos en el aire en un 30%.

## Abstract

The following research proposes the optimization of the main ventilation system of a polymetallic mine operation located at 4500 MASL. The mine does not have an updated ventilation computer model that allows an operational control of the circulating air flows within its underground network. The methodology to be developed includes the recollection of specific data (field measurements of the thermo-environmental conditions of the air flow), diagnosis of current conditions and optimization proposals. The computer simulation was performed using VentSim Visual 4 software. The research seeks to comply with all the requirements and parameters regulated in the Mining Safety Regulation DS 024-2016-MEM (MEM, 2016)

In the optimization, two improvement alternatives are evaluated; first by building two major "raise borer" ducts of large diameter and length that ensure the demand for air in the deepening of the main vein, which is, in the long term, the future of the mine; second by the efficient use of energy in the main fans by voltage regulators and optimizing the air demand of air. These optimizations manage to reduce the operating cost by more than 60%, giving a savings margin of more than US \$ 200 000 per year and reducing the concentration of chemical agents in the air flow by 30%.

## TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero de Minas

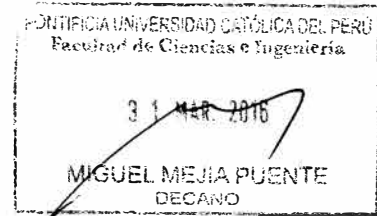
ALUMNOS : Portilla Salazar, Renzo Eyreem  
Velarde Macukachi, Bryan Pier

CÓDIGO : 20080483  
20077169

PROPUESTO POR : Dr. Adolfo Pillihuaman Zambrano

ASESOR : Ing. Christian Reynaldo Espinoza Romero

TEMA : Propuesta técnica de Mejora del Sistema de Ventilación Principal  
de una operación minera subterránea polimetálica-2015  
#137



### OBJETIVO GENERAL

El objetivo será construir y simular el sistema de ventilación principal de una mina subterránea polimetálica, y proponer mejoras técnicas según nuevas condiciones operativas (dígase construcción de infraestructura dedicada y/o modificación de diseño de estructuras existentes), criterios de planeamiento (nuevas rutas de acarreo y/o circulación de personal y equipos de minado) e implementación de equipos de control (variadores de voltaje, compuertas, tapones) que permitan tener control del costo total del área de Ventilación, ya sea por reducción de OPEX y ahorro en CAPEX, y mejora sustancial en el rendimiento del personal y equipos dentro del ciclo de minado.

### Objetivos Específicos

- Asegurar las condiciones termo ambiental del personal, maquinaria y equipo, con el fin de brindar las condiciones óptimas para el trabajo.
- Asegurar la calidad y cantidad del aire en toda la operación subterránea, respetando las normativas legales nacionales correspondientes (límites máximos permisibles).
- Reducir las pérdidas de caudal y presión en todo el sistema de ventilación.
- Cumplir con los requerimientos de aire a corto y mediano plazo.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
Av. Universitaria 1801, San Miguel  
Lima 32 - Perú  
T: 626 2000 anexos 5000, 5001  
F: 626 2852

[www.pucp.edu.pe/secc/minas](http://www.pucp.edu.pe/secc/minas)

AC

**DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:** Es de conocimiento general que el aire es considerado una sustancia vital para cualquier actividad humana debido a que cumple la función de fuente primaria del oxígeno, el cual es primordial para los procesos de respiración en seres vivos y para la apropiada combustión y funcionamiento de motores en equipos mecánicos entre otras funciones.

En la mina subterránea, se ha detectado una deficiencia en ventilación en los niveles 1100 en adelante (según la profundización) debido a las condiciones del aire y la temperatura a las cuales se expone al personal durante la realización del ciclo de minado, lo cual influye directamente en la eficiencia de los involucrados y generando una condición sub estándar con potencial de pérdida según lo señalado en las normativas legales de Seguridad (ya sea en la Ley general de Seguridad y Salud en el trabajo 29783 o en el Decreto Supremo 055-2010-EM).

### PLAN DE TRABAJO:

- Búsqueda de información (antecedentes)
- Definir la metodología del trabajo
- Recolección de data
- Primera Medición de condiciones termo-ambientales en campo
- Trabajo de gabinete
- Análisis de las variables recopiladas
- Primera simulación del modelo de ventilación en Ventsim
- Análisis de data (cálculo de requerimiento de aire)
- Segunda Medición de condiciones termo-ambientales en campo (reajuste)
- Segunda simulación del modelo de ventilación en Ventsim
- Diagnóstico de las condiciones del flujo de aire
- Análisis de sensibilidad del modelo
- Optimización del sistema de ventilación principal
- Discusiones, recomendaciones y conclusiones

*Máximo: 100 páginas*



Dr. Adolfo Pillihu man Zambrano  
Coordinador de Especialidad  
Sección Ingeniería de Minas



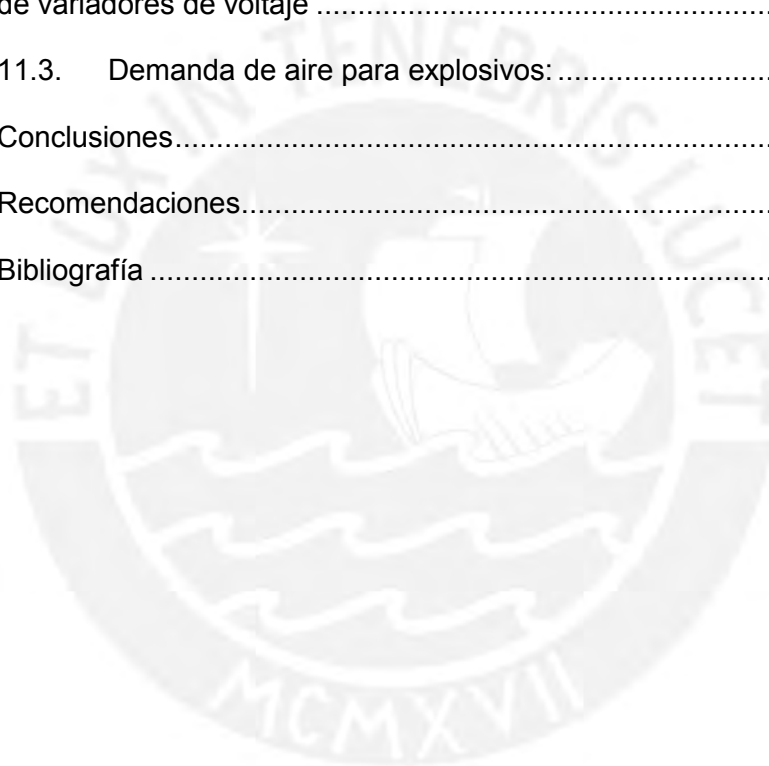
Ing. Christian Reynaldo Espinoza Romero  
Asesor



## Índice

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Introducción.....   | 1  |
| 2.   | Objetivos .....   | 2  |
| 3.   | Marco Teórico .....   | 3  |
| 3.1. | Ecuaciones de flujo de aire usadas en el análisis de circuito ..... | 3  |
| 3.2. | Leyes de Kirchhoff para análisis de circuitos de aire .....         | 4  |
| 3.3. | Método de Hardy Cross para análisis de redes.....                   | 6  |
| 4.   | Generalidades sobre la unidad minera .....                          | 9  |
| 4.1. | Geología .....  | 9  |
| 4.2. | Operaciones mineras .....   | 9  |
| 5.   | Equipos y metodología de medición .....                             | 13 |
| 5.1. | Equipos/ Herramientas/ Materiales.....                              | 13 |
| 5.2. | Procedimiento experimental para medición de puntos en exterior mina | 13 |
| 5.3. | Procedimiento experimental para medición de puntos en interior mina | 15 |
| 6.   | Metodología de optimización .....                                   | 18 |
| 7.   | Descripción del sistema de ventilación actual.....                  | 19 |
| 7.1. | Sistema de ventilación principal .....                              | 19 |
| 7.2. | Sistema de ventilación secundario .....                             | 19 |
| 7.3. | Toma de datos en mina .....   | 19 |
| 7.4. | Puntos de monitoreo .....   | 20 |
| 8.   | Análisis de demanda de aire actual .....                            | 21 |
| 8.1. | Demanda de aire para personas .....                                 | 21 |
| 8.2. | Demanda de aire para maquinaria .....                               | 22 |
| 8.3. | Demanda de aire total.....  | 23 |
| 8.4. | Cálculo de cobertura de aire .....                                  | 23 |
| 9.   | Análisis de calidad de aire .....                                   | 24 |
| 10.  | Construcción de modelo de ventilación 3D.....                       | 25 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 10.1. | Información requerida .....  | 26 |
| 10.2. | Construcción de vías y componentes principales .....   | 26 |
| 10.3. | Ventiladores .....   | 27 |
| 10.4. | Primera corrida y calibración .....  | 28 |
| 10.5. | Análisis de situación actual .....   | 30 |
| 11.   | Propuestas de mejora .....   | 39 |
| 11.1. | Optimización 1: Construcción de ductos de ventilación .....                                    | 39 |
| 11.2. | Optimización 2: Re-análisis de demanda de aire e implementación de variadores de voltaje ..... | 44 |
| 11.3. | Demanda de aire para explosivos: .....   | 44 |
| 12.   | Conclusiones.....  | 64 |
| 13.   | Recomendaciones.....   | 66 |
| 14.   | Bibliografía .....   | 67 |





## Índice de Tablas:

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1 - Ejemplo de datos tomados en campo .....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Tabla 2 - Puntos de Monitoreo de ingreso de aire .....</i>                                    | <i>20</i> |
| <i>Tabla 3 - Puntos de Monitoreo de salida de aire.....</i>                                      | <i>21</i> |
| <i>Tabla 4 - Requerimientos de aire. Fuente: (MEM, 2016).....</i>                                | <i>21</i> |
| <i>Tabla 5 – Cantidad de Equipos Diésel.....</i>   | <i>22</i> |
| <i>Tabla 6 - Caudal de ingreso de aire de la mina .....</i>                                      | <i>23</i> |
| <i>Tabla 7 - Caudal de salida de aire de la mina.....</i>  | <i>24</i> |
| <i>Tabla 8 – Cobertura de Aire Actual de la Mina .....</i>                                       | <i>24</i> |
| <i>Tabla 9 – Límites máximos permisibles para agentes químicos en aire (fuente: MEM) .....</i>   | <i>24</i> |
| <i>Tabla 10 – Análisis de calidad de aire según nivel de profundización.....</i>                 | <i>25</i> |
| <i>Tabla 11 – Lista de Ventiladores Disponibles .....</i>  | <i>28</i> |
| <i>Tabla 12 - Cuadro de calibración del modelo en VentSim .....</i>                              | <i>29</i> |
| <i>Tabla 13 – Comparación de Escenarios – Optimización 1.....</i>                                | <i>41</i> |
| <i>Tabla 14 – Comparación de Eficiencia de la Red de Ventilación .....</i>                       | <i>43</i> |
| <i>Tabla 15 – Nueva concentración de gases según niveles de profundización .....</i>             | <i>43</i> |
| <i>Tabla 16 – Explosivos utilizados en frente de Voladura .....</i>                              | <i>44</i> |
| <i>Tabla 17 – Cantidad de Equipos Diésel.....</i>  | <i>45</i> |
| <i>Tabla 18 – Metros Cúbicos de aire requeridos según horario de trabajo 00:00 – 11:00.....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Tabla 19 - Metros Cúbicos de aire requeridos según horario de trabajo 12:00 – 23:00 .....</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabla 20 – Cálculo de Costo Total Diario Equivalente .....</i>                                | <i>63</i> |
| <i>Tabla 21 – Comparación de Resultados tras Aplicación de Fase 3.....</i>                       | <i>63</i> |

## Índice de figuras:

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 1 – Representación gráfica de ley de flujo de aire.....</i>                                    | <i>3</i>  |
| <i>Figura 2 - Vista Isométrica Método Corte y Relleno Descendente .....</i>                              | <i>10</i> |
| <i>Figura 3 - Método de Explotación Corte y Relleno Ascendente.....</i>                                  | <i>11</i> |
| <i>Figura 4 - Método de Explotación Taladros Largos .....</i>  | <i>11</i> |
| <i>Figura 5 - Jumbo Boomer 281 .....</i>   | <i>12</i> |
| <i>Figura 6 - Secuencia de Barrido en Ductos de Ventilación .....</i>                                    | <i>14</i> |
| <i>Figura 7 - Forma de medición en Raise Borer.....</i>  | <i>14</i> |
| <i>Figura 8 - Secuencia de barrido en galerías / cruceros.....</i>                                       | <i>15</i> |
| <i>Figura 9 - Medición de temperaturas vía psicrómetro .....</i>   | <i>16</i> |
| <i>Figura 10 - Tubo de Humo MSA.....</i>   | <i>17</i> |
| <i>Figura 11 - Esquema de Optimización para red de Ventilación.....</i>                                  | <i>18</i> |
| <i>Figura 12 - Distribución de Galerías en Subniveles (AutoCAD).....</i>                                 | <i>26</i> |
| <i>Figura 13 - Modelo Primario de ventilación de mina subterránea.....</i>                               | <i>27</i> |
| <i>Figura 14 - Digitalizador de Ventilador – VentSim Visual.....</i>                                     | <i>27</i> |
| <i>Figura 15 - Resultados obtenidos en la simulación inicial .....</i>                                   | <i>30</i> |
| <i>Figura 16 - Diagrama Unifilar de Ventilación (AutoCAD).....</i>                                       | <i>31</i> |
| <i>Figura 17 - Parámetros Operativos del Ventilador VAV-60-26.5-1750-II-A.....</i>                       | <i>32</i> |
| <i>Figura 18 - Propiedades Operativas de los ventiladores Alphair – 300,000 CFM.....</i>                 | <i>33</i> |
| <i>Figura 19 - Propiedades Operativas de los ventiladores VAV-60-26.5-1750-II-A .....</i>                | <i>35</i> |
| <i>Figura 20 – Escenario inicial.....</i>  | <i>39</i> |
| <i>Figura 21 - Curva Característica del Ventilador principal de 300,000 CFM al inicio.....</i>           | <i>39</i> |
| <i>Figura 22 – Escenario final .....</i>   | <i>40</i> |
| <i>Figura 23 - Curva Característica del Ventilador principal de 300,000 CFM al final .....</i>           | <i>40</i> |
| <i>Figura 24 - Zona de Profundización (Nivel 1000 al Nivel 1250) y Plan Anual de minado (LOM) 2017 .</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 25 - Optimización de Diámetros de RB-641.....</i>  | <i>42</i> |
| <i>Figura 26 - Optimización de Diámetros de RB 791.....</i>  | <i>42</i> |
| <i>Figura 27 – Comparación de demanda de aire estimada vs real operativa.....</i>                        | <i>49</i> |
| <i>Figura 28 – Comparación volumétrica de caudal diario suministrado .....</i>                           | <i>50</i> |
| <i>Figura 29 - Picos inferiores de demanda de aire dentro de la jornada de trabajo diaria .....</i>      | <i>51</i> |
| <i>Figura 30 - Demanda de Caudal según jornada de trabajo 1/2 .....</i>                                  | <i>52</i> |
| <i>Figura 31 - Demanda de Caudal según jornada de trabajo 2/2 .....</i>                                  | <i>54</i> |
| <i>Figura 32 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 1 .....</i>                                      | <i>55</i> |
| <i>Figura 33 - Resultado preliminar de costos anuales – Escenario 1 .....</i>                            | <i>56</i> |
| <i>Figura 34 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 2 .....</i>                                      | <i>57</i> |
| <i>Figura 35 - Resultado Preliminar de Costos Anuales – Escenario 2.....</i>                             | <i>58</i> |
| <i>Figura 36 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 3 .....</i>                                      | <i>59</i> |
| <i>Figura 37 - Resultado Preliminar de Costos Anuales – Escenario 3.....</i>                             | <i>60</i> |

*Figura 38 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 4* ..... 61  
*Figura 39 - Resultado Preliminar de Costos Anuales – Escenario 4*..... 62



## 1. Introducción

Cuando se habla de Consumo Energético en minería se suele pensar automáticamente en chancado y molienda de mineral ya que son procesos que suelen concentrar más del 50% del consumo energético total de cualquier tipo de mina (subterránea o a cielo abierto).(Botín & Vergara, 2015) Sin embargo, la ventilación suele ser el segundo gran responsable ya que representa aproximadamente el 50% del costo operativo de operación mina y entre el 25 – 40 % del total de la mina (De Souza, 2007). Los sistemas de ventilación típicos son representados por redes complejas de cientos de vías con múltiples ramificaciones y componentes, ya sean ventiladores, compuertas, aforadores, entre otros (Wallace, Prosser, & Stinnette, 2015). Es por esta complejidad que el estudio y optimización solo puede ser llevada a cabo eficientemente mediante el uso de Software y modelos computacionales 3D.(Feng, Zhu, & Lv, 2011)

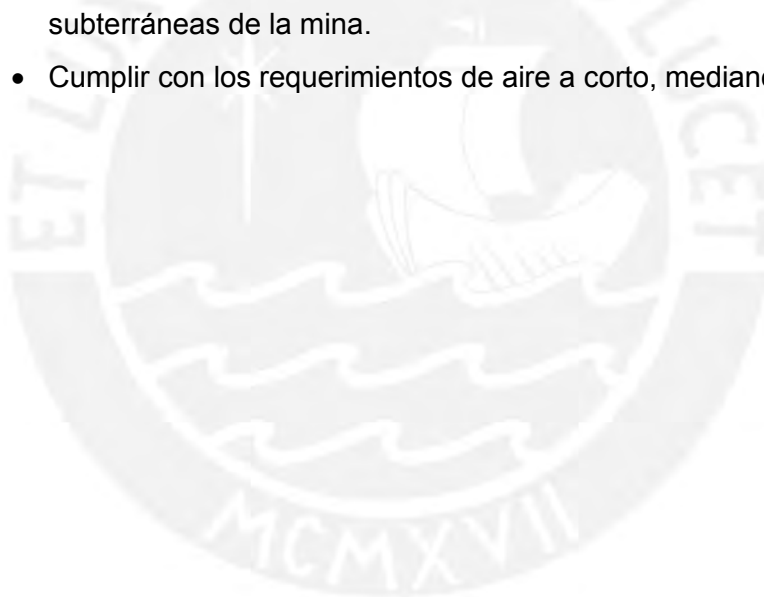
Los modelos matemáticos y técnicas utilizadas por los softwares de ventilación están basadas básicamente en la aplicación directa de la técnica de iteraciones de Hardy Cross. Este método permite que el análisis de la red parta de una estimación inicial de caudales a través de todas las redes asociadas al sistema y que estas sean corregidas según factores asociados a las características propias de cada sección. Estas iteraciones serán realizadas hasta lograr un grado aceptable de precisión y con un factor de error menor al 1% del total del caudal.

El presente estudio muestra la problemática real de una Unidad Minera subterránea, la cual ha reportado los siguientes problemas dentro del área de Operación Mina, Planeamiento y Ventilación: i) El sistema de ventilación no ha sido actualizado según el avance del último año, lo cual ha generado que aún se consideren áreas clausuradas dentro del modelo de ventilación; ii) La explotación de los niveles 1100 en adelante se ha visto comprometida debido al contacto con un cuerpo de agua termal, el cual ha incrementado la temperatura promedio a más de 37° C y humedad relativa del aire hasta valores mayores a 90% en la mayoría de las zonas; iii) El pique aún no ha sido habilitado debido a que su construcción se encuentra al 90% ; iv) La calidad del aire en la profundización no cumple con los estándares propuestos por la normativa nacional dentro del DS 024-2016-MEM (MEM, 2016)

## 2. Objetivos

Los objetivos de esta tesis serán:

- Construir un sistema de Ventilación Virtual que simule el sistema de ventilación principal de la mina.
- Proponer mejoras técnicas según nuevas condiciones operativas (dígase construcción de infraestructura dedicada y/o modificación de diseño de estructuras existentes), criterios de planeamiento (nuevas rutas de acarreo y/o circulación de personal y equipos de minado) e implementación de equipos de control (variadores de voltaje, compuertas, tapones) que permitan tener control del costo total del área de Ventilación, ya sea por reducción de OPEX y ahorro en CAPEX.
- Asegurar un flujo de aire capaz de cumplir los requisitos de calidad de aire para el personal y maquinaria dentro de todas las operaciones subterráneas de la mina.
- Cumplir con los requerimientos de aire a corto, mediano y largo plazo.



### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Ecuaciones de flujo de aire usadas en el análisis de circuito

Cuando se considera el caso de un volumen de aire  $Q$  ( $m^3/s$ ) pasando a través de un conducto de resistencia  $R$  ( $N \cdot s^2/m^8$ ) el aire sigue la siguiente ley:

$$P = R * Q^n \quad (1)$$

Donde  $P$  es la Caída de presión en el conducto ( $Pa$ ) y  $n$  es una constante según el rango tipos de flujo considerados (De Souza, 2007; Hartman, Mutmansky, Ramani, & Wang, 1997). En ventilación subterránea, la constante  $n$  suele oscilar entre 1,8 y 2,2 para flujos turbulentos y de 1,0 para flujos laminares. Sin embargo, el valor  $n = 2$  suele ser el más recurrente para planificación y estimaciones debido a su nivel de precisión y confiabilidad, por lo que la ecuación queda expresada como:

$$P = R * Q^2 \quad (2)$$

La Figura 1 representa el comportamiento de la ecuación 2, en la cual se puede evidenciar la variación de presión según la variación de caudal.

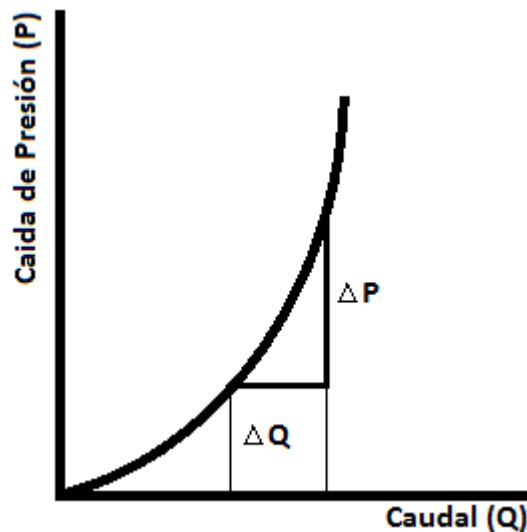


Figura 1 – Representación gráfica de ley de flujo de aire (Fuente: elaboración propia)

Las pérdidas de presión por fricción son causadas por la resistencia generada por las paredes del conducto. Es por esto que la constante de proporcionalidad depende de la geometría y rugosidad de cada superficie

inherente al ducto. La ecuación de Atkinson es aplicada para determinar la caída de presión.

$$P = \frac{kCLV^2}{A} \quad (3)$$

Donde P es la Caída de presión en el conducto (Pa); k es el factor empírico de fricción ( $N \cdot s^2/m^4$ ); C es el perímetro del conducto (m); L es la longitud del conducto (m); V es el flujo de aire (m/s) y A es el área de la sección del ducto ( $m^2$ ).

### 3.2. Leyes de Kirchhoff para análisis de circuitos de aire

Las leyes de Kirchhoff son utilizadas durante el análisis del funcionamiento de las redes de ventilación (Hartman et al., 1997). La primera ley establece que la suma algebraica de todos los flujos de masa en cualquier nodo o unión es cero

$$\sum_{i=1}^b M_i = 0 \quad (4)$$

Donde  $M_i = w_i Q_i$  (kg/s) e i representa un ramal particular del nodo o unión y b es el número total de ramales conectados al nodo. Por otro lado, si los ramales han sido estandarizados y corregidos por densidades estándares se obtiene la siguiente ecuación.

$$\sum_{i=1}^b Q_i = 0 \quad (5)$$

Es así que la primera ley de Kirchhoff establece que la suma de todos los caudales ingresantes es igual a la suma de los caudales de salida para cualquier punto en particular.

La segunda ley de Kirchhoff establece que la suma algebraica de todas las energías resultantes en un punto debe ser igual a cero para un sistema cerrado. En orden de simplificar esta afirmación y desarrollar una ecuación simplificada se considera un solo ramal "i". La siguiente ecuación expresa la energía contenida en dicho ramal.

$$\Delta \frac{u_i^2}{2} + \Delta z_i \cdot g + W_{fi} = \int_i V dP + F_i \quad (6)$$

Donde  $\Delta(u_i^2/2)$  es el cambio de energía cinética dentro del ramal ( $Nm/kg$ );  $\Delta z_i$  es el cambio de elevación del ramal ( $m$ );  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ );  $W_{fi}$  es el trabajo ingresado por el ventilador al ramal ( $Nm/kg$ );  $\int_i VdP$  es el trabajo aportado por el flujo a través del ramal ( $Nm/kg$ ); y  $F_i$  es la energía mecánica transformada a calor por la turbulencia dentro del ramal ( $Nm/kg$ ).

Para un número “m” de ramales dentro de una red cerrada tenemos:

$$\sum_{i=1}^m \Delta z_i g = 0 \quad (7)$$

Y  $\sum_{i=1}^m \int_i VdP$  es la energía aportada por la ventilación Natural del sistema (*Natural Ventilating Energy*),  $(NVE)_m^*$ .

La suma de los términos de la ecuación 6 dentro de una red cerrada resulta en:

$$\sum_{i=1}^m \left[ F_i - W_{fi} - \Delta \frac{u_i^2}{2} \right] - (NVE)_m = 0 \quad (8)$$

Los cambios en energía cinética son normalmente insignificantes comparados con los otros elementos dentro de la ecuación, por lo cual pueden ser despreciados. Por otro lado, cada termino mencionado en la ecuación 8 puede ser expresado como una diferencia de presión (en vez de una variación de energía) al ser multiplicado por un valor de densidad estándar ( $w_{st} = 1,2 \text{ kg}/m^3$ ).

$$\sum_{i=1}^m [w_{st} F_i - w_{st} W_{fi}] - w_{st} (NVE)_m = 0 \quad (9)$$

Estos tres términos pueden ser expresados usando la siguiente terminología:

$$w_{st} F_i = H_i \text{ Caida de Presión por fricción (Pa)}$$

$$w_{st} W_{fi} = H_{fi} \text{ Presión Total aportada por el Ventilador (Pa)}$$

$$w_{st} (NVE)_m = (NVP)_m \text{ Presión por Ventilación Natural (Natural Ventilation Pressure) (Pa)}$$

Finalmente, la segunda ley de Kirchhoff queda expresada de la siguiente manera:



$$\sum_{i=1}^m [H_i - H_{fi}] - (NVP)_m = 0 \quad (10)$$

De modo tal que la suma de todas las pérdidas de presión por fricción dentro de un ramal cerrado, menos la presión aportada por un ventilador y ventilación natural, debe ser igual a cero.

Cuando se aplica esta ley, se debe considerar el significado del símbolo negativo de los términos  $H_{fi}$  y  $(NVP)_m$  ya que, si la presión aportada por el ventilador o la ventilación natural incrementa el flujo, deberán ser consideradas como fuentes de caídas de presión. Por esto es menester mencionar las siguientes convenciones:

- La caída de presión por fricción en un ramal,  $H_i$  es positiva si es que el flujo va en sentido horario (izquierda a derecha en caso longitudinal) y viceversa.
- La presión aportada por el ventilador  $H_{fi}$  dentro de una red es positiva si el flujo viaja en sentido horario (izquierda a derecha en caso longitudinal) y viceversa.

Si la suma de presiones resultante (por la segunda ley) es positiva, un ventilador es necesario, de lo contrario, se necesita un aforador o un regulador de flujo.

Cabe mencionar que la segunda ley expresada de la forma de la ecuación 10 solo es válida si se maneja una densidad estandarizada.

### 3.3. Método de Hardy Cross para análisis de redes.

En orden de determinar el valor real del flujo de aire  $Q$  se asume un valor  $Q_a$ , de modo tal que:

$$Q = Q_a + \Delta Q \quad (11)$$

Donde  $\Delta Q$  es el error involucrado en la primera asunción de flujo de aire. Del mismo modo,  $\Delta P$  corresponde al error de la caída de presión  $P$ , lo cual queda expresado en la Figura 1. Después se procede a determinar la corrección  $\Delta Q$  para aplicarse a  $Q_a$  gracias a la curva mostrada en la Figura 1, en la cual se muestra que existe relación lineal entre la variación de  $P$  y  $Q$ , de modo tal que  $\Delta P/\Delta Q$  o en el limite  $dP/dQ$ , lo cual puede ser comparado con lo enunciado por la ecuación 1 de la siguiente forma:

$$\frac{dP}{dQ} = nRQ^{n-1} \quad (12)$$

O  $nRQ_a^{n-1}$  al asumir la cantidad  $Q_a$ , de modo tal que:

$$\frac{\Delta P}{\Delta Q} = nRQ_a^{n-1} \quad (13)$$

O,

$$\Delta Q = \frac{\Delta P}{nRQ_a^{n-1}} \quad (14)$$

Y substituyendo

$$\Delta P = RQ^{n-Rqan} \quad (15)$$

$$\Delta Q = \frac{RQ^n - RQ_a^n}{nRQ_a^{n-1}} \quad (16)$$

La ecuación 16 representa la variación de las caídas de presión y el denominador es la pendiente de la curva PQ. Sin embargo, esta ecuación y sus predecesoras solo reflejan el caso de un solo conducto, por lo que el siguiente paso es considerar “b” ramales dentro de una misma red con el fin de dar validez y semejanza a condiciones reales.

$$\Delta P = \frac{\sum_{i=1}^b R_i Q_i^n - R_i Q_{ia}^n}{b} \quad (17)$$

Por lo que la inclinación de la curva HQ puede también ser escrito de esta forma:

$$\frac{\sum_{i=1}^b nR_i Q_{ia}^{n-1}}{b} \quad (18)$$

Cuando estas dos expresiones son combinadas en la forma de la ecuación 16 se obtiene un valor de corrección de flujo  $\Delta Q_m$ :

$$\Delta Q_m = \frac{\sum_{i=1}^b (R_i Q_i^n - R_i Q_{ia}^n)}{\sum_{i=1}^b nR_i Q_{ia}^{n-1}} \quad (19)$$

La pérdida de presión por fricción dentro del ramal “i” es,

$$P_i = R_i Q_i^n \quad (20)$$

En la cantidad actual  $Q_i$ .

Cuando se suman las pérdidas de presión en el numerador,  $R_i Q_i^n$ , el signo no debe ser pasado por alto sin tener en cuenta que la presión concerniente a la fricción es siempre positiva en la dirección del flujo (cuando no hay ventiladores presentes). La inclinación de la curva PQ, representada por el

denominador  $n_i R_i Q_{ia}^{n_i-1}$  es siempre positiva. Es conveniente saber que siempre que se formen nuevas redes se debe asumir cierta convención sobre el sentido del flujo de aire. Se suele tomar el valor positivo si es que sigue el sentido horario.

Las presiones aportadas por ventiladores (mecánica) y la ventilación natural son incluidas en el análisis cuando se usa la forma completa de la segunda ley de Kirchhoff en el numerador de la ecuación 20 y la pendiente del ventilador en el denominador,

$$\Delta Q_m = \frac{\sum_{i=1}^b (R_i Q_{ia}^{n_i} - P_{fi}) - (NVP)_m}{\sum_{i=1}^b (n_i R_i Q_{ia}^{n_i-1} - S_{fi})} \quad (21)$$

Donde  $P_{fi}$  y  $S_{fi}$  son la presión y la pendiente del ventilador localizado en el ramal "i" en un caudal asumido  $Q_{ia}$ .

Es bueno acotar que debido a las aproximaciones hechas en la derivación de la ecuación 21, el uso del factor de corrección  $\Delta Q_m$  en la red no tendrá un resultado inmediato en el balance de la distribución de caudales. Esta técnica deberá ser aplicada múltiples veces con el fin de reducir el factor hasta hacerlo cercano a cero. Es por esta razón que el uso de computadoras es esencial para poder realizar miles de iteraciones hasta conseguir un valor certero. (Hongqing, Zeyang, Meiqun, Zheng, & Jian, 2011)

La fórmula de Hardy Cross mostrada en la ecuación 21 es la forma más general y válida para ramales con diferentes valores de n, sin embargo, como se mencionó con anterioridad, el valor  $n = 2$  (flujos turbulentos) es ampliamente usado debido a su nivel de precisión. Por lo que la ecuación queda expresada de la siguiente manera,

$$\Delta Q_m = \frac{\sum_{i=1}^b (R_i Q_{ia} |Q_{ia}| - P_{fi}) - (NVP)_m}{\sum_{i=1}^b (2R_i |Q_{ia}| - S_{fi})} \quad (22)$$

Donde  $|Q_{ia}|$  es el valor absoluto de  $Q_{ia}$ .

Cuando la ecuación 22 es utilizada como herramienta de corrección en cada ramal debe considerarse cierta convención de signos para el flujo del caudal de aire. Se sugiere elegir una dirección en sentido horario como convención para valores positivos de flujo de aire y presiones aportadas por el ventilador  $P_{fi}$  y ventilación natural  $(NVP)_m$ .

#### **4. Generalidades sobre la unidad minera**

La unidad minera es una operación polimetálica ubicada a más de 4500 msnm dentro del departamento de Yauli - Perú, la cual es explotada por minería subterránea bajo el método de corte y relleno descendente. La mina está mecanizada en su totalidad y se encuentra procesando 3000 ton con productos concentrados de Plomo y Zinc.

La mina cuenta con más de 15 años de explotación continua, hecho que se ve reflejado en los kilómetros de galerías, rampas y chimeneas construidas hasta la fecha. Del mismo modo, al haber superado los 500 metros de profundización, se ha construido un pique de extracción con el fin de agilizar el ciclo de acarreo del mineral extraído de los tajos más profundos.

##### **4.1. Geología**

El depósito mineral se localiza en una formación Anticlinal, cuyo eje se alinea en dirección N45°W. Esta formación muestra cuerpos intrusivos de composición ácida, intermedia y básica, los cuales han cortado y/o son paralelos a la secuencia estratigráfica del Anticlinal.

La mineralización de la veta está relacionada por la mineralización polimetálica Terciaria y al evento tectónico Post-Cretácico. Presenta textura de relleno: crustificación y brechamiento. En la textura de crustificación de las leyes altas se hallan en una asociación de pirita-arsenopirita-rodocrosita-plomo-zinc-plata. En la textura brechada, la asociación es cuarzo-pirita-arsenopirita-galena-esfalerita.

Hay casos en que las leyes de Plata se encuentran en las bandas de panizos con una asociación difícil de precisar, pero las leyes de plomo y zinc son bajas. Localmente se ha podido observar reemplazamiento en las cajas. Es un depósito hidrotermal de alcance hipo a epitermal. La potencia de la veta varía de 7,5 a 7,8 metros en sus extremos, llegando hasta 18 metros en su parte central.

##### **4.2. Operaciones mineras**

La mina del centro cuenta con cuatro vetas principales de explotación, en las cuales se aplica los métodos de minado de taladros largos, corte y relleno ascendente y descendente, siendo el último el método de extracción en la veta principal.

#### 4.2.1. Corte y relleno descendente

Este método se caracteriza por su explotación vertical ordenada, la cual parte desde el nivel superior del cuerpo mineralizado y profundiza a fin de crear diferentes horizontes o pisos del mineral (Hustrulid & Bullock, 2001). Después que un corte o piso ha sido completamente extraído se procede a soportar y rellenar el nivel con estructuras metálicas y material detrítico mezclado con cemento respectivamente. Estas medidas permitirán asegurar la estabilidad del nivel relleno, la cual es importante debido a que dicho nivel se convierte en el techo del siguiente nivel a extraer y la secuencia seguirá hasta terminar el bloque de mineral de interés (véase Figura 2).

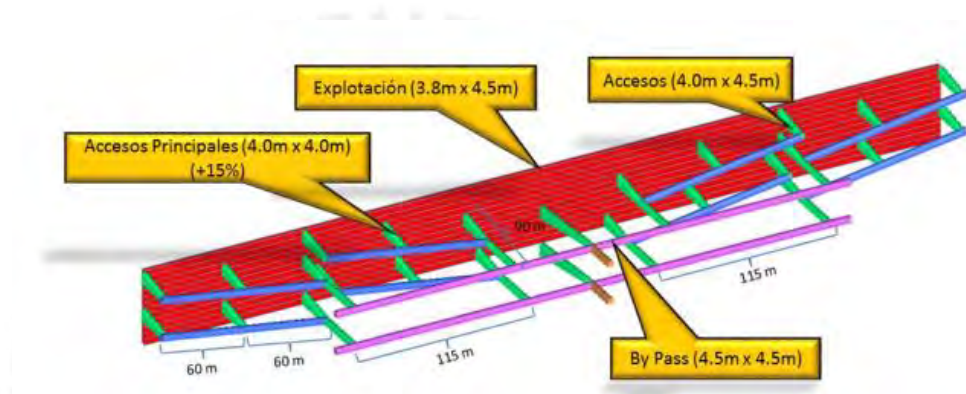


Figura 2 - Vista Isométrica Método Corte y Relleno Descendente (Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.2.2. Corte y relleno ascendente

En este método el minado se realiza vía cortes horizontales con la variante en "Breasting". El avance se realiza en forma ascendente siguiendo la mineralización del cuerpo o bloque delimitado (véase Figura 3). Finalmente, el sostenimiento es realizado con shotcrete y empernado (Hustrulid & Bullock, 2001). Es menester mencionar que se perfora en horizontal teniendo como piso el relleno del nivel inferior, el cual está compuesto por material estéril, relleno hidráulico o una combinación de ambos, proporcionando así una plataforma para el siguiente corte. Los accesos hacia la veta se realizan en negativo para poder realizar el batido de tres cortes.

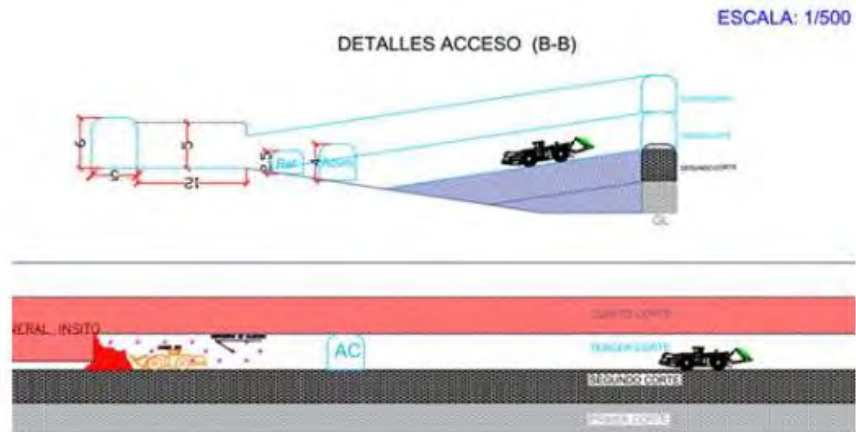


Figura 3 - Método de Explotación Corte y Relleno Ascendente (Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.2.3. Taladros largos

El método de taladros largos se caracteriza por su gran productividad debido a que las labores de preparación se encuentran situadas en gran porcentaje dentro del mineral a extraer. El minado se ejecuta desde el nivel principal hacia los subniveles superiores con el fin de programar los intervalos verticales (Hustrulid & Bullock, 2001). El mineral extraído con taladros largos cae del subnivel superior hacia la zona vacía en el subnivel inferior para luego ser transportados hacia los echaderos (véase Figura 4).

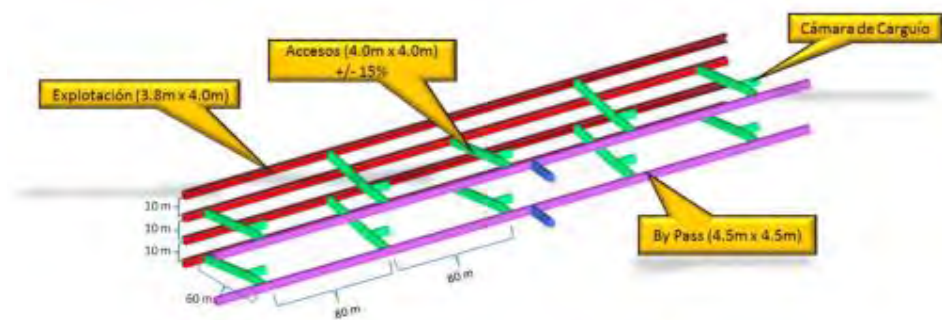


Figura 4 - Método de Explotación Taladros Largos (Fuente: elaboración propia)

#### 4.2.4. Ciclo de minado

El ciclo de minado de la mina se describe brevemente a continuación:

- Perforación: La perforación se realiza con jumbo hidráulico modelo Boomer 281 de un solo brazo (véase Figura 5), el cual puede realizar corte Horizontal como frente. La sección de tajeo es de 4x4 y se perforan 45 taladros durante el ciclo de perforación.

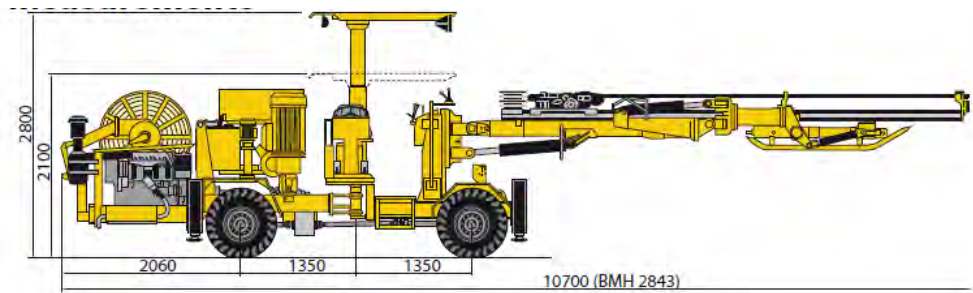


Figura 5 - Jumbo Boomer 281 – Fuente [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)

- Desate de rocas: Después de la voladura y una vez disipados los gases, se regará la carga mineralizada para realizar un desate manual o mecanizado como prevención de posibles caídas de roca de los hastiales. Luego se realizará la limpieza del mineral y se realizarán más desates manuales o se requerirá del Scaler para un desate más exhaustivo de ser necesario.
- Limpieza: Se realiza generalmente con Scoop de 6 yd<sup>3</sup>, los cuales deben recorrer como máximo en promedio 150 metros.
- Sostenimiento: Se utilizará shotcrete de 2" de espesor y luego pernos hidrabol sistemáticos 1,5 m por 1,5 m cada 6 m según lo estimado por el área de Geomecánica.
- Relleno: Se utiliza relleno cementado alimentado desde la planta en superficie. El transporte del material se realiza por tuberías metálicas de 10 pies. Una vez concluido el relleno se espera un aproximado de 7 días de secado antes de iniciar con el corte inferior.

## 5. Equipos y metodología de medición

En el siguiente capítulo se listan y describen los equipos utilizados para la medición de variables atmosféricas del tipo velocidad del aire, temperatura y calidad de aire, al igual que se describen las metodologías utilizadas para la toma de datos tanto para exterior e interior mina.

### 5.1. Equipos/ Herramientas/ Materiales

- 01 anemómetro marca Kestrel 4300: equipo multiparámetro capaz de registrar velocidad de flujo de aire (mayores a 1m/s), temperatura promedio, presión barométrica y humedad relativa.
- 01 cinta métrica: utilizado para trazo de distancias dentro de los puntos de muestreo
- 01 tubo de humo marca MSA: equipo manual utilizado para medición de velocidades de flujo de aire menores a 1m/s
- 01 psicrómetro marca británica: equipo utilizado para medir la humedad relativa de un área específica
- 01 cronómetro: utilizado para la toma de tiempos exactos de medición:
- 01 cámara fotográfica: para captura fotográfica de puntos de monitoreo
- 01 GPS: para geo-referencias los puntos medidos dentro de las labores y ayudar a la construcción del modelo computacional.
- 02 barretillas de madera: utilizadas para abarcar mayor área de medición con el anemómetro.
- 01 detector de gas MX6 iBrid: equipo multiparámetro que permite registrar la concentración de distintos tipos de gases comunes (H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO/H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, CO alto, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NO, CO/H<sub>2</sub> baja interferencia, CO<sub>2</sub> infrarrojo entre otros).

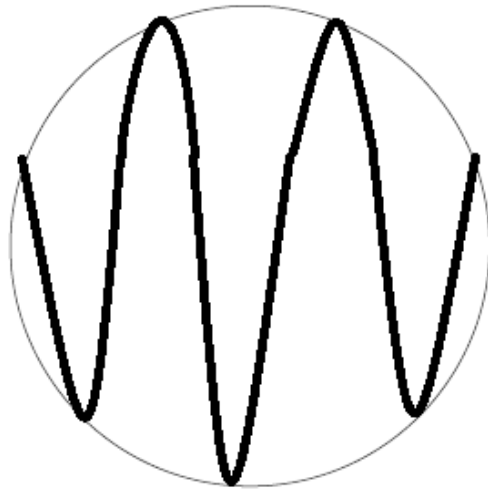
### 5.2. Procedimiento experimental para medición de puntos en exterior mina

La medición de puntos en exterior mina corresponde a las salidas y entradas de aire del sistema, ya sean por chimeneas o raise bored "RB", al igual que bocaminas. Los pasos a seguir son los siguientes

- Verificar el estado de los equipos: anemómetro, GPS y detector de gas
- Elegir los puntos de monitoreo en exterior mina: se identifican los puntos de salida y entrada de aire.
- Anotar la hora y fecha de la medición en cada punto medido.



- Identificar las coordenadas UTM del punto en el GPS y anotar debidamente.
- Realizar las mediciones en los ductos (raise borer o Chimeneas) haciendo un barrido superficial del área del ducto (véase Figura 6 y Figura 7)
- Registrar la velocidad del aire, humedad relativa y presión barométrica obtenida por el anemómetro al igual que la calidad del aire utilizando el detector de gases.



*Figura 6 - Secuencia de Barrido en Ductos de Ventilación (Fuente: Elaboración Propia)*



*Figura 7 - Forma de medición en Raise Borer (Fuente: Elaboración Propia)*

### 5.3. Procedimiento experimental para medición de puntos en interior mina

La medición de puntos en interior mina corresponde a las uniones de nodos, galerías, cruceros, tajos, rampas, chimeneas internas "RB" entre otros. Este procedimiento se divide en dos actividades según la velocidad del flujo de aire que atraviesa las secciones a analizar.

#### 5.3.1. Procedimiento experimental para galería y cruceros, que registran velocidades mayores a 1 m/s.

- Verificar el estado de los equipos: Anemómetro y GPS.
- Elegir los puntos de monitoreo en interior mina nivel a nivel: se tomó la medición en rampas, cámaras de raise borer y ramales principales unidos por nodos.
- Anotar la hora, fecha de la medición y las coordenadas UTM del punto en el GPS.
- Medir la altura y ancho de la sección de la galería/ cruceros.
- Registrar la velocidad del aire, humedad relativa y presión barométrica, que mide el anemómetro y el psicrómetro haciendo un barrido superficial del área del ducto (véase Figura 8 y Figura 9) al igual que la calidad del aire utilizando el detector de gases.

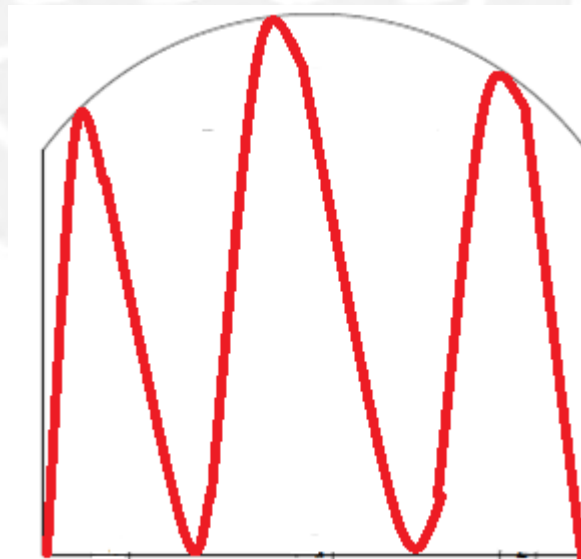


Figura 8 - Secuencia de barrido en galerías / cruceros (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 9 - Medición de temperaturas vía psicrómetro (Fuente: Elaboración propia)

5.3.2. Procedimiento experimental para sectores que registran velocidades menores a 1 m/s

- Verificar el estado de los equipos: anemómetro y GPS.
- Elegir los puntos de monitoreo en interior mina nivel a nivel: se tomó la medición en rampas, cámaras de raise borer y ramales principales unidos por nodos.
- Una vez identificados los puntos interiores, identificar los puntos de salida y entrada de aire.
- Anotar la hora y fecha de la medición.
- Identificar las coordenadas UTM del punto en el GPS
- Medir la altura y ancho de las secciones de los tajos.
- Medir la temperatura del bulbo seco y húmedo con el psicrómetro al igual que la calidad del aire utilizando el detector de gases.
- Trazar distancia de medición (1 metro) con la cinta métrica.
- Utilizar el tubo de humo y tomar el tiempo de recorrido del humo en la distancia delimitada (véase Figura 10)



Figura 10 - Tubo de Humo MSA (Fuente: elaboración propia)



## 6. Metodología de optimización

La optimización del sistema de ventilación se realizará según el análisis primario de la red de ventilación, identificando así las deficiencias y/o oportunidades de mejora disponibles. Luego se propondrá distintos escenarios de mejora según nuevos diseños de ingeniería (cambio en parámetros operativos de ventiladores, redirección de flujo, cierre de labores inoperativas, entre otros) (para mayor detalle del procedimiento véase la Figura 11) (Chen et al., 2015; De Souza, 2007; Ni, Liu, & Gai, 2011; Yun & Hai-ning, 2011)

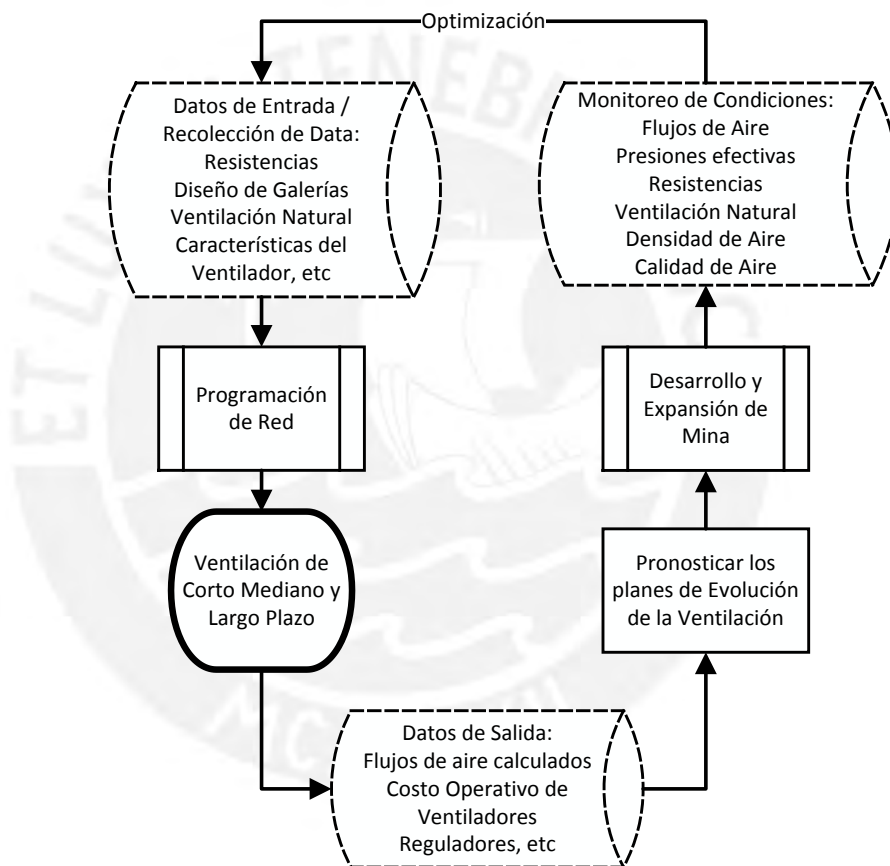


Figura 11 - Esquema de Optimización para red de Ventilación (Fuente: Elaboración Propia)

## 7. Descripción del sistema de ventilación actual

### 7.1. Sistema de ventilación principal

La Unidad Minera cuenta con un modelo de ventilación por extracción, el cual funciona gracias a dos ventiladores principales paralelos de 300 000 CFM (*cubic feet meter*), ubicados en el nivel NV-500 dentro de un cámara de extracción que está conectada a una chimenea RB (*Raise Bored*) de doce pies de diámetro. Adicionalmente se cuenta con tres chimeneas RB de extracción de apoyo, las cuales son:

- RB-1234 de 7 pies de diámetro que inicia en superficie hasta el NV-900.
- RB-1450 de 8 pies de diámetro que inicia en el NV-470 Recuay hasta el NV-800, en la cabeza de estos RB se ubica un ventilador de 110 000 CFM respectivamente
- RB-1060 de 7 pies de diámetro que inicia en superficie hasta el NV-950, en cuya cabeza hay un ventilador de 100 000 CFM.

Para el caso de profundizaciones se cuenta con Chimeneas de diámetro de siete y doce pies con equipo RB para circuito principal y secundario respectivamente.

### 7.2. Sistema de ventilación secundario

Para la ventilación auxiliar y secundaria se cuenta con ventiladores de 20 000, 30 000 y 60 000 CFM, los cuales operan en labores de preparación, desarrollo y exploración. Estos ventiladores son de alta presión y trabajan con mangas de 18, 24, 30 y 36 pulgadas de diámetro, las cuales llegan hasta 15 metros del frente de trabajo.

Para el mantenimiento y reparación de los ventiladores principales y secundarios se cuenta con el apoyo del área de mantenimiento eléctrico, quienes mensualmente hacen llegar el programa de mantenimiento requerido; En casos extremos estos equipos son enviados a la empresa proveedora de los ventiladores para su reparación o mantenimiento.

### 7.3. Toma de datos en mina

La toma de datos se realizó de manera sistemática y por triplicado, esto con el fin de validar la data y evitar la presencia de errores dentro de las mediciones (la medición de caudales queda anulada si se presentan errores que excedan un 10% del caudal promedio) (véase Tabla 1).

Tabla 1 - Ejemplo de datos tomados en campo

| Nivel msn r | Direccio | Nombre     | Velocida | Temp | Humeda   | Hora  | Coordenada |
|-------------|----------|------------|----------|------|----------|-------|------------|
|             | Flujo    | Labor      | Aire m/S | °C   | Relativa |       | UTM        |
| 4518        | Salida   | RB5B       | 2.9      | 7    | 98.1     | 15:50 | 389842     |
|             |          |            | 2.3      |      |          |       | 8702798    |
| 4518        | Salida   | RB5B       | 2.9      | 7    | 98.1     | 15:50 | 389842     |
|             |          |            | 2.2      |      |          |       | 8702798    |
| 4430        | Entrada  | NV 470 MVC | 3.5      | 5.7  | 84.2     | 16:30 | 389566     |
|             |          |            | 2.8      |      |          |       | 8702417    |
| 4430        | Entrada  | NV 470 MVC | 3.6      | 5.7  | 84.2     | 16:30 | 389566     |
|             |          |            | 3.1      |      |          |       | 8702417    |
| 4430        | Entrada  | NV 470 MVC | 3.5      | 5.7  | 84.2     | 16:30 | 389566     |
|             |          |            | 2.8      |      |          |       | 8702417    |
| 4443        | Salida   | RB1450     | 4.8      | 11.5 | 92.5     | 16:45 | 389611     |
|             |          |            | 3.7      |      |          |       | 8702379    |
| 4445        | Entrada  | RB1211     | 4.7      | 4.5  | 92       | 16:50 | 389574     |
|             |          |            | 3.6      |      |          |       | 8702299    |
| 4445        | Entrada  | RB1211     | 4        | 4.5  | 92       | 16:50 | 389574     |
|             |          |            | 2.8      |      |          |       | 8702299    |

#### 7.4. Puntos de monitoreo

Se realizaron mediciones dentro de las rampas principales, chimeneas, accesos y tajeos de extracción actuales. Se recopilaron los siguientes datos, flujo de aire, temperatura, humedad relativa, cota y las características de los tajos (revestimiento, forma y resistencias).

De superficie: Se registro la totalidad de entradas y salidas de aire reportadas por la mina, dando así 21 puntos de monitoreo, 15 entradas de aire fresco y 6 puntos de descarga de aire viciado, entre Chimeneas y Rampas con conexión a superficie. La Tabla 2 muestra los puntos de monitoreo de entrada de aire mientras que la Tabla 3 muestra las salidas de aire.

Tabla 2 - Puntos de Monitoreo de ingreso de aire

| Punto de Medición | Ubicación              |
|-------------------|------------------------|
| 1                 | Bocamina NV-470        |
| 2                 | Bocamina NV-540        |
| 3                 | RB-1211                |
| 4                 | RB-483 (Pucaurco)      |
| 5                 | RB-790                 |
| 6                 | RB-690                 |
| 7                 | RB-795                 |
| 8                 | RB-641                 |
| 9                 | CH-844                 |
| 10                | CH-946 (Vía de Escape) |
| 11                | RB-640                 |

| Punto de Medición | Ubicación    |
|-------------------|--------------|
| 12                | RP-10 NV-570 |
| 13                | RP-04 NV-570 |
| 14                | RB-751       |
| 15                | RB- PIQUE    |

Tabla 3 - Puntos de Monitoreo de salida de aire

| Punto de Medición | Ubicación                 |
|-------------------|---------------------------|
| 1                 | RP-02 Pie RB-05A (NV-470) |
| 2                 | RB-1450 (SUP.)            |
| 3                 | RB-1234 (NV-900)          |
| 4                 | RB-1060 NV-950)           |
| 5                 | CAMARA VEN-01             |
| 6                 | CAMARA VEN-02             |

## 8. Análisis de demanda de aire actual

### 8.1. Demanda de aire para personas

La demanda de aire fresco requerido en interior mina se calcula de acuerdo a lo especificado en el artículo 252 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional DS-024-2016-MEM (véase Tabla 4)

Tabla 4 - Requerimientos de aire. Fuente: (MEM, 2016)

| Tipo           | Altitud (msnm)    | Caudal (m3/min) |
|----------------|-------------------|-----------------|
| Persona        | [0-1500]          | 3               |
| Persona        | [1500-3000]       | 4               |
| Persona        | [3000-4000]       | 5               |
| Persona        | más de 4000       | 6               |
| Equipos Diésel | Cualquier altitud | >=3             |

La demanda de aire fresco requerido para el personal que trabaja en interior mina se calcula de acuerdo al total de personal que se distribuye según:

- Personal de compañía: 25 hombres
- Personal de contrata: 150 hombres

Para realizar el cálculo de requerimiento de aire de todo el personal se tomó como dato que la mina se encuentra a más de 4000 msnm, por tal el caudal de aire requerido es:



$$Q_{\text{personal}} = (150 + 25) \times 6 = 1050 \text{ m}^3/\text{min} \quad (23)$$

## 8.2. Demanda de aire para maquinaria

Según el reglamento el caudal de aire requerido por equipo está en función de la máxima potencia del motor, dando como resultado una demanda igual a 3 m<sup>3</sup>/min por cada HP de potencia. Adicionalmente se deberá considerar la cantidad de equipos que operan en interior mina tomando en cuenta el momento de mayor actividad diario. Del mismo modo, se aplicará un factor de simultaneidad y disposición mecánica con el fin de calcular la demanda estimada de la totalidad de los equipos. La Tabla 5 muestra la relación de equipos identificados dentro del ciclo productivo de la mina y la demanda de aire según los HP de potencia de cada uno.

Tabla 5 – Cantidad de Equipos Diésel

| EQUIPO                           | CANTIDAD | HP c/u | HP Total  | Factor Simul. | m <sup>3</sup> /min |
|----------------------------------|----------|--------|-----------|---------------|---------------------|
| Scoop de 6 yd <sup>3</sup> (EE)  | 6        | 240    | 1440,00   | 0,75          | 3240,00             |
| Scoop de 6 yd <sup>3</sup> (CIA) | 4        | 240    | 960,00    | 0,75          | 2160,00             |
| Desatadores - Scaler             | 3        | 81.5   | 244,50    | 0,40          | 293,40              |
| Camiones Servicio (CIA)          | 2        | 260    | 520,00    | 0,35          | 546,00              |
| Camiones Servicio (EE)           | 4        | 160    | 640,00    | 0,45          | 864,00              |
| Volquetes (Multi)                | 17       | 350    | 5950,00   | 0,70          | 12 495,00           |
| Volquetes (IESA)                 | 4        | 350    | 1400,00   | 0,50          | 2100,00             |
| Jumbo Electrohidráulico (CIA)    | 5        | 75     | 375,00    | 0,30          | 337,50              |
| Jumbo Electrohidráulico (EE)     | 6        | 75     | 450,00    | 0,30          | 405,00              |
| Jumbo Empernador (CIA)           | 2        | 75     | 150,00    | 0,30          | 135,00              |
| Jumbo Empernador (EE)            | 3        | 75     | 225,00    | 0,30          | 202,50              |
| Equipo shotcrete - Hurones       | 7        | 120    | 840,00    | 0,60          | 1512,00             |
| Equipo shotcrete - Robot         | 3        | 80     | 240,00    | 0,50          | 360,00              |
| Total                            |          |        | 13 434,50 |               | 24 650,40           |

$$Q_{\text{equipos}} = 24 650 \text{ m}^3/\text{min} \quad (24)$$

### 8.3. Demanda de aire total

Se calculará la demanda horaria del caudal según las actividades ejecutadas (se tomará en cuenta los tiempos dispuestos para cambio de guardia, voladura, refrigerio, etc.

$$Q_{\text{total Requerido}} = Q_{\text{personal}} + Q_{\text{equipos}} \quad (25)$$

$$Q_{\text{total Requerido}} = 1\,050 + 24\,650 = 25\,700 \text{ m}^3/\text{min} \quad (26)$$

$$Q_{\text{Total Requerido}} \cong 26\,000 \text{ m}^3/\text{min} \quad (27)$$

### 8.4. Cálculo de cobertura de aire

De acuerdo a lo medido en los puntos de ingreso y salida de aire, se puede realizar los cálculos de cobertura de aire del sistema. La Tabla 6 recuenta los ingresos totales de caudal a la mina, la Tabla 7 hace lo mismo con las salidas de aire y la Tabla 8 muestra la cobertura estimada de las condiciones actuales.

$$\text{Cobertura} = \frac{Q_{\text{Ingreso}}}{Q_{\text{Operativo}}} \% \quad (28)$$

Tabla 6 - Caudal de ingreso de aire de la mina

| Ítem         | Componente      | Velocidad Promedio (m/s) | Área (m <sup>2</sup> ) | Caudal (m <sup>3</sup> /min) |
|--------------|-----------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1            | Bocamina NV-470 | 1,04                     | 21,48                  | 1345,00                      |
| 2            | Bocamina NV-540 | 4,44                     | 18,41                  | 4899,24                      |
| 3            | RB-1211         | 8,08                     | 1,77                   | 856,88                       |
| 4            | RB-790          | 11,19                    | 3,70                   | 2482,57                      |
| 5            | RB-690          | 9,60                     | 1,77                   | 1017,98                      |
| 6            | RB-795          | 7,81                     | 3,46                   | 1623,20                      |
| 7            | CH-946          | 17,91                    | 2,10                   | 2256,09                      |
| 8            | RB-640          | 8,41                     | 1,77                   | 892,01                       |
| 9            | Bocamina 570    | 10,40                    | 13,68                  | 8534,66                      |
| 10           | RB-895          | 12,42                    | 1,81                   | 1352,30                      |
| 11           | RB-Pique        | 9,19                     | 4,68                   | 2578,89                      |
| 12           | RB-483          | 8,37                     | 3,46                   | 1739,26                      |
| <b>Total</b> |                 |                          |                        | <b>29 578,08</b>             |

Tabla 7 - Caudal de salida de aire de la mina

| Ítem                | Componente       | Velocidad Promedio (m/s) | Área (m2) | Caudal (m3/min)  |
|---------------------|------------------|--------------------------|-----------|------------------|
| 1                   | NV-470 salida    | 4,14                     | 14,33     | 3557,00          |
| 2                   | RB-1234 (NV-900) | 2,77                     | 18,80     | 3124,17          |
| 3                   | RB-1060 (NV-950) | 3,41                     | 15,46     | 3161,64          |
| 4                   | CAMARA VEN-01    | 2,89                     | 41,10     | 7126,37          |
| 5                   | RB-751           | 12,27                    | 10,18     | 7491,65          |
| 6                   | CAMARA VEN-02    | 3,55                     | 33,56     | 7152,37          |
| <b>TOTAL SALIDA</b> |                  |                          |           | <b>31 613,20</b> |

Tabla 8 – Cobertura de Aire Actual de la Mina

|                   | m3/min         | CFM            |
|-------------------|----------------|----------------|
| INGRESO           | 29 578,08      | 1 044 540,13   |
| SALIDA            | 31 613,20      | 1 116 262,09   |
| NECESIDAD DE AIRE | 26 000,00      | 918 182,19     |
| <b>COBERTURA</b>  | <b>114,00%</b> | <b>114,00%</b> |

El Resultado preliminar muestra que se cuenta con una cobertura del 114%, número que asegura la demanda de aire en toda la jornada de trabajo. Sin embargo, al ser un valor sobredimensionado, se incurre en un gasto de recursos eléctricos elevados, lo cual generara un sobrecosto económico importante. Esto será identificado una vez implementado el modelo computacional.

## 9. Análisis de calidad de aire

El análisis de calidad de aire fue realizado según los procedimientos mencionados en la sección 5 y siguen los lineamientos precisados dentro del anexo 15 del reglamento de seguridad minera 024-2016 promulgado por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MEM, 2016). A continuación, se mencionan los límites máximos para los 6 agentes químicos a ser monitoreados dentro del estudio de ventilación (véase Tabla 9).

Tabla 9 – Límites máximos permisibles para agentes químicos en aire (fuente: MEM)

| Agente químico         | Límite máximo |
|------------------------|---------------|
| Oxígeno O2             | >19.5 %       |
| Monóxido de carbono CO | 25 ppm        |
| Ácido sulfhídrico H2S  | 10 ppm        |

| Agente químico           | Límite máximo |
|--------------------------|---------------|
| Dióxido de nitrógeno NO2 | 3 ppm         |
| Dióxido de carbono CO2   | 5000 ppm      |

Finalmente se muestran los resultados del análisis de calidad de aire por nivel de profundización (véase Tabla 10). Estos resultados muestran que los niveles de mayor profundización (a partir del nivel 1050) comienzan a reportar concentraciones mayores a las permitidas por el marco legal. Esto será considerado como prioridad principal para la mejora y optimización de la red de ventilación.

*Tabla 10 – Análisis de calidad de aire según nivel de profundización*

| Nivel | O2<br>(ppm) | CO<br>(ppm) | H2S<br>(ppm) | NO2<br>(ppm) | CO2<br>(ppm) |
|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 200   | 20,9        | 20          | 0,00         | 0,00         | 800          |
| 300   | 20,8        | 20          | 0,00         | 0,00         | 900          |
| 400   | 20,9        | 19          | 0,00         | 0,00         | 800          |
| 500   | 20,8        | 18          | 0,00         | 0,00         | 800          |
| 600   | 20,8        | 19          | 0,00         | 0,00         | 1000         |
| 700   | 20,8        | 23          | 0,00         | 0,00         | 1000         |
| 800   | 20,8        | 24          | 0,00         | 0,00         | 1100         |
| 900   | 20,9        | 23          | 0,00         | 0,00         | 900          |
| 1000  | 20,9        | 22          | 0,00         | 0,00         | 900          |
| 1050  | 20,8        | 25          | 0,00         | 0,00         | 1000         |
| 1100  | 20,9        | 30          | 0,00         | 0,00         | 1400         |
| 1150  | 20,8        | 40          | 0,00         | 0,00         | 1600         |
| 1200  | 20,8        | 65          | 0,00         | 0,00         | 2300         |
| 1250  | 20,8        | 70          | 0,00         | 0,00         | 2800         |

## 10. Construcción de modelo de ventilación 3D

El diseño y construcción de un modelo computacional permitirá la estimación de la distribución de caudales dentro de todas las instalaciones subterráneas. Este modelo brindará información precisa sobre los requerimientos de aire y permitirá optimizaciones operativas para el aprovechamiento del caudal circulante de aire fresco (Yun & Hai-ning, 2011) al igual que permitirá brindar condiciones de trabajo seguras para el personal inmerso en la actividad extractiva (De Souza, 2017)

### 10.1. Información requerida

Para la construcción de un modelo de Ventilación se necesitará la siguiente data:

- Distribución de galerías, accesos, cruceros y rampas en vista de planta de cada subnivel (véase Figura 12)
- Distribución de Tajos y labores actuales.
- Distribución de chimeneas de ventilación y/o Raise borer.
- Secciones típicas de toda la mina, incluyendo datos geométricos específicos de cada una (perímetro, área).
- Cotas de niveles y subniveles.
- Ubicación de ventiladores principales y secundarios.
- Modelos y especificaciones técnicas de cada ventilador.
- Especificaciones de mangas de ventilación.
- Ubicaciones de estaciones de monitoreo previas.
- Tipo de revestimiento de cada galería, acceso, crucero y rampa.
- Tipos de explosivos utilizados.
- Registro histórico y/o anual de contaminantes (emisiones gaseosas y polvo).

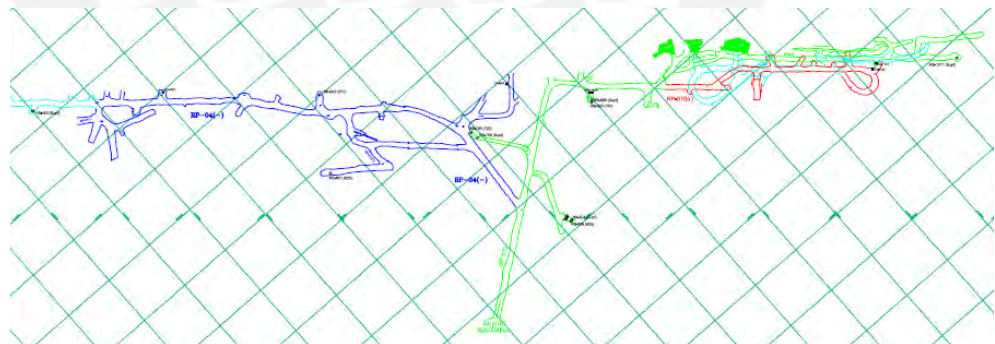


Figura 12 - Distribución de Galerías en Subniveles (AutoCAD) (fuente: Elaboración propia)

### 10.2. Construcción de vías y componentes principales

Se comienza a crear los niveles según los planos brindados por el área de Topografía – Planeamiento. El Diseño deberá considerar las diferentes disposiciones físicas y geométricas de las galerías y el diseño propio de cada sección. Es menester mencionar la importancia del detalle en el diseño de infraestructura debido a que las condiciones geométricas están estrictamente relacionadas con las pérdidas de presión por morfología de los ductos (Wu & Topuz, 1998). La Figura 13 muestra el modelo final creado.

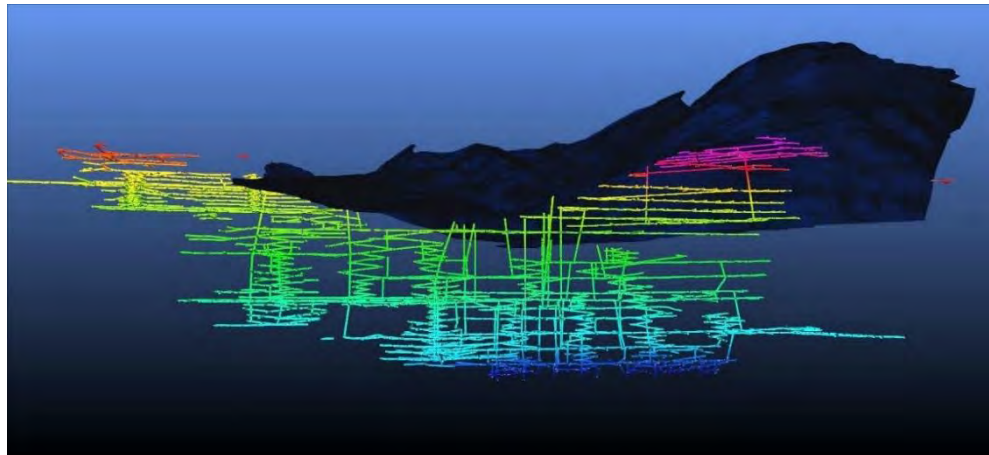


Figura 13 - Modelo Primario de ventilación de mina subterránea (fuente: elaboración propia)

### 10.3. Ventiladores

Se añaden todos los ventiladores al sistema según las hojas de calibración de cada equipo. Las curvas de calibración deberán ser exportadas al programa con el fin de brindar información específica de la potencia y caudal brindado según el ángulo de los alabes seleccionado. La Figura 14 muestra la herramienta de digitalización de hojas de calibración de ventiladores, mientras que la Tabla 11 muestra la relación de ventiladores disponibles en el sistema.

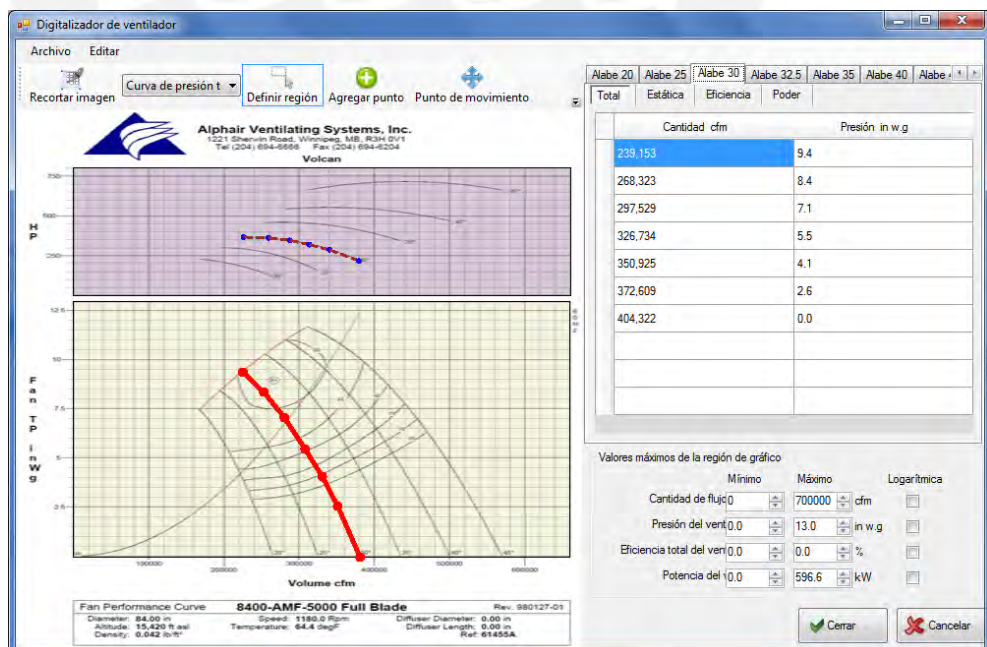


Figura 14 - Digitalizador de Ventilador – VentSim Visual (fuente: elaboración propia)

Tabla 11 – Lista de Ventiladores Disponibles

| N° | Marca   | Caudal  | Potencia | Nivel      | Ubicación | Angulo de Alabe |
|----|---------|---------|----------|------------|-----------|-----------------|
| 1  | Airtec  | 110 000 | 300      | SUPERFICIE | RB-1234   | 60              |
| 2  | Airtec  | 110 000 | 300      | SUPERFICIE | RB-1060   | 60              |
| 3  | Alphair | 300 000 | 500      | 500        | CA-444A   | 32,5            |
| 4  | Alphair | 300 000 | 500      | 500        | CA-444C   | 32,5            |
| 5  | Airtec  | 110 000 | 300      | 470        | RB-1450   | 60              |
| 6  | Airtec  | 110 000 | 300      | 825        | RB-751    | 60              |
| 7  | Airtec  | 110 000 | 300      | 825        | RB-751    | 60              |

#### 10.4. Primera corrida y calibración

Una vez cargada toda la información al software (vías, ventiladores, componentes, etc.) se procede a correr el modelo y comparar el caudal estimado con el medido en campo. Posteriormente se ejecutan calibraciones al modelo, las cuales tienen como fin la reducción de la variabilidad entre las mediciones estimadas y reales, para esto se ajustarán las resistencias de los conductos según lo estipulado por el coeficiente de Atkinson. El modelo presentado muestra una calibración al 88%, valor valido para estimaciones al nivel conceptual. La Tabla 12 detalla los resultados de la calibración y la Figura 15 muestra la efectividad de la red junto a los costos operativos esperados.

Tabla 12 - Cuadro de calibración del modelo en VentSim

| INGRESO DE AIRE |                        |                  |                |            |
|-----------------|------------------------|------------------|----------------|------------|
| Ítem            | Componente             | V estimado (m/s) | V medido (m/s) | %Variación |
| 1               | Bocamina NV-470        | 0,89             | 1,04           | 85%        |
| 2               | Bocamina NV-540        | 3,66             | 4,44           | 82%        |
| 3               | RB-1211                | 9,09             | 8,08           | 89%        |
| 4               | RB-790                 | 12,39            | 11,19          | 90%        |
| 5               | RB-690                 | 11,46            | 9,60           | 84%        |
| 6               | RB-795                 | 6,48             | 7,81           | 83%        |
| 7               | CH-946 (Vía de Escape) | 21,89            | 17,91          | 82%        |
| 8               | RB-640                 | 9,29             | 8,41           | 91%        |
| 9               | Bocamina 570           | 11,77            | 10,40          | 88%        |
| 10              | RB-895                 | 13,35            | 12,42          | 93%        |
| 11              | RB- PIQUE              | 11,05            | 9,19           | 83%        |
| 12              | RB-483                 | 9,23             | 8,37           | 91%        |

| SALIDAS DE AIRE |                  |       |       |     |
|-----------------|------------------|-------|-------|-----|
| 1               | NV-470 salida    | 4,43  | 4,14  | 93% |
| 2               | RB-1234 (NV-900) | 3,03  | 2,77  | 91% |
| 3               | RB-1060 (NV-950) | 3,25  | 3,41  | 95% |
| 4               | CAMARA VEN-01    | 2,84  | 2,89  | 98% |
| 5               | RB-751           | 12,51 | 12,27 | 98% |
| 6               | CAMARA VEN-02    | 3,65  | 3,55  | 97% |

| INTERIOR MINA |                            |      |      |            |
|---------------|----------------------------|------|------|------------|
| 1             | NV-670 en RP-4             | 1,80 | 1,57 | 87%        |
| 2             | NV-670 entre RP-4 y RP-6   | 0,50 | 0,46 | 92%        |
| 3             | NV-770 entre RP-4 y RP-5   | 0,50 | 0,37 | 74%        |
| 4             | NV-770 entre RP-3 y RP-4   | 2,00 | 1,76 | 88%        |
| 5             | NV-800 entre RP-5 y RP-6   | 0,90 | 0,79 | 88%        |
| 6             | NV-800 entre RP-4 y RP-5   | 1,30 | 1,13 | 87%        |
| 7             | NV-800 antes RP-10         | 2,10 | 2,36 | 89%        |
| 8             | NV-800 entre RP-10 y RP-12 | 2,40 | 2,74 | 87%        |
| 9             | NV-825 en RP-6             | 0,60 | 0,49 | 81%        |
| 10            | NV-825 entre RP-4 y RP-5   | 1,60 | 1,45 | 90%        |
| 11            | NV-850 después RP-5        | 2,80 | 2,72 | 97%        |
| 12            | NV-850 entre RP-4 y RP-5   | 1,60 | 1,39 | 87%        |
| 13            | NV-850 entre RP-5 y RP-6   | 2,20 | 2,52 | 87%        |
| 14            | NV-950 antes RP-14         | 1,00 | 1,25 | 80%        |
| 15            | NV-100 en RP-6             | 0,40 | 0,31 | 78%        |
| 16            | NV-1000 entre RP-5 y RP-6  | 0,10 | 0,12 | 85%        |
| 17            | NV-1000 entre RP-4 y RP-5  | 0,70 | 0,61 | 87%        |
| 18            | NV-1050 entre RP-4 y RP-5  | 1,50 | 1,44 | 96%        |
| 19            | NV-1050 entre RP-4         | 0,90 | 0,71 | 79%        |
| 20            | NV-1100 Bypass             | 1,60 | 1,51 | 95%        |
| <b>TOTAL</b>  |                            |      |      | <b>88%</b> |



| RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA                   |   |
|---|---|
| Flujo de aire compresible                       | Si                                      |
| La presión de ventilación natural               | No                                      |
| Tipo de simulación de la presión del ventilador | Método de la presión total              |
| Conductos de ventilación                        | 3280                                    |
| Longitud total                                  | 76,217.1 m                              |
| Caudal de aire total de admisión                | 31,396 m <sup>3</sup> /min              |
| Caudal de aire total de escape                  | 32,315 m <sup>3</sup> /min              |
| Flujo de masa total                             | 364.74 kg/s                             |
| Resistencia de la mina (sin tubo)               | 0.00658 Ns <sup>3</sup> /m <sup>8</sup> |
| Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto) | 0.00658 Ns <sup>3</sup> /m <sup>8</sup> |
| RESUMEN DE POTENCIA                             |   |
| Potencia del AIRE (pérdida por fricción)        | 985.0 kW Total                          |
|   | 764.8 kW Chimenea                       |
|   | 220.2 kW Conducir                       |
|   | 0.0 kW Conducto de ventilac...          |
| Refrigeración Potencia de entrada               | 0.0 kW                                  |
| <b>Potencia eléctrica de ENTRADA</b>            | <b>1,067.3 kW</b>                       |
| <b>Costo de energía anual de la red</b>         | <b>\$ 402,019</b>                       |
| <b>Eficiencia de la red</b>                     | <b>92.3 %</b>                           |
| Que consta de ..                                |   |
| 7 Ventiladores                                  | 1,067.3 kW                              |
| 0 Presiones fijadas                             | 0.0 kW                                  |
| 0 Flujos fijados                                | 0.0 kW                                  |
| 0 Refrigeración                                 | 0.0 kW                                  |

Figura 15 - Resultados obtenidos en la simulación inicial (fuente: elaboración propia)

El resultado de la simulación arroja que el sistema brinda 31 396 m<sup>3</sup>/min con un costo anual de US\$ 402 019 por año (US\$ 1101,42 por día)

#### 10.5. Análisis de situación actual

Se presenta a continuación el detalle del sistema emulado. La Figura 16 representa el diagrama unifilar, el cual representa el estado actual del sistema de ventilación.



- Nivel 470: El aire viciado recorre la mina en dirección Este-Oeste a lo largo del nivel 400, saliendo por la bocamina BM 470 hacia superficie. Este aire llega al nivel 800 por la chimenea raise bored (en adelante “RB”) 1450, la cual comunica al nivel 670 en la cámara 1483 para luego seguir su curso de ascenso hasta comunicar al nivel 470 en la parte superior. Una parte del aire viciado proveniente del nivel 670 sube por la rampa 13 hasta alcanzar a la chimenea RB 1450 para finalmente subir hasta conectar al nivel 470 y salir por la bocamina 470. En la intersección del RB 1450 (de 2.13 m de diámetro) con el nivel 470 se encuentra instalado el ventilador extractor de modelo VAV-60-26.5-1750-II-A con 60° de inclinación de sus álabes, el cual se encuentra aplicando una presión total de 4,68 pulgadas de columna de agua y extrayendo 123,107 CFM, trabajando a una eficiencia del 80.0 %. Se presentan a continuación las curvas características de este ventilador (véase Figura 17).

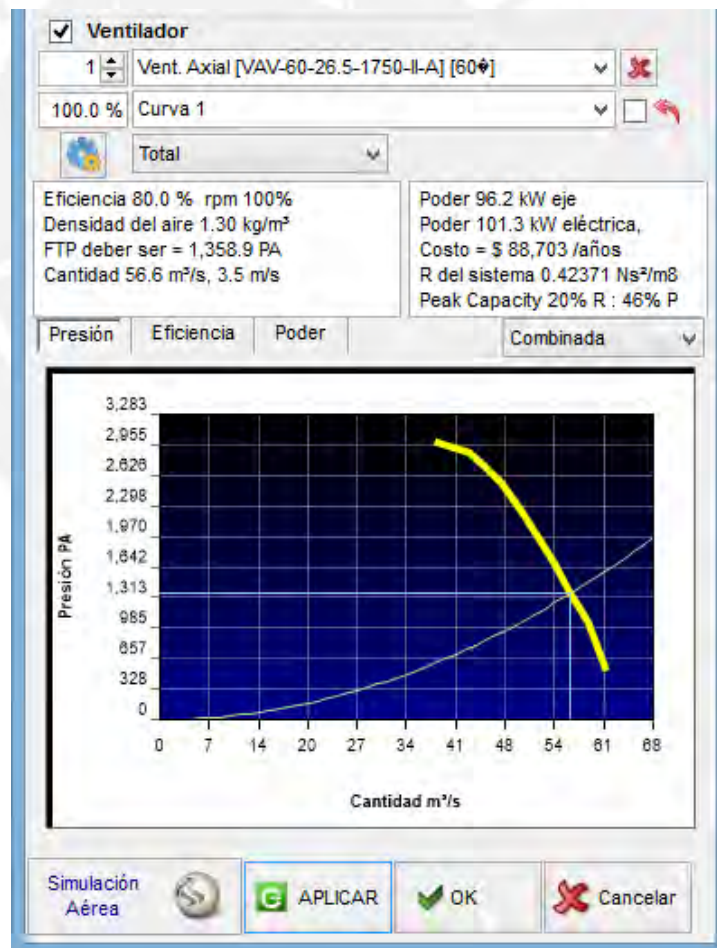


Figura 17 - Parámetros Operativos del Ventilador VAV-60-26.5-1750-II-A (fuente: elaboración propia)

- Nivel 500: En este nivel se encuentran instalados los dos ventiladores principales marca Alphaair modelo 8400-AMF-5000 (véase Figura 18), los cuales se encuentran aplicando una presión total de 9.4 pulgadas de columna de agua y están extrayendo un caudal de 258 715 CFM cada uno. Ambos ventiladores son extractores y están conectados en paralelo con la chimenea RB 650, la cual comunica los niveles 500, 900 (taller de mantenimiento y soldadura), 1000, 1050 y 1165 directamente. El nivel inferior 1165 se conecta con el nivel 1100 por medio de la chimenea RB 650, el cual se desfasa para tomar el nombre de RB 665 y conecta el nivel 1100 con el nivel 1050. Del mismo modo, existen dos chimeneas denominadas RB 660 (2) y RB 665, las cuales unen el nivel 1000 con el nivel 950 para finalmente conectarse con la chimenea RB 650 que está conectada a superficie (nivel 500).

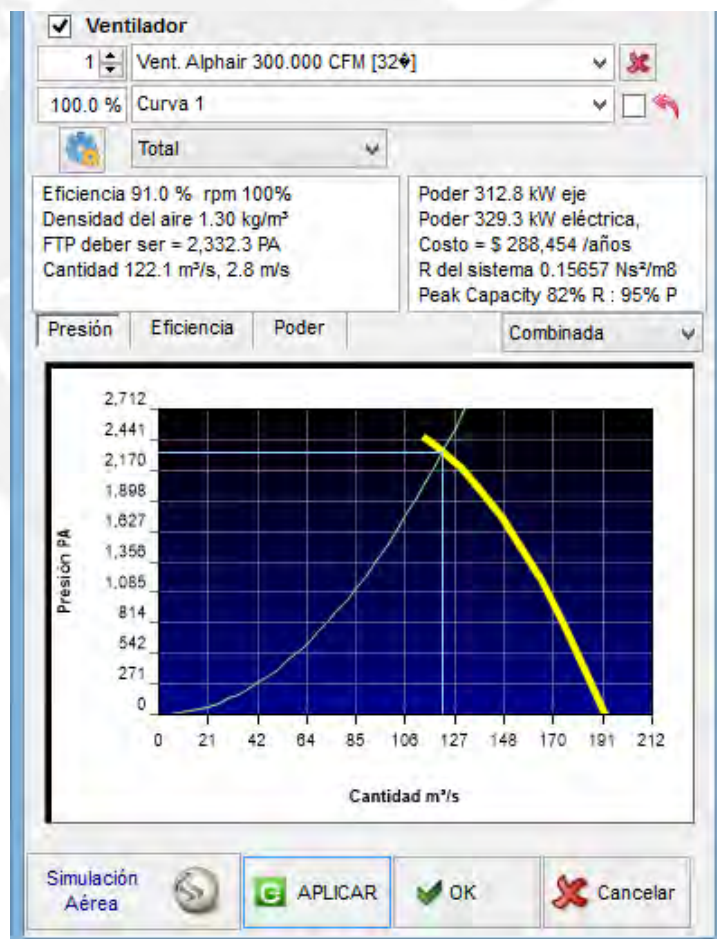


Figura 18 - Propiedades Operativas de los ventiladores Alphaair – 300 000 CFM (fuente: elaboración propia)

- Nivel 670: el caudal de aire que ingresa vía bocamina del nivel 570, RB 483, RB 695, RB 693, RB 795, RB 895, CH 1141, RB 1211, RP 06, RP 04, RP 10, RP 13, RP 05 Y RP 12 está siendo evacuado a superficie por el RB 1234, RB 470, RP 13 Y BM 470. El aire que recorre las rampas 06, 04, 10, 13, 05 y 12 desciende a los niveles inferiores y la diferencia recorre el mismo nivel 670. El caudal que recorre la parte Oeste baja por la rampa 4 al nivel 720 y la parte del caudal que recorre el lado Este sube a superficie por la rampa 13 positiva contándose al RB 1450 saliendo de esta manera a superficie
- Nivel 720: El aire que ingresa a este nivel 720 lo hace a través de los niveles superiores vía el RB 795 RB 895 y CH 114, siendo la única estructura por la cual evacua una parte de aire contaminado hacia la parte superior del nivel el RB 1060. El aire que baja por las rampas RP 05, RP 06, RP 04, RP 10 y RP 12 continúa hacia los niveles inferiores. El aire que baja por el RB 895 se distribuye una parte al lado Este del nivel y la otra al lado Oeste, distribuyéndose a lo largo del nivel en ambas alas. En el grafico mostrado, el nivel 720 en amarillo y naranja, siendo los niveles superiores los niveles 470, 500 y 670.
- Nivel 770: El aire que ingresa a través del nivel 770, proveniente de la parte superior, lo hace por CH 795, RP 04, RP 05 y RB 895. El caudal que desciende por la RP 05 y sigue la dirección Oeste lo hace hasta conectarse con la RP 04 siguiendo la suma de estos dos caudales (caudales que logran ir al lado Oeste en el nivel 770) continua su recorrido bajando una parte por la RP 03 a los niveles inferiores y el caudal que no logra bajar por esta RP 03 sigue su curso hasta llegar al RB 140, bajando por esta estructura al nivel inferior.
- Nivel 800: El caudal de aire que ingresa de los niveles superiores a este nivel lo hacen a través de las chimeneas CH 1141, RP 03, RP 04, RP 05, RB 540, RB 895, RP 10, RB 12 y RP 13. El caudal de aire que llega a este nivel desde los niveles inferiores ingresa a través de los raise-borer RB 650, RB 660 y RB 1234, mientras que el aire que sale de este nivel hacia los niveles inferiores lo hace a través de las chimeneas CH 505, RB 505, RP 04, RP 05, CH 767, CH 782, CH 840, CH 922, RP 10, y RB 895.

- Nivel 825: El aire que baja al nivel 825 proviene del nivel inmediato superior, es decir, del nivel 800. Las estructuras por las cuales baja este flujo son la RP 04, CH 505, RP 05, CH 767, CH 782 y RP 06. El aire que baja del nivel 825 al nivel 850 lo hace a través de las siguientes estructuras: CH 782, CH 777, CH 846 CH 414, RP 05 y RP 06. Las estructuras que conectan el nivel 825 al nivel 900 son RB 505 y RP 05. La chimenea CH 835 transporta aire al nivel 950 directamente del nivel 825. En la intersección del RB 751 (de 3,6 m de diámetro) se encuentran instalados dos ventiladores extractores en paralelo, modelo VAV-60-26.5-1750-II-A con 60° de inclinación de sus álabes, los cuales se encuentran aplicando una presión total de 5,47 pulgadas de columna de agua y extrayendo 239,857cfm, trabajando a una eficiencia del 80,0 % (véase Figura 19

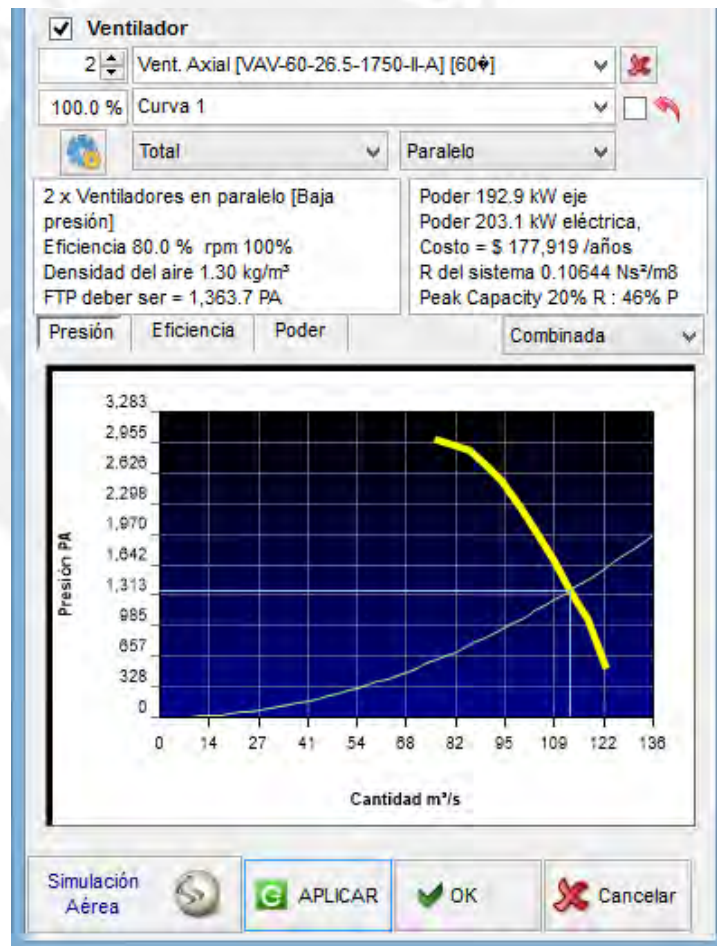


Figura 19 - Propiedades Operativas de los ventiladores VAV-60-26.5-1750-II-A (fuente: elaboración propia)

- Nivel 850: El nivel 850 se muestra en la parte inferior de este gráfico y las estructuras por las cuales baja aire hacia nivel 850 son: RP04, CH 414,

CH 505, RP 05, CH 777, RP 06 y CH 846. Por la CH 660 sube aire del nivel 850 al nivel 800. El aire que también baja directamente del nivel 850 al nivel 900 lo hace a través de la RP 04, CH 414, CH 505, CH 495, RP 05, CH 777, RP 06 y finalmente por la CH 846. La rampa que se encuentra en la parte central del nivel es la RP 05 y a los extremos del nivel se encuentra la rampa 04 al lado Oeste y la rampa 06 al lado Este. Por todas estas rampas el aire baja hacia los niveles inferiores. El aire limpio que ingresa por la bocamina del nivel 570 baja principalmente por las rampas 04, 05 y 06, llegando en su recorrido a conectar por todos los niveles principales hasta llegar inclusive al nivel 1100.

- Nivel 900: Se indican a continuación las estructuras a través de las cuales el aire se dirige desde este nivel hasta los niveles superiores, las estructuras por las que el aire sube o baja del nivel 850 al nivel 900 y finalmente las estructuras a través de las cuales se conduce hasta los niveles inferiores. El nivel 900 se muestra en la parte inferior de este gráfico en color verde. Se indican a continuación las estructuras a través de las cuales el aire se dirige desde este nivel hasta los niveles superiores, las estructuras por las que el aire sube o baja del nivel 850 al nivel 900 y finalmente las estructuras a través de las cuales se conduce hasta los niveles inferiores. En este nivel se cuenta con cuatro rampas principales (RP 04, RP 05, RP 06, RP 10), a través de las cuales baja aire desde los niveles superiores. Una parte de este aire circula en el propio nivel recorriendo de Este a Oeste como de Oeste a Este. Entre las estructuras que unen los niveles superiores al nivel 900 y por las cuales baja aire se tiene los siguientes: Estructuras que unen el nivel 770 al 900: El RB 140 y la RP 10. Estructuras que unen el nivel 850 con el nivel 900: La RP 04, CH 414, CH 505, CH 495, RP 05, CH 777, RP 06 y CH 846. Estructuras que unen el nivel 900 con el nivel 1000: el RB 140, CH 414, CH 505, CH 607, RP 05, CH 777, RP 06 y CH 846. Estructuras que unen el nivel 800 con el nivel 900: Se tiene el RB 1234 por el cual está subiendo aire.
- Nivel 950: En este nivel existen cuatro rampas principales (04, 05, 06 y 10), a las que llega aire desde los niveles superiores, distribuyéndose en este nivel y continuando el descenso hacia los niveles inferiores. Se presentan una serie de estructuras de ventilación como rampas, chimeneas, rase bores que unen los niveles superiores al nivel 950, estructuras que unen tanto el nivel contiguo superior 900 como inferior

1000 y finalmente estructuras que unen el nivel 950 a niveles inferiores directamente. Las estructuras que unen el nivel 900 con el 950 son: RP 04, RP 05, RP 06, RP 10, CH 414, CH 505, CH 607, CH 777 y CH 846. Las estructuras que unen el nivel 950 al 1000 son: RP 04, CH 414, RB 505, RP 05, CH 607, RB 660 (por este raise-bore sube aire), CH 777, RB PIQUE, CH 846 y finalmente el RB 846. Por las estructuras antes mencionadas el aire se desplaza descendientemente, excepto en aquella que figura entre paréntesis, a través del cual el aire está ascendiendo.

- Nivel 1000: En este nivel existen tres rampas principales (04, 05, 06) por las cuales baja aire de los niveles superiores al mismo nivel 1000 distribuyéndose en este nivel y continuando el descenso a los niveles inferiores. Se presentan una serie de estructuras de ventilación como rampas, chimeneas, raise-bores que unen los niveles superiores al nivel 1000, estructuras que unen tanto el nivel contiguo superior 950 como inferior 1050 y finalmente estructuras que unen el nivel 1000 a niveles inferiores directamente. Las estructuras que unen el nivel 950 al 1000 son: CH 414, RP 04, RB 505, RP 05, CH 607, RB 660 (el aire asciende por esta estructura), CH 777, RB PIQUE, RP 06, CH 846 y RB 846. Estructuras que unen el nivel 900 al 1000: el RB 140. Estructuras que unen el nivel 1000 al 1050: RB 505, CH 607, RP 05, RB 665 (el aire asciende por esta estructura), CH 777, RP 06 y RB 865. Por las estructuras antes mencionadas el aire se desplaza descendientemente, excepto en aquella que figura entre paréntesis, a través del cual el aire está ascendiendo.
- Nivel 1050: Se presentan aquí tres rampas principales (04, 05, 06), a través de las cuales baja aire desde los niveles superiores al mismo nivel 1050 distribuyéndose en este nivel y continuando el descenso a los niveles inferiores. Se presentan una serie de estructuras de ventilación como rampas, chimeneas y raise-borer que unen los niveles superiores al nivel 1050, estructuras que unen tanto el nivel contiguo superior 1000 como inferior 1100 y finalmente estructuras que unen directamente el nivel 1050 con los niveles inferiores. Las estructuras que unen el nivel 1000 con el 1050 son: RB V141, RB S141, RP 04, RB 505, RP 05, CH 607, CH 777, RP 06, RB 665 (el aire asciende por esta estructura) y RB 865. Las estructuras que unen el nivel 1050 al 1100 son: RP 05, RB 665 (el aire asciende por esta estructura) y RP 06. Por las estructuras antes



mencionadas el aire se desplaza descendientemente, excepto en aquella que figura entre paréntesis, a través del cual el aire está

- Nivel 1100, 1050 y 1165: El aire que llega desde la parte superior y recorre todos los niveles a su paso por la rampa 05 y el RB 140 desde el nivel 1050. El aire viciado sube desde el nivel 1165 por el RB 650 hasta el nivel 1100, luego sube por el RB 665 al nivel 1050 para desde aquí seguir subiendo por los dos RB 665 y RB 660 (2) una de las cuales une el nivel 1050 con el 1000 y la otra une directamente el nivel 1050 con el nivel 850. El RB 665 que llega al nivel 1000 se desfasa y sigue subiendo el caudal de aire viciado por los dos RB 660 las cuales conectan el nivel 1000 con el nivel 950. En este nivel el flujo de aire viciado sigue su ascenso por el RB 650 hasta llegar al nivel 800 para seguir su ascenso por esta estructura hasta llegar al nivel 670 y de allí llegar por la misma estructura hasta conectar el nivel 500, donde interseca a las dos cámaras de ventilación ubicadas en este nivel que con la ayuda de los ventiladores extractores de fabricación canadiense marca Alphair, que están extrayendo el aire viciado desde el nivel más profundo de la mina. Además, el aire viciado sube por el RB 751 al nivel 1100 para desde aquí seguir subiendo hasta el nivel 825, en este nivel con la ayuda del ventilador VAV-60-26.5-1750-II-A se está extrayendo el aire viciado desde el nivel más profundo de la mina.

## 11. Propuestas de mejora

El presente capítulo presenta dos propuestas de mejora, las cuales permitirán mejorar la distribución de flujo de aire dentro de la red de ventilación (optimización 1) y la estructura de costos generada por el consumo energético de ventilación (optimización 2).

### 11.1. Optimización 1: Construcción de ductos de ventilación

Se tiene que los ventiladores principales de 300 000 CFM están trabajando a una presión total de 9,7 pulgadas de H<sub>2</sub>O aproximadamente 7,5 pulgadas H<sub>2</sub>O de presión estática, esta presión se encuentra a un pequeño margen de presentarse un fenómeno de *stall* o bombeo. Un ventilador operando cerca del punto de bombeo tendrá un severo incremento de ruido, el ventilador al estar trabajando continuamente en bombeo puede provocar una fatiga estructural de los álabes y desgaste prematuro (El-Nagdy, 2013; Kursunoglu & Onder, 2015; LI & WANG, 2009) (véase Figura 20 para configuración inicial y Figura 21 para curva característica inicial).



Figura 20 – Escenario inicial (fuente: elaboración propia)



Figura 21 - Curva Característica del Ventilador principal de 300,000 CFM al inicio (fuente: elaboración propia)

### 11.1.1. Fase 1

Se propone la construcción de crucero (CX-660) que una el RB-660 con la cámara 2 de los ventiladores principales, con el objetivo de aumentar el área equivalente y disminuir la resistencia en la extracción del aire viciado, con esto se logrará disminuir la presión total de 9,7 a 8,7 pulgadas de H<sub>2</sub>O de operación de los ventiladores principales, alejándose de la zona inestable de bombeo (véase Figura 22 para configuración final y Figura 23 para curva característica final).



Figura 22 – Escenario final (fuente: elaboración propia)

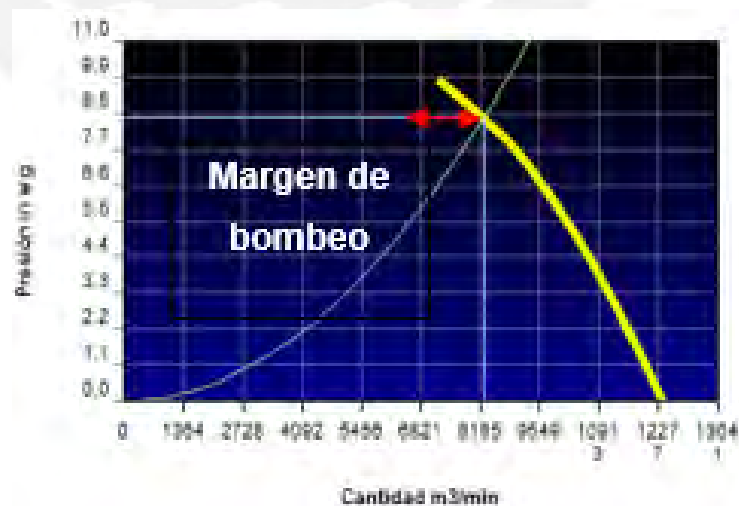


Figura 23 - Curva Característica del Ventilador principal de 300,000 CFM al final (fuente: elaboración propia)

Finalmente, la Tabla 13 resume los resultados obtenidos, agregando los costos operativos y consumos energéticos de cada alternativa.

Tabla 13 – Comparación de Escenarios – Optimización 1

| Ítems                            | Sistema De Ventilación                |                                      |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|                                  | Inicial                               | Final                                |
| Caudal de aire de escape         | 7388 m <sup>3</sup> /min              | 8234 m <sup>3</sup> /min             |
| Resistencia del Sistema          | 0,158 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup> | 0,113Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup> |
| Potencia al eje                  | 311,7 kW                              | 308,1 kW                             |
| Potencia eléctrica               | 328,1 kW                              | 324,3 kW                             |
| Costo de energía anual de la red | \$ 123 574,00                         | \$ 122 175,00                        |

### 11.1.2. Fase 2

Para la mina del centro, además de la redistribución de los circuitos y aplicación de variadores de frecuencia en los ventiladores de 300 000 CFM, se plantea la construcción de dos raise borer (RB-641 y RB-791) que cumplirán la función de llevar aire fresco a las zonas donde se concentra la explotación actual y donde se proyecta de la mina a futuro (vease Figura 24). Se realizó un análisis financiero de optimización para seleccionar el diametro optimo del RB, basado en el costo de excavación y el costo de operación del ventilador, obteniendo asi el valor optimo es de 3 a 3,5 m para el RB-641 (vease Figura 25) y 2,4 m para el RB-791 (vease Figura 26).

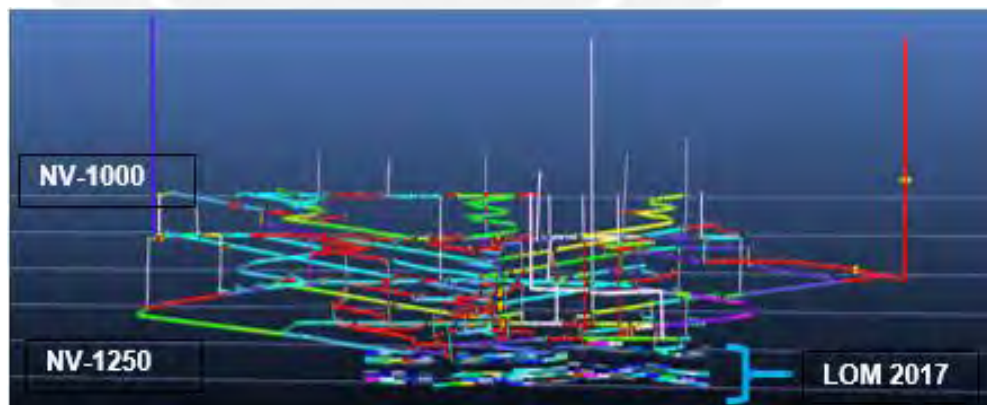


Figura 24 - Zona de Profundización (Nivel 1000 al Nivel 1250) y Plan Anual de minado (LOM) 2017 (fuente: elaboración propia)

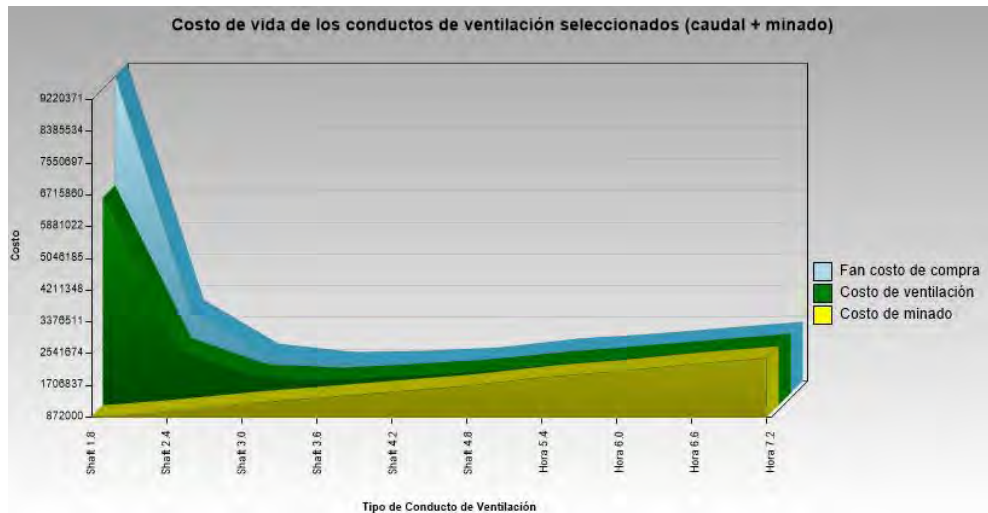


Figura 25 - Optimización de Diámetros de RB-641 (fuente: elaboración propia)



Figura 26 - Optimización de Diámetros de RB 791 (fuente: elaboración propia)

### 11.1.3. Resultados obtenidos tras la aplicación de la Fase 1 y 2

La estimación final de la propuesta 1 dio como resultado un incremento de la eficiencia de la red en 1,5% debido a la reducción de los Kilowatts hora consumidos por los ventiladores y el aumento del caudal por la reducción de resistencia del sistema (por la construcción del crucero 660). Para medir la eficiencia real del sistema de ventilación principal, se tiene que comparar la relación de potencia total y caudal de ingreso:  $(KW) / (m^3/min)$  como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 – Comparación de Eficiencia de la Red de Ventilación

|                   | Inicio       | Propuesta con Raise Borer |
|-------------------|--------------|---------------------------|
| Eficiencia de red | 92,3         | 93,8                      |
| KW                | 1067,30      | 977,10                    |
| m3/min            | 31 369,0     | 33 764,0                  |
| <b>KW/m3/min</b>  | <b>0,034</b> | <b>0,029</b>              |

Así mismo, al contar con mayores flujos de aire dentro de la profundización, se logró obtener nuevos valores esperados para los niveles de concentración de gases contaminantes (los cuales se precisan en la Tabla 15). Finalmente, se puede apreciar que existe una reducción promedio del 30% en la concentración de gases contaminantes dentro de la red de ventilación (datos obtenidos de la simulación en VentSim Visual 3)

Tabla 15 – Nueva concentración de gases según niveles de profundización

| Nivel | O2<br>(ppm) | CO<br>(ppm) | H2S<br>(ppm) | NO2<br>(ppm) | CO2<br>(ppm) |
|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 200   | 20,9        | 14          | 0,00         | 0,00         | 600          |
| 300   | 20,8        | 14          | 0,00         | 0,00         | 600          |
| 400   | 20,9        | 12          | 0,00         | 0,00         | 500          |
| 500   | 20,8        | 12          | 0,00         | 0,00         | 500          |
| 600   | 20,8        | 13          | 0,00         | 0,00         | 700          |
| 700   | 20,8        | 13          | 0,00         | 0,00         | 600          |
| 800   | 20,8        | 12          | 0,00         | 0,00         | 600          |
| 900   | 20,9        | 12          | 0,00         | 0,00         | 500          |
| 1000  | 20,9        | 13          | 0,00         | 0,00         | 500          |
| 1050  | 20,8        | 20          | 0,00         | 0,00         | 800          |
| 1100  | 20,9        | 25          | 0,00         | 0,00         | 1200         |
| 1150  | 20,8        | 33          | 0,00         | 0,00         | 1300         |
| 1200  | 20,8        | 40          | 0,00         | 0,00         | 1400         |
| 1250  | 20,8        | 45          | 0,00         | 0,00         | 1800         |

11.2. Optimización 2: Re-análisis de demanda de aire e implementación de variadores de voltaje

Después de analizar las demandas de aire iniciales se apreció que no se consideró una demanda de aire específica para explosivos, lo cual representa un problema si no se sabe el tiempo de limpieza de los mismos tras concluir un proceso de voladura. Por otro lado, los factores de simultaneidad originalmente considerados para la demanda de aire en equipos no representan con exactitud la demanda horaria dentro de la mina, por lo que se decidió hacer un ajuste horario de cada equipo dentro del ciclo productivo, de modo tal que se tenga con mayor exactitud la distribución de equipos y cantidad de caudal requerido por jornada.

11.3. Demanda de aire para explosivos:

La estimación de demanda de aire para explosivos es un tema delicado debido al riesgo potencial que estos representan. Primero, se contabilizó la cantidad de explosivos utilizados dentro de la operación minera (véase Tabla 16) y se estimó el volumen de gas nocivo generado según las especificaciones del fabricante.

Tabla 16 – Explosivos utilizados en frente de Voladura

| Parámetro de Voladura |  |
|-----------------------|--|
| Explosivos            | Emulnor 3000 11/4x12"<br>Emulnor 1000 11/4x12"     |
| Gas generado          | 880 L/kg – Emulnor 3000<br>920 L/kg – Emulnor 1000 |
| Accesorios            | Fanel Ms 4,2 m<br>Fanel Lp 4,2 m                   |
| Carga Total           | 60,45 kg   |
| Factor de Potencia    | 0,46   |
| Factor de Carga       | 20,15  |

$$Q_{\text{explosivos}} = (920 * 60,45) = 56\ 120 \text{ litros} = 56,12 \text{ m}^3 \quad (29)$$

Esta cantidad deberá ser multiplicada por la cantidad total de frentes volados en el día (30), dando el resultado final:

$$Q_{\text{explosivos Total}} = 30 * 56,12 = 1680 \text{ m}^3 \quad (30)$$

Esta cantidad, al no ser significativa comparada a los requerimientos obtenidos por los equipos, será considerada como nivel base junto con el requerimiento de aire para trabajadores, asegurando así que la mina cuente con un flujo suficiente que cubra la demanda de ambas partes a cualquier horario de trabajo.

### 11.3.1. Fase 3

Según lo visto en el análisis de demanda de aire se puede apreciar que los equipos representan más de 90% en el cálculo de demanda total. Es por este motivo que se recomienda reevaluar la demanda de los equipos según los horarios de trabajo y las actividades ejecutadas de los equipos (se tomará en cuenta los tiempos dispuestos para cambio de guardia, voladura, refrigerio, etc.) al igual que la disponibilidad mecánica. Esto permitirá identificar las horas de demanda pico dentro de la jornada laboral diaria (Chatterjee, Zhang, & Xia, 2015). La Tabla 17 resume los requerimientos horarios totales.

*Tabla 17 – Cantidad de Equipos Diésel*

| EQUIPO                        | CANTIDAD | HP<br>c/u | HP Total  | m3/min    | Horas<br>Trabajadas<br>Diarias |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|
| Scoop de 6 yd3 (EE)           | 6        | 240       | 1440,00   | 4320,00   | 18                             |
| Scoop de 6 yd3 (CIA)          | 4        | 240       | 960,00    | 2880,00   | 18                             |
| Desatadores – Scaler          | 3        | 81,5      | 244,50    | 733,50    | 9,6                            |
| Camiones Servicio (CIA)       | 2        | 260       | 520,00    | 1560,00   | 8,4                            |
| Camiones Servicio (EE)        | 4        | 160       | 640,00    | 1920,00   | 10,8                           |
| Volquetes (Multi)             | 17       | 350       | 5950,00   | 17 850,00 | 16,8                           |
| Volquetes (IESA)              | 4        | 350       | 1400,00   | 4200,00   | 12                             |
| Jumbo Electrohidráulico (CIA) | 5        | 75        | 375,00    | 1125,00   | 7,2                            |
| Jumbo Electrohidráulico (EE)  | 6        | 75        | 450,00    | 1350,00   | 7,2                            |
| Jumbo Empernador (CIA)        | 2        | 75        | 150,00    | 450,00    | 7,2                            |
| Jumbo Empernador (EE)         | 3        | 75        | 225,00    | 675,00    | 7,2                            |
| Equipo shotcrete – Hurones    | 7        | 120       | 840,00    | 2520,00   | 14,4                           |
| Equipo shotcrete – Robot      | 3        | 80        | 240,00    | 720,00    | 12                             |
| Total                         |          |           | 13 434,50 | 40 303,50 | 18                             |



Luego, se vuelve a calcular la demanda total utilizando sumando los requerimientos de personal, voladura y las horas hombre trabajadas (HHT) de cada equipo según las horas trabajadas (véase Tabla 18 y Tabla 19). La Figura 27 muestra la diferencia entre la demanda calculada al inicio (real operativa) vs la estimada en la propuesta, evidenciándose el sobredimensionamiento de la red actual.

$$Q_{\text{total Requerido}} = \frac{\Sigma(Q_P * HHT_p + Q_{Eq} * HHT_{eq} + Q_{ex} * HHT_{ex})}{\Sigma HHT} \quad (31)$$



Tabla 18 – Metros Cúbicos de aire requeridos según horario de trabajo 00:00 – 11:00

| Equipos                       | Horario de Trabajo |           |           |           |           |           |           |         |           |           |           |           |
|-------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                               | 00:00              | 01:00     | 02:00     | 03:00     | 04:00     | 05:00     | 06:00     | 07:00   | 08:00     | 09:00     | 10:00     | 11:00     |
| Scoop de 6 yd3 (EE)           | 750,00             | 1500,00   | 1500,00   | 1500,00   | 1500,00   | 1500,00   | 750,00    | -       | 750,00    | 1500,00   | 1500,00   | 750,00    |
| Scoop de 6 yd3 (CIA)          | 1875,00            | 3750,00   | 3750,00   | 3750,00   | 3750,00   | 3750,00   | 1875,00   | -       | 1875,00   | 3750,00   | 3750,00   | 1875,00   |
| Desatadores - Scaler          | 30,00              | 30,00     | -         | 30,00     | 150,00    | 300,00    | 300,00    | -       | -         | -         | -         | 30,00     |
| Camiones Servicio (CIA)       | 540,00             | 540,00    | 270,00    | 270,00    | -         | 540,00    | 540,00    | -       | -         | 540,00    | 540,00    | -         |
| Camiones Servicio (EE)        | 540,00             | 270,00    | 270,00    | 270,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | -       | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 270,00    |
| Volquetes (Multi)             | 11 250,00          | 11 250,00 | 5625,00   | 5625,00   | 5625,00   | 11 250,00 | 5625,00   | -       | 5625,00   | 11 250,00 | 11 250,00 | 5625,00   |
| Volquetes (IESA)              | 3375,00            | 1687,50   | 1687,50   | 1687,50   | 1687,50   | 3375,00   | 1687,50   | -       | 1687,50   | 3375,00   | 3375,00   | 1687,50   |
| Jumbo Electrohidráulico (CIA) | 888,00             | -         | -         | -         | 444,00    | 888,00    | 888,00    | -       | 444,00    | -         | -         | -         |
| Jumbo Electrohidráulico (EE)  | 444,00             | -         | -         | -         | 222,00    | 444,00    | 444,00    | -       | 222,00    | -         | -         | -         |
| Jumbo Empernador (CIA)        | 166,50             | 166,50    | 166,50    | 166,50    | 166,50    | 166,50    | 166,50    | -       | 333,00    | 333,00    | 166,50    | 166,50    |
| Jumbo Empernador (EE)         | 55,50              | 55,50     | 55,50     | 55,50     | 55,50     | 55,50     | 55,50     | -       | 111,00    | 111,00    | 55,50     | 55,50     |
| Equipo shotcrete - Hurones    | 1050,00            | 1050,00   | 1050,00   | 1050,00   | 525,00    | 2100,00   | 1050,00   | -       | 1050,00   | 2100,00   | 1050,00   | 1050,00   |
| Equipo shotcrete - Robot      | 630,00             | 630,00    | 630,00    | 630,00    | 630,00    | 1260,00   | 630,00    | -       | 630,00    | 630,00    | 630,00    | 630,00    |
| Personas Volcan               | 900,00             | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00  | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    |
| Personas Contratas            | 150,00             | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00  | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    |
| Voladuras                     | -                  | -         | -         | 2340,00   | 2340,00   | 1170,00   | -         | -       | -         | -         | -         | 2340,00   |
| Total (m3 aire)               | 22 644,00          | 21 979,50 | 16 054,50 | 18 424,50 | 18 685,50 | 28 389,00 | 15 601,50 | 1050,00 | 14 317,50 | 25 179,00 | 23 907,00 | 15 529,50 |

■ Refrigerio
 ■ Voladura
 ■ Cambio de Guardia

Tabla 19 - Metros Cúbicos de aire requeridos según horario de trabajo 12:00 – 23:00

| Equipos                       | Horario de Trabajo |           |           |           |           |           |           |         |           |           |           |           |
|-------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                               | 12:00              | 13:00     | 14:00     | 15:00     | 16:00     | 17:00     | 18:00     | 19:00   | 20:00     | 21:00     | 22:00     | 23:00     |
| Scoop de 6 yd3 (EE)           | -                  | 750,00    | 1500,00   | 1500,00   | 1500,00   | 1500,00   | 750,00    | -       | 750,00    | 1500,00   | 1500,00   | 1500,00   |
| Scoop de 6 yd3 (CIA)          | -                  | 1875,00   | 3750,00   | 3750,00   | 3750,00   | 3750,00   | 1875,00   | -       | 1875,00   | 3750,00   | 3750,00   | 3750,00   |
| Desatadores - Scaler          | -                  | 150,00    | 300,00    | 300,00    | 150,00    | -         | -         | -       | 150,00    | 300,00    | 300,00    | 150,00    |
| Camiones Servicio (CIA)       | -                  | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | -       | -         | 540,00    | 540,00    | 540,00    |
| Camiones Servicio (EE)        | -                  | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    | -       | 540,00    | 540,00    | 540,00    | 540,00    |
| Volquetes (Multi)             | -                  | 5625,00   | 11 250,00 | 11 250,00 | 11 250,00 | 11 250,00 | 5625,00   | -       | 5625,00   | 11 250,00 | 11 250,00 | 11 250,00 |
| Volquetes (IESA)              | -                  | 1687,50   | 3375,00   | 1687,50   | 3375,00   | 3375,00   | 1687,50   | -       | 1687,50   | 3375,00   | 3375,00   | 3375,00   |
| Jumbo Electrohidráulico (CIA) | -                  | 222,00    | -         | 444,00    | 888,00    | 888,00    | -         | -       | -         | -         | 888,00    | 888,00    |
| Jumbo Electrohidráulico (EE)  | -                  | 111,00    | -         | 222,00    | 222,00    | 222,00    | -         | -       | -         | -         | 222,00    | 444,00    |
| Jumbo Empernador (CIA)        | -                  | 166,50    | 166,50    | 333,00    | 166,50    | 166,50    | 166,50    | -       | 333,00    | 166,50    | 333,00    | 333,00    |
| Jumbo Empernador (EE)         | -                  | 55,50     | 55,50     | 111,00    | 55,50     | 55,50     | 55,50     | -       | 111,00    | 55,50     | 111,00    | 111,00    |
| Equipo shotcrete - Hurones    | -                  | 1050,00   | 2100,00   | 2100,00   | 2100,00   | 2100,00   | 1050,00   | -       | 1050,00   | 1050,00   | 2100,00   | 1050,00   |
| Equipo shotcrete - Robot      | -                  | 630,00    | 1260,00   | 1260,00   | 1260,00   | 1260,00   | 630,00    | -       | 630,00    | 630,00    | 630,00    | 630,00    |
| Personas Volcan               | 900,00             | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00  | 900,00    | 900,00    | 900,00    | 900,00    |
| Personas Contratas            | 150,00             | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00  | 150,00    | 150,00    | 150,00    | 150,00    |
| Voladuras                     | 2340,00            | 1170,00   | -         | -         | -         | -         | -         | 2340,00 | 2340,00   | 1170,00   | -         | -         |
| Total (m3 aire)               | 3390,00            | 15 622,50 | 25 887,00 | 25 087,50 | 26 847,00 | 26 697,00 | 13 969,50 | 3390,00 | 16 141,50 | 25 377,00 | 26 589,00 | 25 611,00 |

■ Refrigerio
 ■ Voladura
 ■ Cambio de Guardia

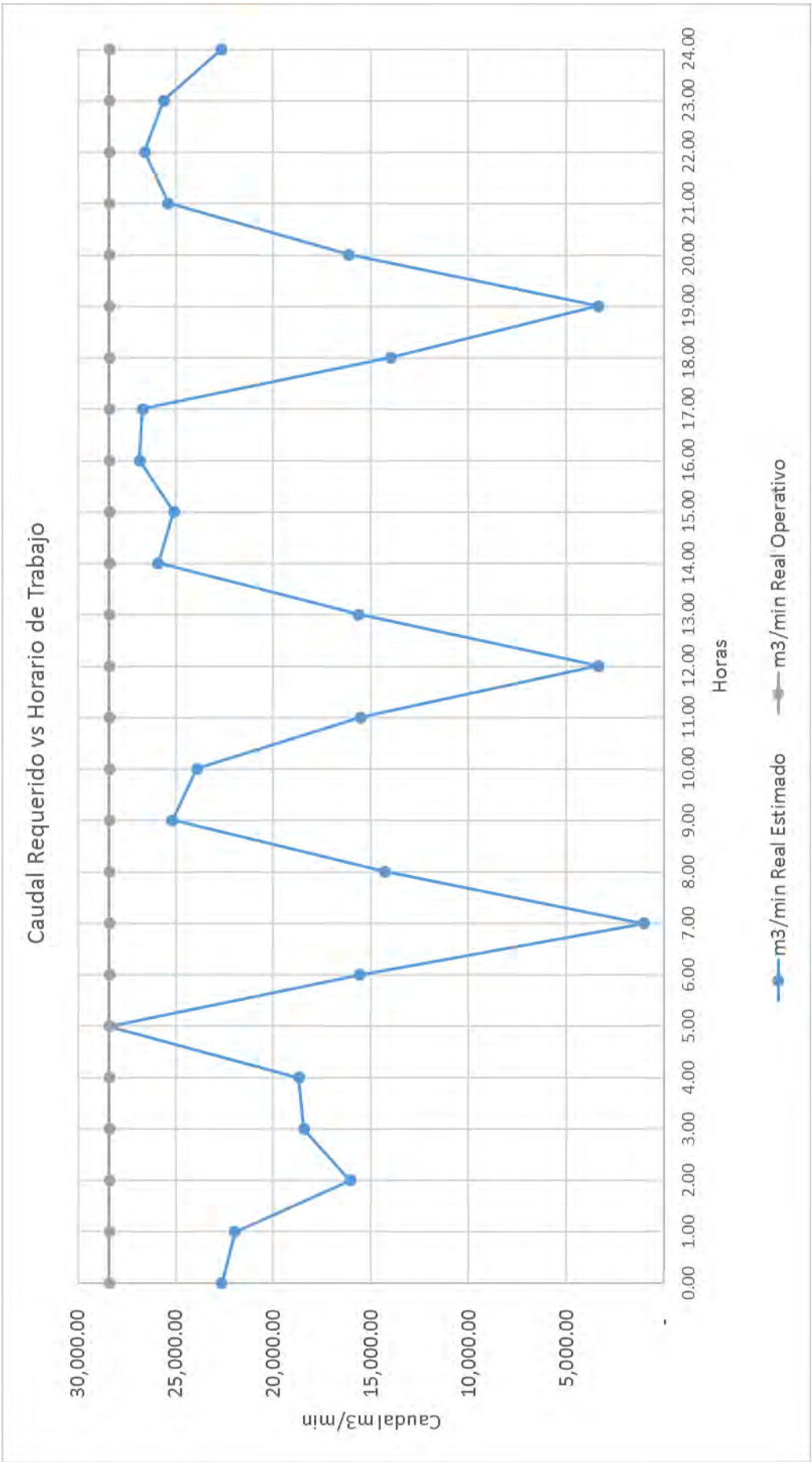


Figura 27 – Comparación de demanda de aire estimada vs real operativa (fuente: elaboración propia)

Según lo estimado se identifica que el valor pico es de 28 389 m<sup>3</sup>/min, lo cual tiene concordancia con lo estimado inicialmente en la demanda de aire actual (28 000 m<sup>3</sup>/min). Este valor permite definir un nivel promedio de caudal que cumple la demanda, sin embargo, no es un valor optimizado debido a que no representa la cantidad real del caudal necesitado. Esto se logra precisar si se comparan las áreas totales de los gráficos y se calcula el caudal diario suministrado de ambas alternativas (véase Figura 28).

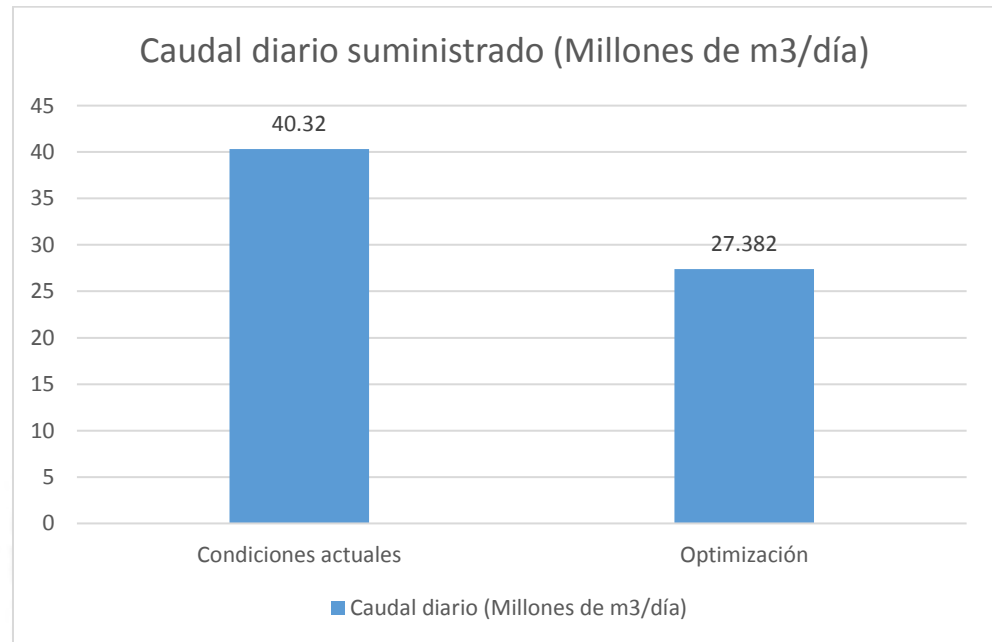


Figura 28 – Comparación volumétrica de caudal diario suministrado

$$\text{Sobredimensión: } \frac{Q_{\text{suministrado}}}{Q_{\text{Requerido}}} = \frac{40\,320\,000}{27\,382\,230} \quad (32)$$

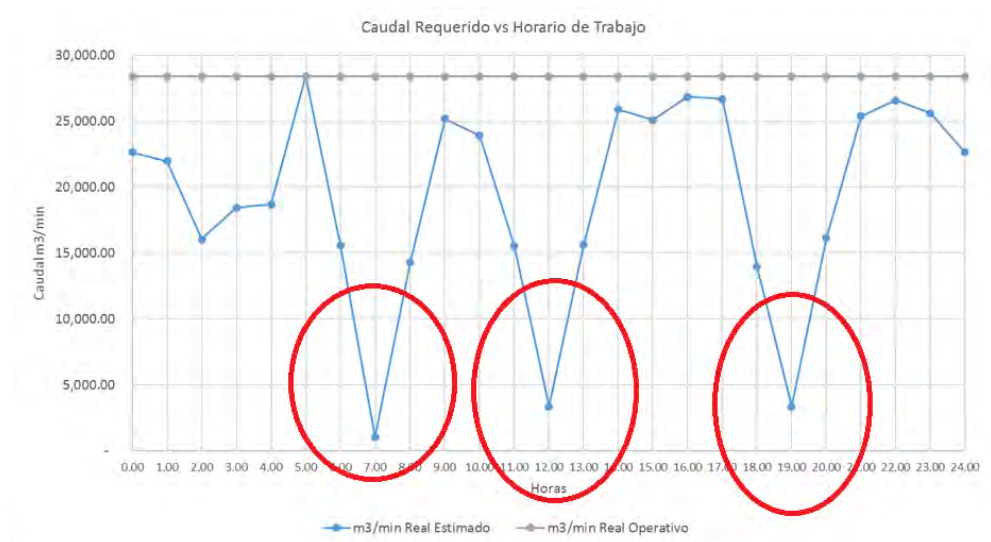
$$\text{Sobredimensión: } 149,29\% \quad (33)$$

Una vez identificadas las demandas horarias se puede iniciar la designación de escenarios de ventilación según la demanda horaria. Estos escenarios tendrán distintos flujos según la cantidad total de aire requerida en el horario establecido, lo cual generara una reducción de la eficiencia sobredimensionada anteriormente calculada.

La cantidad y duración de los escenarios recomendados será definida según lo estimado en la gráfica de distribución de requerimiento de caudales horarios. La Figura 29 muestra que existen tres puntos de cambio en el flujo

(7 am, 12 pm y 7 pm), los que coinciden con las voladuras programadas. Esto permitirá dividir la jornada en 4 escenarios según el siguiente horario:

- Escenario 1: de 12:00 am a 7:00 am
- Escenario 2: de 7 am a 12:00 pm
- Escenario 3: de 12:00 pm a 7:00 pm
- Escenario 4: de 7:00 pm a 12:00 am



*Figura 29 - Picos inferiores de demanda de aire dentro de la jornada de trabajo diaria (fuente: elaboración propia)*

Una vez establecidos los escenarios se procede a calcular el área de cada uno de los tramos establecidos y definir niveles promedio equivalentes, de modo tal que cada escenario cumpla con las demandas requeridas por el sistema (véase Figura 30).

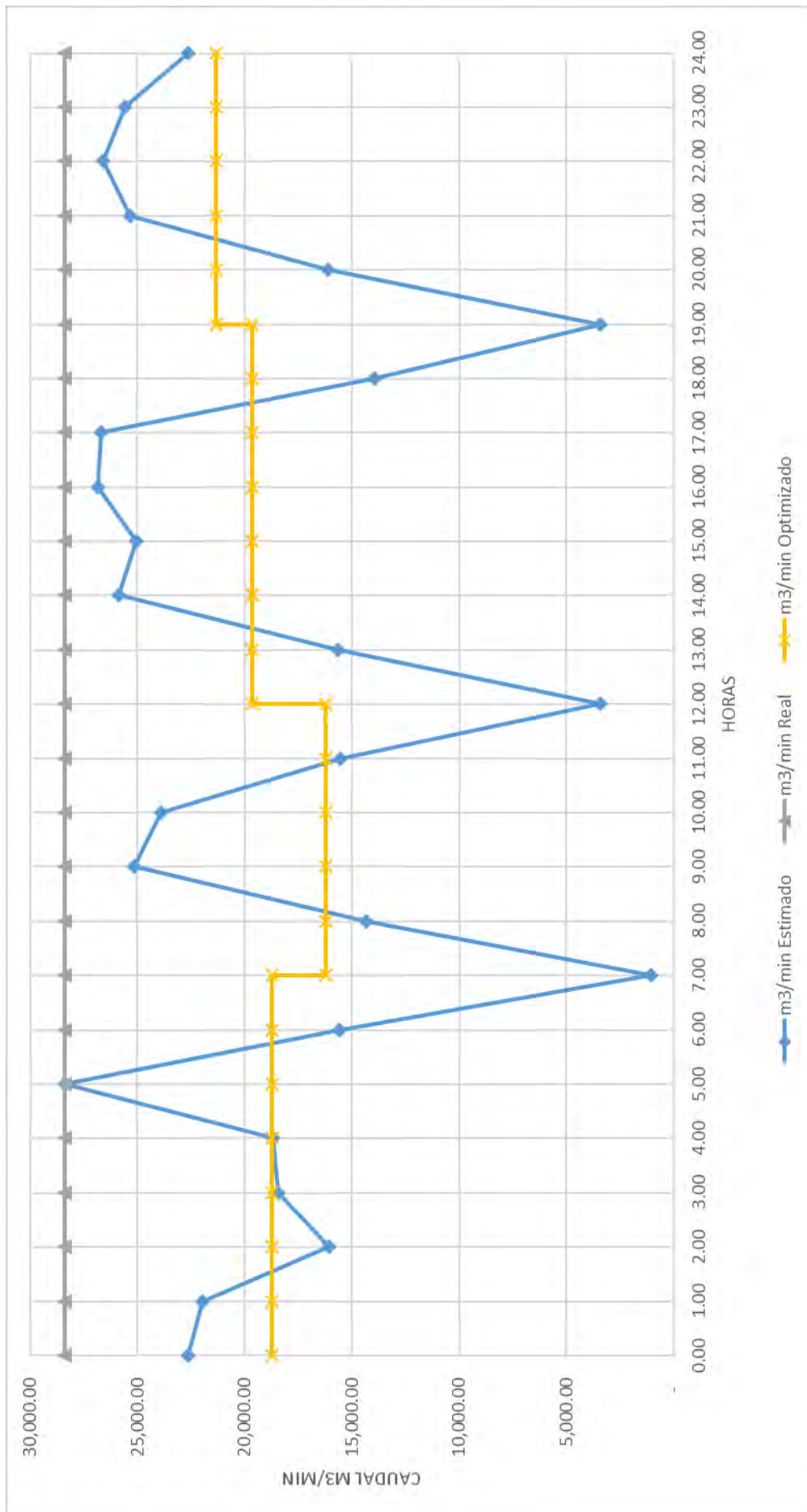


Figura 30 - Demanda de Caudal según jornada de trabajo (fuente: elaboración propia)

Los caudales equivalentes quedan expresados de la siguiente forma:

- Escenario 1: de 12:00 am a 7:00 am – 18 711,64 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 2: de 7 am a 12:00 pm – 16 230,60 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 3: de 12:00 pm a 7:00 pm – 19 642,93 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 4: de 7:00 pm a 12:00 am – 21 347,10 m<sup>3</sup>/min

Finalmente, se aplica un factor de seguridad de 30% con el fin de asegurar el requerimiento de aire del sistema. Este valor podrá ser ajustado según los futuros requerimientos de la empresa o la variación de los equipos utilizados en la mina (véase Figura 31).

- Escenario 1: de 12:00 am a 7:00 am – 24 325,14 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 2: de 7 am a 12:00 pm – 21 099,78 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 3: de 12:00 pm a 7:00 pm – 25 535,31 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 4: de 7:00 pm a 12:00 am – 27 751,23 m<sup>3</sup>/min

Redondeando:

- Escenario 1: de 12:00 am a 7:00 am – 24 000,00 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 2: de 7 am a 12:00 pm – 21 000,00 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 3: de 12:00 pm a 7:00 pm – 26 000,00 m<sup>3</sup>/min
- Escenario 4: de 7:00 pm a 12:00 am – 28 000,00 m<sup>3</sup>/min



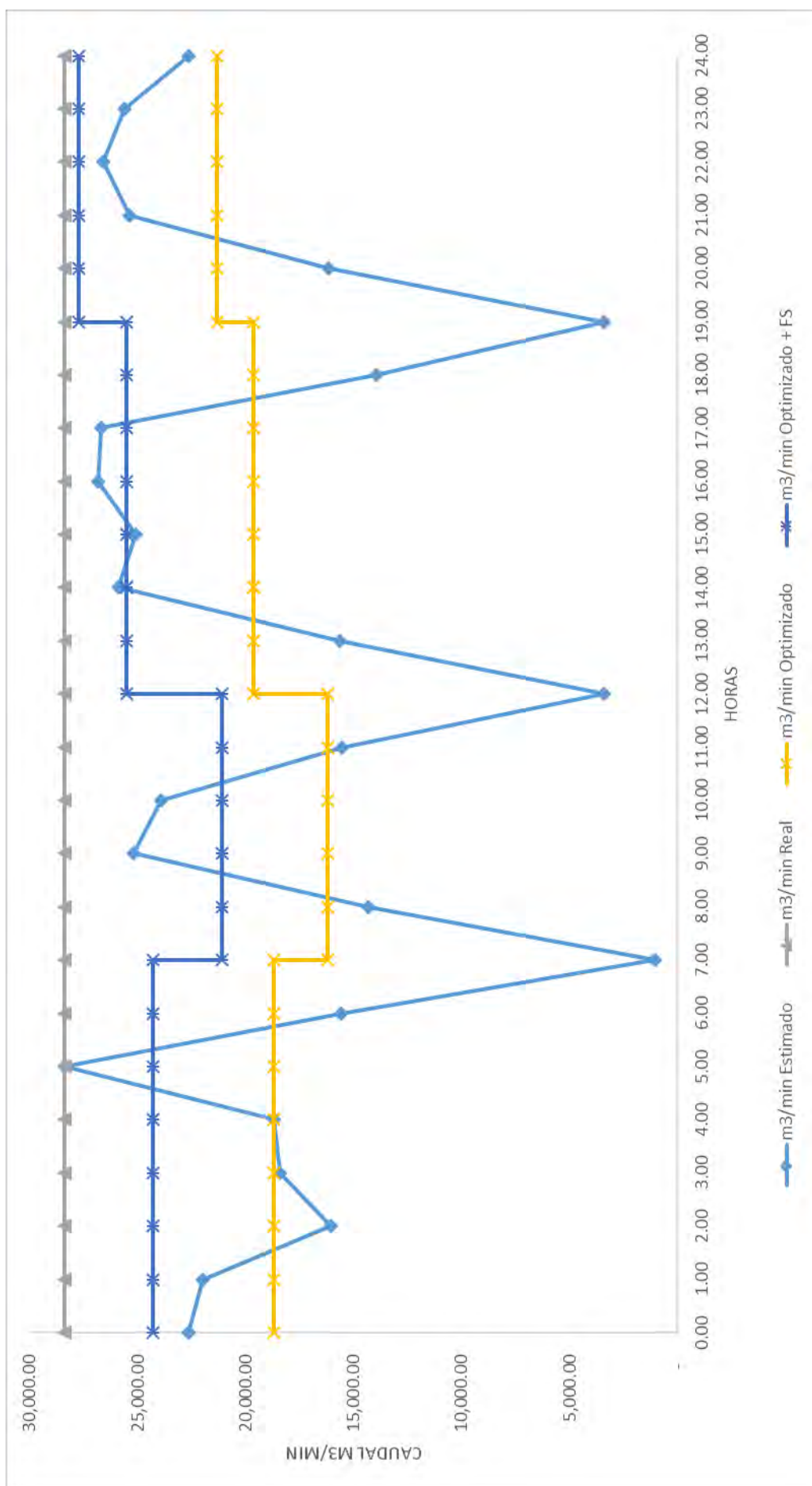


Figura 31 - Demanda de Caudal según jornada de trabajo (fuente: elaboración propia)

Por otro lado, al contar con una nueva disposición de caudales requeridos, se ve por necesario cambiar el ángulo de los alabes operativos de los ventiladores principales debido a que ya no se necesita de ese rango de caudales. Esta elección es considerada debido a que estos ventiladores son los de mayor capacidad y generan mayor consumo energético. Este cambio busca brindar las condiciones operativas que permitan brindar los caudales y potencia necesaria de acuerdo a lo dispuesto en cada escenario. El alabe operativo cambiara de 32,5° a 20°.

Luego, se comienza el proceso de ajuste del voltaje, lo cual reducirá el caudal suministrado por el ventilador según los escenarios previamente identificados (El-Nagdy, 2013). A continuación, se mostrará los cambios porcentuales en la eficiencia de los ventiladores (generada por los cambios de voltaje) y se mostrará el costo anual / diario de cada alternativa, mostrando al final el costo total de la propuesta de mejora y se comparará al inicialmente calculado.

- Escenario 1 - reducción de voltaje 50%: La Figura 32 muestra la curva característica del ventilador bajo dicha configuración. La Figura 33 muestra el resultado de la estimación de costos bajo dicha configuración.

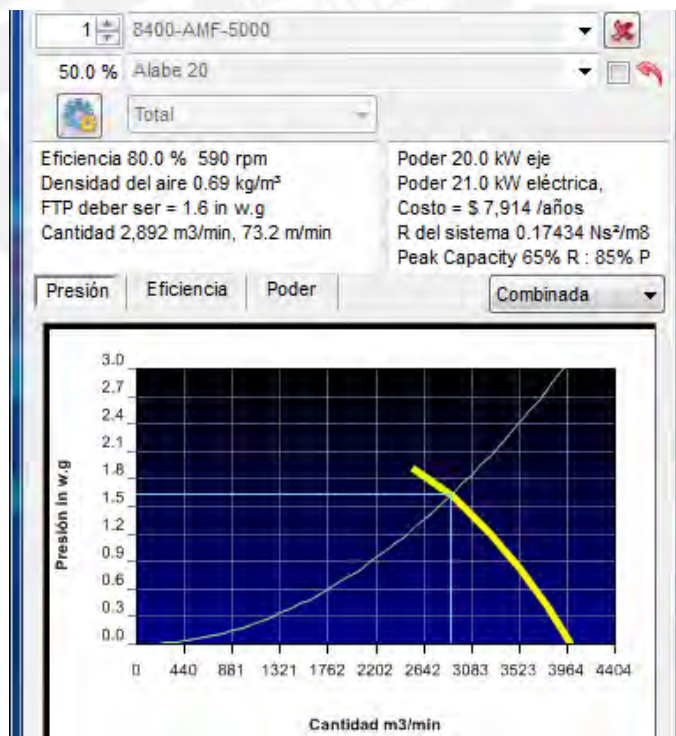


Figura 32 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 1 (fuente: elaboración propia)

| RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA                   |   |
|---|---|
| Flujo de aire compresible                       | Si  |
| La presión de ventilación natural               | Si  |
| Tipo de simulación de la presión del ventilador | Método de la presión total  |
| Conductos de ventilación                        | 2857 y 426 Exclusión  |
| Longitud total                                  | 66.614,1 m  |
| Caudal de aire total de admisión                | 24,092 m <sup>3</sup> /min  |
| Caudal de aire total de escape                  | 24,598 m <sup>3</sup> /min  |
| Flujo de masa total                             | 280,21 kg/s   |
| Resistencia de la mina (sin tubo)               | 0,00595 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>   |
| Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto) | 0,00595 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>   |
| RESUMEN DE POTENCIA                             |   |
| Potencia del AIRE (pérdida por fricción)        | 397,4 kW Total<br>335,2 kW Chimenea<br>62,2 kW Conducir<br>0,0 kW Conducto de ventilac... |
| Refrigeración Potencia de entrada               | 0,0 kW  |
| <b>Potencia eléctrica de ENTRADA</b>            | <b>415,7 kW</b>   |
| <b>Costo de energía anual de la red</b>         | <b>\$ 156,589</b>   |
| <b>Eficiencia de la red</b>                     | <b>95,6 %</b>   |
| Que consta de ..                                |   |
| 7 Ventiladores                                  | 415,7 kW  |
| 0 Presiones fijadas                             | 0,0 kW  |
| 0 Flujos fijados                                | 0,0 kW  |
| 0 Refrigeración                                 | 0,0 kW  |

Figura 33 - Resultado preliminar de costos anuales – Escenario 1 (fuente: elaboración propia)

Costo: US\$ 156 589,00/año, US\$ 429,01/día, US\$ 17,88/hora

Caudal suministrado: 24 092,00 m<sup>3</sup>/min

Caudal requerido: 24 000,00 m<sup>3</sup>/min

Reducción de Voltaje: 50%

- Escenario 2 - reducción de voltaje 60%: En este caso, el valor original de reducción era de 65%, sin embargo, al estar en el límite de la curva del ventilador (fenómeno de bombeo – stall), se recomienda aumentar la cantidad de voltaje suministrado con el fin de no llegar al rango crítico superior. La Figura 34 muestra la curva característica del ventilador bajo dicha configuración. La Figura 35 muestra el resultado de la estimación de costos bajo dicha configuración.

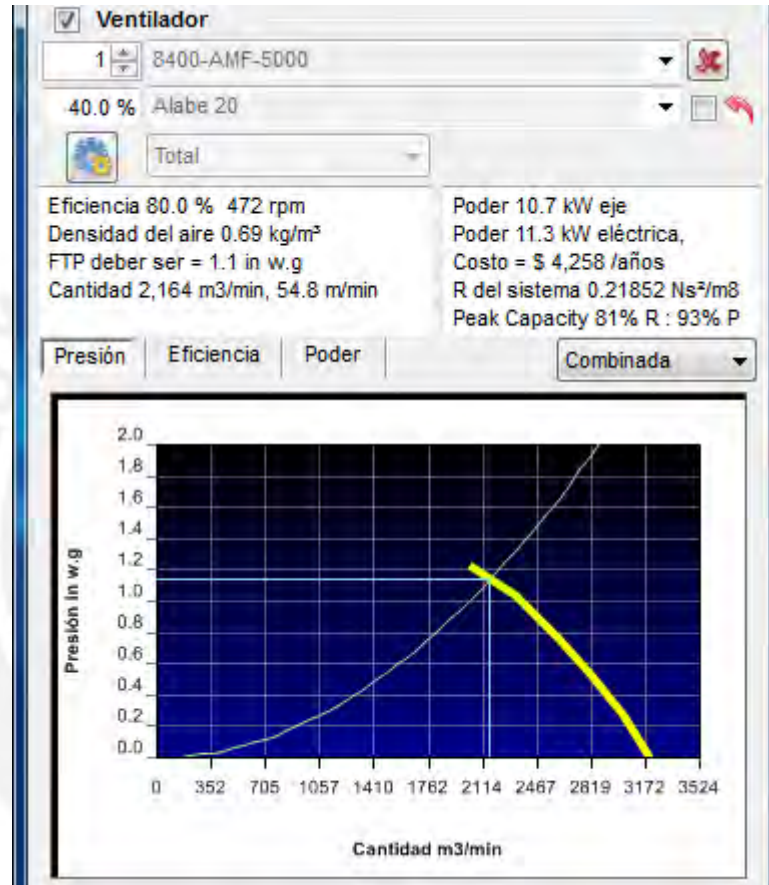


Figura 34 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 2 (fuente: elaboración propia)

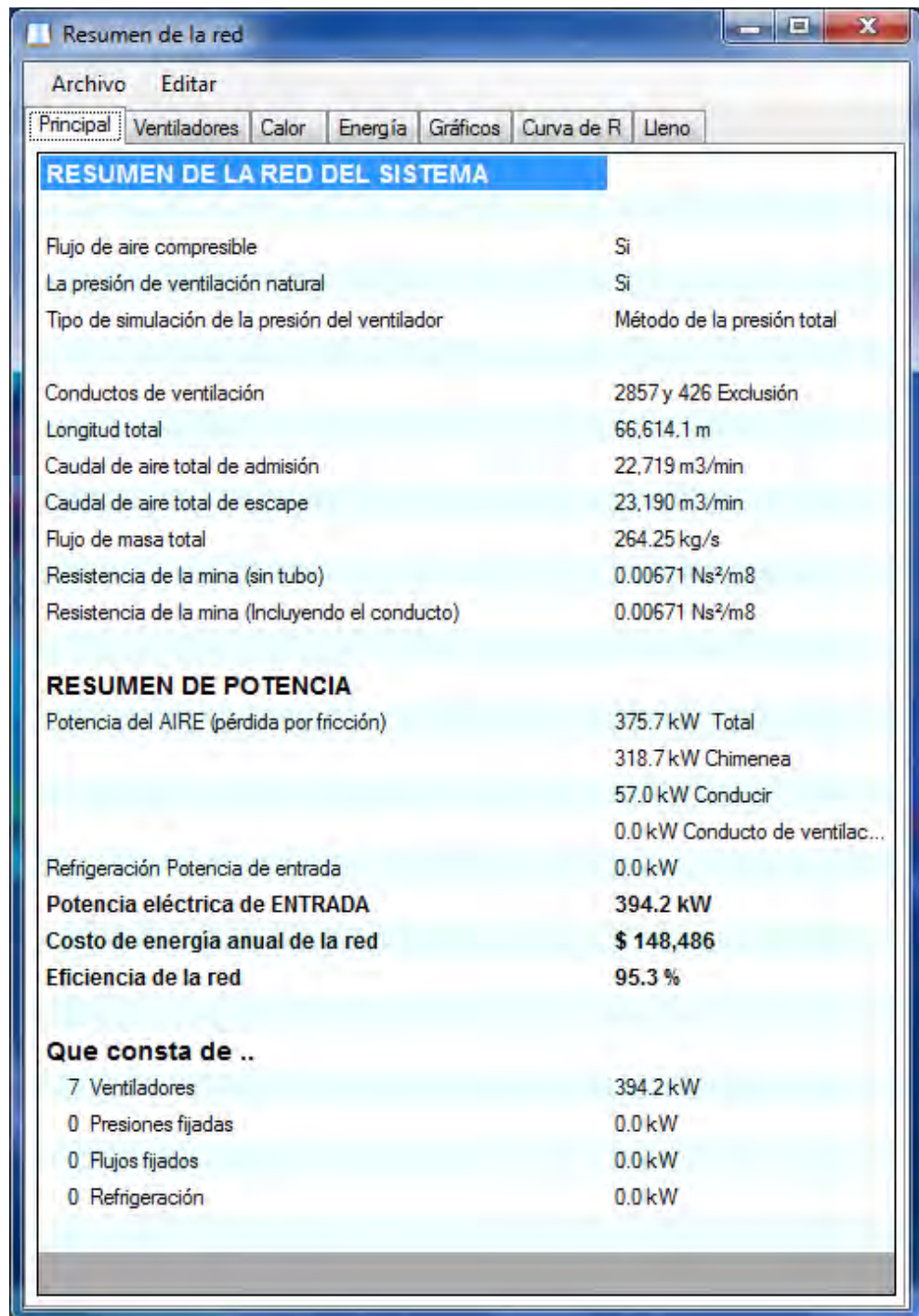


Figura 35 - Resultado Preliminar de Costos Anuales – Escenario 2 (fuente: elaboración propia)

Costo: US\$ 148 486,00/año, US\$ 406,81/día, US\$ 16,95/hora

Caudal suministrado: 22 719,00 m<sup>3</sup>/min

Caudal requerido: 21 000,00 m<sup>3</sup>/min

Reducción de Voltaje: 60%

- Escenario 3 - reducción de voltaje 35%: La Figura 36 muestra la curva característica del ventilador bajo dicha configuración. La Figura 37 muestra el resultado de la estimación de costos bajo dicha configuración.

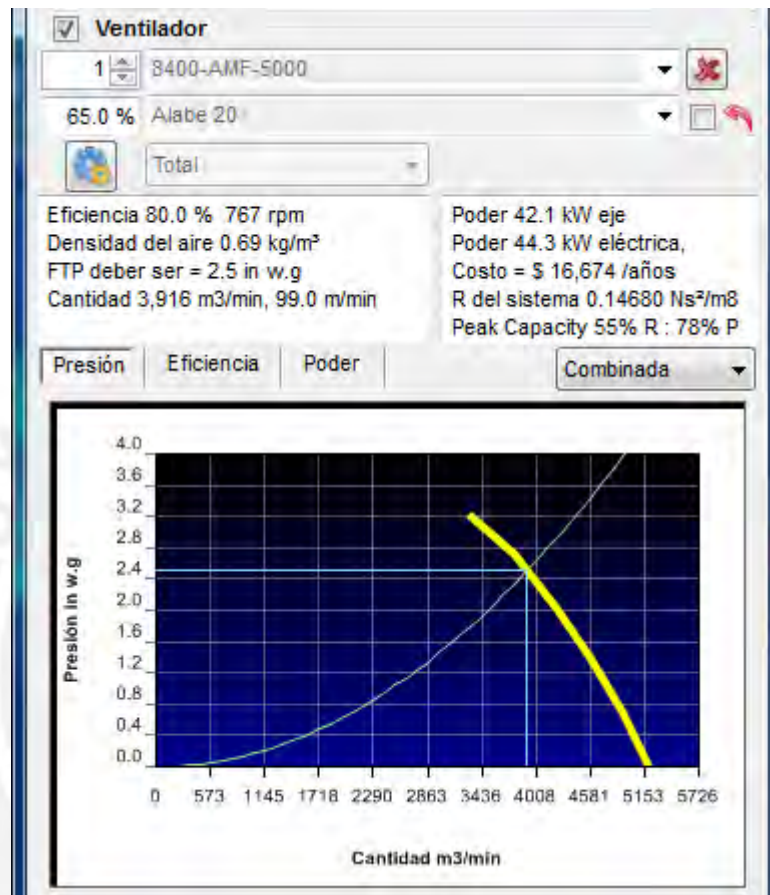


Figura 36 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 3 (fuente: elaboración propia)

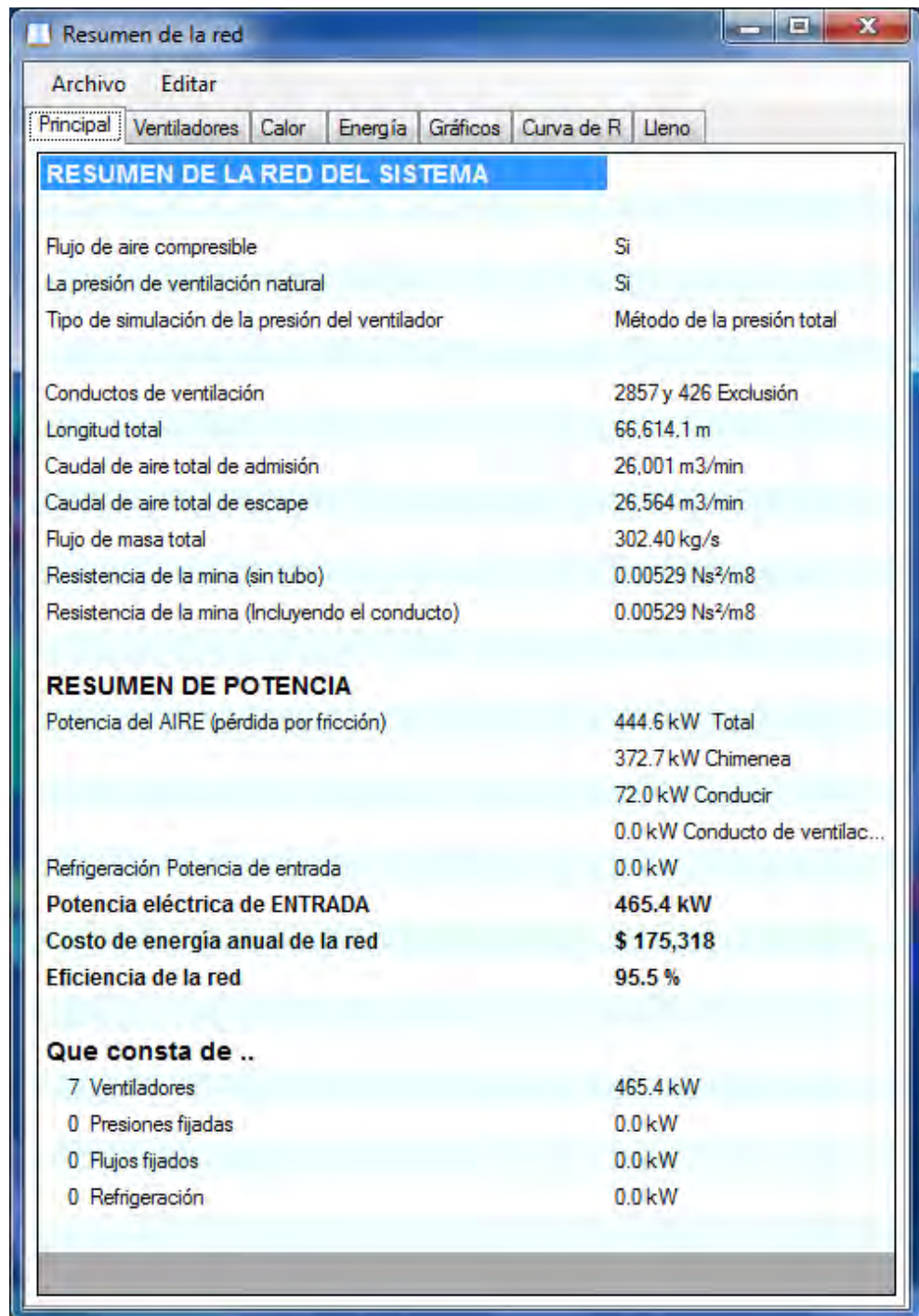


Figura 37 - Resultado Preliminar de Costos Anuales – Escenario 3 (fuente: elaboración propia)

Costo: US\$ 175 318,00/año, US\$ 480,32/día, US\$ 20,01/hora

Caudal suministrado: 26 001 m<sup>3</sup>/min

Caudal requerido: 26 000,00 m<sup>3</sup>/min

Reducción de Voltaje: 35%

- Escenario 4 - reducción de voltaje 18%: La Figura 38 muestra la curva característica del ventilador bajo dicha configuración. La Figura 39 muestra el resultado de la estimación de costos bajo dicha configuración.

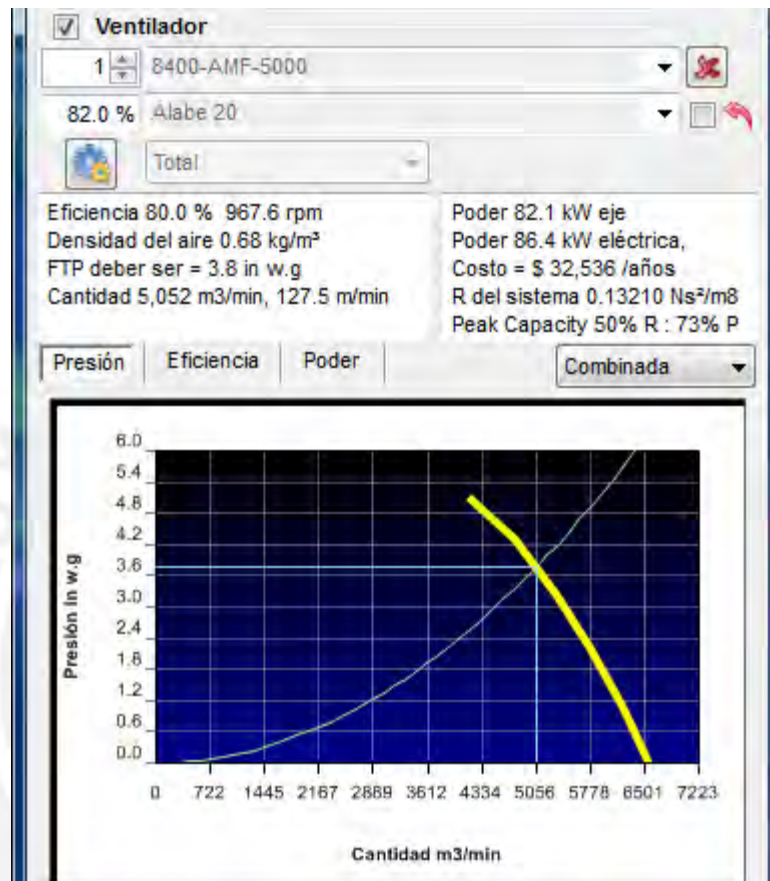


Figura 38 - Variación de Caudal/Voltaje en Escenario 4 (fuente: elaboración propia)



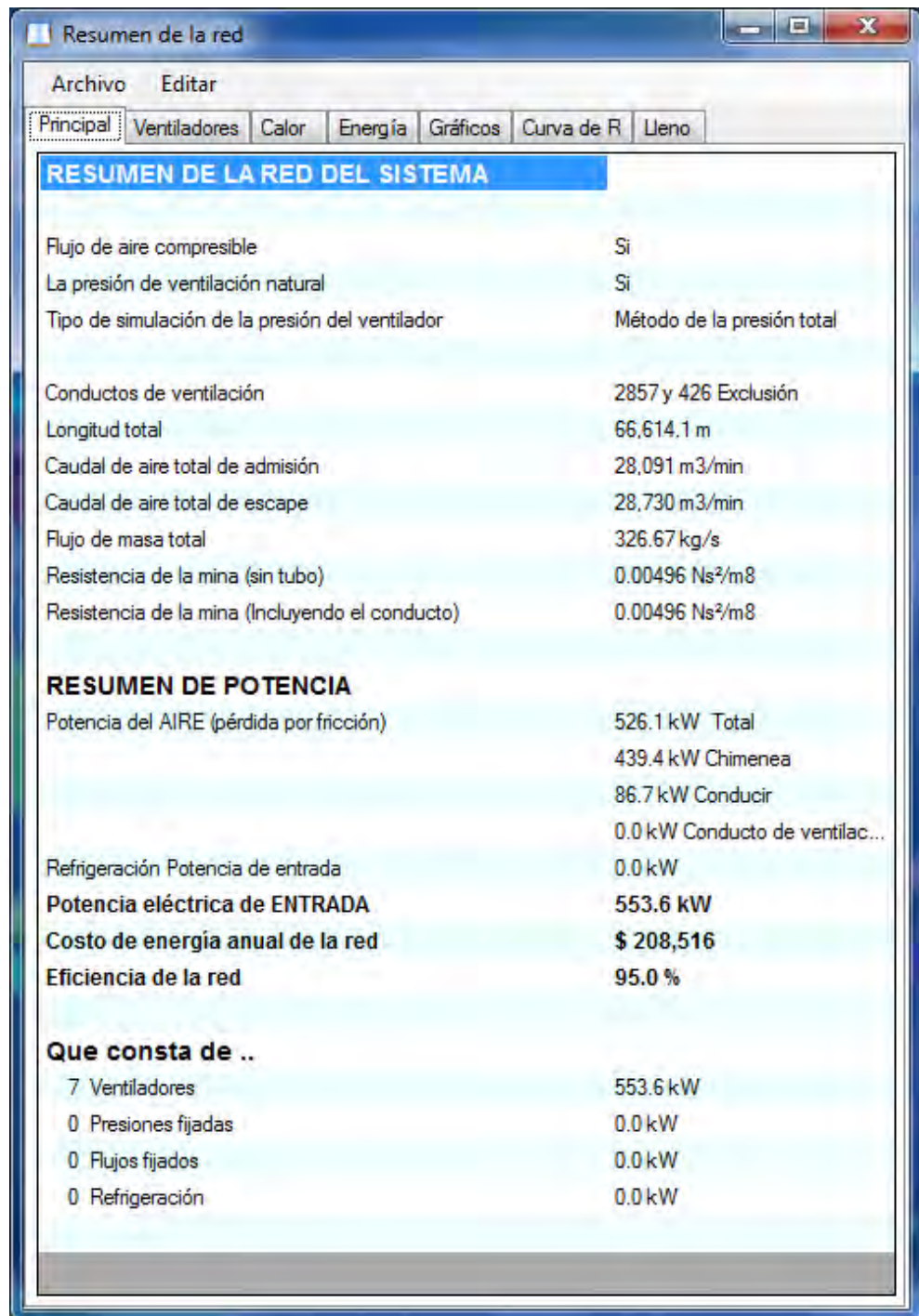


Figura 39 - Resultado Preliminar de Costos Anuales – Escenario 4 (fuente: elaboración propia)

Costo: US\$ 208 516,00/año, US\$ 571,28/día, US\$ 23,80/hora

Caudal suministrado: 28 091,00 m<sup>3</sup>/min

Caudal requerido: 28 000,00 m<sup>3</sup>/min

Reducción de Voltaje: 18%

Finalmente, se calcula el costo diario total de los cuatro escenarios planteados anteriormente (véase Tabla 20).

*Tabla 20 – Cálculo de Costo Total Diario Equivalente*

|             | Horario               | Caudal<br>Requerido<br>(m3/min) | Caudal<br>Suministrado<br>(m3/min) | Costo<br>Horario<br>(US\$/hr) | Costo<br>Total<br>(US\$/día) |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Escenario 1 | 12:00 am a<br>7:00 am | 24 000,00                       | 24 092,00                          | 17,88                         | 125,16                       |
| Escenario 2 | 7:00 am a<br>12:00 pm | 21 000,00                       | 22 719,00                          | 16,60                         | 83,00                        |
| Escenario 3 | 12:00 pm a<br>7:00 pm | 26 000,00                       | 26 001,00                          | 16,95                         | 118,65                       |
| Escenario 4 | 7:00 pm a<br>12:00 am | 28 000,00                       | 28 091,00                          | 20,01                         | 100,05                       |
|             |                       |                                 |                                    | <b>Total<br/>Diario</b>       | <b>426,86</b>                |

### 11.3.2. Resultados obtenidos tras la aplicación de la Fase 3

Tras la ejecución e implementación de los nuevos parámetros operativos podemos observar las siguientes diferencias (véase Tabla 21).

*Tabla 21 – Comparación de Resultados tras Aplicación de Fase 3*

|                | Inicial         | Final           |
|----------------|-----------------|-----------------|
| Costo Diario   | US\$ 1101,42    | US\$ 426,86     |
| Costo Anual    | US\$ 402 019,00 | US\$ 150 804,00 |
| Sobredimensión | 150%            | 130%            |
| Ahorro         |                 | 62,49%          |

## 12. Conclusiones

- Se presentó un procedimiento estructurado para el mejoramiento del sistema de ventilación principal de la mina basado en tres conceptos: la mejora de las condiciones actuales, la redistribución del aire en la mina en la profundización y la construcción de dos raise borer (RB-641 y RB-791) uno de gran diámetro RB-641 de 3,3m, principalmente se propone instalar construir los raise borer, para alcanzar el requerimiento de caudal de ingreso a mina, de acuerdo al reglamento de seguridad D.S. 024-2016.
- La primera propuesta de optimización logró reducir en un 30% el nivel de concentración de gases contaminantes dentro del sistema. Sin embargo, los niveles más profundos de la red aún contienen niveles no aceptables de monóxido de carbono dentro del marco legal. Esto podrá ser remediado analizando el sistema secundario de ventilación mediante mangas y ventiladores secundarios en un posterior estudio.
- La segunda propuesta de optimización logro reducir el costo operativo OPEX de ventilación en un 62% gracias al control de consumo energético/potencia dentro de los ventiladores principales de la red. Cabe resaltar que esta reducción no perjudica la calidad del aire circulante y cumple con los requisitos mínimos establecidos por la normativa legal peruana.
- A la fecha es común que las minas manejen su ventilación mediante ensayo y error. Es posible minimizar los errores de este costoso proceso iterativo mediante la utilización de herramientas avanzadas de simulación como el VentSim que permite simular las diferentes alternativas antes de ser construidas.
- De la comparación de eficiencia al inicio y final con la implementación de los raise borer, se tiene una disminución de 0,05 KW/m<sup>3</sup>/min, sin embargo, con la implementación de los variadores de frecuencia se plantea manejar el caudal de aire de ingreso, lo cual genera reducciones drásticas en el consumo energético de la mina.
- El cálculo de demanda de aire por equipos debe ser llevado de manera más controlada debido a que representa más del 90% del requerimiento total. Esto se vio comprobado al comparar la demanda calculada con un simple factor de simultaneidad frente a un cronograma de trabajo diario especificado.

- El sobredimensionamiento de la red de ventilación es algo común dentro de las empresas mineras debido a que se suele brindar más aire del necesario como factor de seguridad para el personal, no obstante, el requerimiento de aire por las personas no es comparable al requerido por los equipos, por lo que el factor de seguridad debe ser ajustado de manera responsable, de modo tal que no se incurra en gastos innecesarios.



### 13. Recomendaciones

- Se recomienda tener mayor control en el diseño de componentes subterráneos y en la actualización de labores inoperativas y/o clausuradas, esto debido a que el modelo computacional puede dejar de ser efectivo si las condiciones reales son distintas a lo especificado al momento de la simulación.
- Se debe pensar en un plan de actualización de modelo de ventilación de manera sistemática, de modo tal que se tenga control de los flujos en la profundización.
- En el corto plazo se debe mejorar la hermeticidad de los muros de aislamiento de la mina. Esto se refiere al cierre de labores antiguas o que ya no se explotan. Identificar y cerrar las chimeneas internas y externas que propician la recirculación. Adicionalmente se deben disminuir las pérdidas de choque para incrementar la eficiencia del sistema.
- En el mediano plazo se plantea la construcción de dos raise borer uno de gran diámetro de 3,3 m y 270 m de longitud con la posibilidad de seguir descendiendo hacia los niveles inferiores de la mina, lográndose de este modo centralizar la ventilación en un troncal principal de ventilación y manejar la ventilación auxiliar mediante ramificaciones de este troncal principal. Por otro lado, la construcción del RB-791 de 2,4 m de diámetro cumplirá la función de llevar aire fresco desde el RB-790 a la zona de profundización directamente, es importante mencionar que la veta principal se estrangula en la profundización por ende la importancia de centralizar la mayor cantidad de aire fresco en la mina.
- La instalación de estaciones fijas de monitoreo de calidad de aire dentro de rampas y tajos principales permitirá un mejor control del sistema de ventilación, dando información en tiempo real sobre el estado de las labores principales de extracción.

#### 14. Bibliografía

- Botín, J. A., & Vergara, M. A. (2015). A cost management model for economic sustainability and continuous improvement of mining operations. *Resources Policy*, 46, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.004>
- Chatterjee, A., Zhang, L., & Xia, X. (2015). Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Applied Energy*, 146, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.134>
- Chen, K., Si, J., Zhou, F., Zhang, R., Shao, H., & Zhao, H. (2015). Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.11.001>
- De Souza, E. (2007). Optimization of Complex Mine Ventilation Systems With Computer Network Modelling. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(11), 323–329. <https://doi.org/10.3182/20070821-3-CA-2919.00049>
- De Souza, E. (2017). Application of ventilation management programs for improved mine safety. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 647–650. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.018>
- El-Nagdy, K. A. (2013). Stability of multiple fans in mine ventilation networks. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(4), 569–571. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.07.016>
- Feng, W., Zhu, F., & Lv, H. (2011). The use of 3D simulation system in mine ventilation management. *Procedia Engineering*, 26, 1370–1379. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2313>
- Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V, & Wang, Y. J. (1997). *Mine Ventilation and Air Conditioning* (3rd ed.). New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: Wiley.
- Hongqing, Z., Zeyang, S., Meiqun, Y., Zheng, L., & Jian, L. (2011). Theory Study on Nonlinear Control of Ventilation Network Airflow of Mine. *Procedia Engineering*, 26, 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2214>
- Hustrulid, W. ., & Bullock, R. . (2001). *Underground Mining Methods*. (W. . Hustrulid & R. . Bullock, Eds.). Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

- Kursunoglu, N., & Onder, M. (2015). Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the Analytic Hierarchy Process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 48, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.02.005>
- LI, M., & WANG, X. rong. (2009). Performance evaluation methods and instrumentation for mine ventilation fans. *Mining Science and Technology*, 19(6), 819–823. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60149-6](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60149-6)
- MEM. Decreto Supremo 024-2016-MEM Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (2016). Perú.
- Ni, W., Liu, B., & Gai, W. (2011). The research on integrated visual information management system of the mine ventilation and safety. *Procedia Engineering*, 26(February 1987), 2070–2074. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2407>
- Wallace, K., Prosser, B., & Stinnette, J. D. (2015). The practice of mine ventilation engineering. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(2), 165–169. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.02.001>
- Wu, X. S., & Topuz, E. (1998). Analysis of Mine Ventilation Systems Using Operations Research Methods, 5(4).
- Yun, S., & Hai-ning, W. (2011). Study and Application on Simulation and Optimization System for the Mine Ventilation Network. *Procedia Engineering*, 26, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2163>