



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**Análisis de flujos de aire con base en la sección del túnel  
para ventilación de minas subterráneas de carbón**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

**RICARDO FRANCO ZAMBRANO LOAYZA**

**Director:**

**GIL TARQUINO ÁLVAREZ PACHECO**

**Codirector:**

**MOISÉS OSWALDO BUSTAMANTE RÚA**

**CUENCA, ECUADOR**

**2017**

## **DEDICATORIA**

Dedico de manera especial este trabajo a mis padres quienes han sido el pilar fundamental para la construcción de mi vida profesional, apoyándome siempre de forma incondicional y sembrando en mí valores, virtudes y deseos de superación.

A mis hermanos, amigos y demás familiares que de una u otra manera me han apoyado a lo largo de mi formación profesional, permitiéndome culminar esta etapa tan importante de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente agradezco a la Universidad Del Azuay por haber permitido ser parte de ella y abrirme sus puertas para poder estudiar mi carrera profesional, de igual manera a los diferentes docentes que día a día nos compartieron sus conocimientos y experiencias para poder salir adelante.

De igual forma quiero agradecer a la Universidad Nacional de Colombia con sede Medellín por permitirme realizar mi trabajo de grado en sus instalaciones, brindándome todo el apoyo necesario por parte de sus diferentes docentes y acceso a las herramientas requeridas para llevar a cabo mi trabajo.

Agradezco de manera especial al Ing. Alan José Daza Aragón por asesorarme a lo largo de todo el desarrollo de mi tesis, compartiendo sus conocimientos y experiencias en el tema.

Mi agradecimiento también va dirigido a los ingenieros: Gil Tarquino Álvarez Pacheco (director de la tesis), Moisés Oswaldo Bustamante Rúa PhD. (Codirector de la tesis), y Fernando Valencia Guaricela (Coordinador de la Escuela de Ingeniería En Minas), por su constante apoyo a lo largo de todo el desarrollo de la tesis.

Y para finalizar, agradezco a todos mis amigos y compañeros de clases a lo largo de toda nuestra formación académica, ya que gracias a su amistad y compañerismo han aportado de gran manera el deseo de seguir adelante en mí carrera profesional.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción.....	3
1.2. Marco legal.....	3
1.3. Marco Teórico.....	23
1.3.1. Orificio equivalente.....	23
1.3.2. Circuito de ventilación.....	24
1.3.3. Atmósfera minera.....	24
1.3.4. Objetivo de la ventilación .....	27
1.3.5. Leyes de ventilación.....	28
1.3.6. Ventilación.....	28
1.3.7. Tipos de ventilación.....	30
1.3.8. Resistencia y obstáculos en ventilación.....	32
1.3.9. Barrera de polvo o agua.....	33
1.3.10. Labor minera pulverulenta.....	34
1.3.11. Cálculos y criterios técnicos.....	34
1.3.12. Elección del ventilador y cálculo del reparto de caudales.....	37
1.3.13. Evaluación de resultados.....	38
1.3.14. Ventilación principal.....	38
1.3.15. Tipos de ventiladores.....	39
1.3.16. Acoplamiento de ventiladores.....	44
1.3.17. Inversión de la corriente.....	45

1.3.18.	Criterios de selección de ventilación secundaria.....	46
1.3.19.	Recomendaciones para la ventilación secundaria .....	47
1.3.20.	Metodología para la medida de aforos de ventilación.....	48
1.3.21.	Aforo de galerías .....	49
1.3.22.	Medida en puertas. ....	52
1.4.	Conclusiones. ....	53
<b>CAPÍTULO 2:DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>		<b>54</b>
2.1.	Introducción.....	54
2.2.	Datos generales de la mina “El Bloque” .....	54
2.2.1.	Hidrografía y fisiografía.....	55
2.2.2.	Clima y vegetación.....	56
2.2.3.	Estratigrafía .....	56
2.2.4.	Geología estructural .....	57
2.3.	Optimización de la red de ventilación. ....	57
2.3.1.	Ingreso y levantamiento de información.....	58
2.3.2.	Topografía y puntos de aforo de ventilación.....	59
2.3.3.	Hoja de datos levantados en el campo. ....	61
2.4.	Simulación de ventilación natural y actual de la mina. ....	62
2.4.1.	Simulación de ventilación natural.....	62
2.4.2.	Simulación con circuito de ventilación actual. ....	65
2.4.3.	Análisis de la simulación natural y actual de la mina. ....	69
2.5.	Simulación de alternativas de ventilación propuestas. ....	70
2.5.1.	Simulación con reubicación de ventiladores.....	72
2.5.2.	Simulación colocando nuevos sellamientos.....	76
2.5.3.	Simulación combinada. ....	80
2.5.4.	Simulación con ampliación de galerías principales .....	84
2.5.5.	Análisis de simulaciones alternativas.....	88
2.6.	Cálculo de orificio equivalente.....	89
2.7.	Conclusiones. ....	91
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>94</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>95</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Límites permisibles de gases.....	7
Tabla 1.2. Límites máximos en porcentaje de metano.....	13
Tabla 1.3. Categorización de minas de carbón .....	17
Tabla 1.4. Grado de dificultad de una mina a ser ventilada.....	24
Tabla 1.5. Gases frecuentes, efectos que producen y origen de los mismos.....	26
Tabla 1.6. Tipo de ventiladores centrífugos.....	40
Tabla 1.7. Tipo de ventiladores axiales.....	43
Tabla 1.8. Criterios de selección de ventilación secundaria .....	46
Tabla 2.1. Ubicación de accesorios de ventilación en la mina El Bloque.....	59
Tabla 2.2. Hoja de datos obtenidos en el campo.....	61
Tabla 2.3. Comparación de resultados entre simulaciones.....	89
Tabla 2.4. Orificio equivalente de cada simulación.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de ventilación natural.....	30
Figura 1.2. Esquema de tipos básicos de ventilación auxiliar de desarrollo.....	32
Figura 1.3. Resistencias en diagonal.....	37
Figura 1.4. Ventilador centrífugo para minería.....	40
Figura 1.5. Ventilador axial en mina subterránea .....	42
Figura 1.6. Circuito de ventilación en serie .....	44
Figura 1.7. Circuito de ventilación en paralelo .....	45
Figura 1.8. Criterios de selección del parámetro K.....	50
Figura 1.9. Orden de medidas con el anemómetro .....	51
Figura 2.1. Topografía de la mina El Bloque.....	60
Figura 2.2. Ventilación natural de la mina.....	63
Figura 2.3. Resultados de simulación del sistema de ventilación natural.....	64
Figura 2.4. Caudales de aire actuales de la mina en m <sup>3</sup> /s.....	65
Figura 2.5. Velocidades del aire actuales de la mina en m/s.....	66
Figura 2.6. Temperatura de bulbo húmedo actual en °C.....	67
Figura 2.7. Resumen del sistema de ventilación actual.....	68
Figura 2.8. Caudales de aire simulación 1 en m <sup>3</sup> /s.....	72
Figura 2.9. Velocidad de flujos de aire simulación 1 en m/s.....	73
Figura 2.10. Temperatura bulbo húmedo simulación 1 en °C.....	74
Figura 2.11. Resumen del sistema de ventilación simulación 1.....	75
Figura 2.12. Caudales de aire simulación 2 en m <sup>3</sup> /s.....	76
Figura 2.13. Velocidad de flujos de aire simulación 2 en m/s.....	77
Figura 2.14. Temperatura bulbo húmedo simulación 2 en °C.....	78
Figura 2.15. Resumen del sistema de ventilación simulación 2.....	79
Figura 2.16. Caudales de aire simulación 3 en m <sup>3</sup> /s.....	80
Figura 2.17. Velocidad de flujos de aire simulación 3 en m/s.....	81
Figura 2.18. Temperatura bulbo húmedo simulación 3 en °C.....	82
Figura 2.19. Resumen del sistema de ventilación simulación 3.....	83
Figura 2.20. Caudales de aire simulación 4 en m <sup>3</sup> /s.....	84
Figura 2.21. Velocidad de flujos de aire simulación 4 en m/s.....	85
Figura 2.22. Temperatura bulbo húmedo simulación 4 en °C.....	86
Figura 2.23. Resumen del sistema de ventilación simulación 4.....	87

## ÍNDICE DE ANEXOS

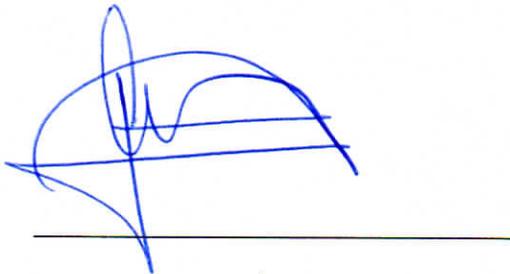
Anexo 1. Boca mina.....	95
Anexo 2. Ventilador secundario a succión de tipo axial de 7 [HP] .....	95
Anexo 3. Punto de monitoreo de CH4 en el nivel 15. ....	96
Anexo 4. Trampa de material calcáreo utilizado en la mina.....	96
Anexo 5. Tapón en frentes ya explotados, estableciendo el circuito de ventilación.	97
Anexo 6. Cortinas de banda clavada del 34 mina El Bloque.....	97

# ANÁLISIS DE FLUJOS DE AIRE CON BASE EN LA SECCIÓN DEL TÚNEL PARA VENTILACIÓN DE MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN

## RESUMEN

La ventilación de minas es un tema de gran relevancia dentro del estudio de ambientes mineros subterráneos, ya que garantiza adecuadas condiciones de trabajo para las personas que allí laboran. Por tal razón, con el desarrollo de este estudio, se pretende ayudar a mejorar los sistemas de ventilación dentro de la mina “El Bloque” que se encuentra ubicada en el municipio de Fredonia - Colombia perteneciente a la cuenca carbonífera de Sinifaná en el Suroeste de Antioquia (Colombia), los cuales pueden verse afectados por las secciones de los túneles que se manejan dentro de las minas. A través del software Ventsim se buscará simular algunos escenarios posibles en cuanto a forma y tamaño de las secciones, que permitan manejar caudales acorde a los requerimientos de aire establecidos por el decreto 1886 de 2015.

**Palabras clave:** Orificio equivalente, Software VentSim®, sistemas de ventilación, atmósfera minera, resistencias de ventilación.



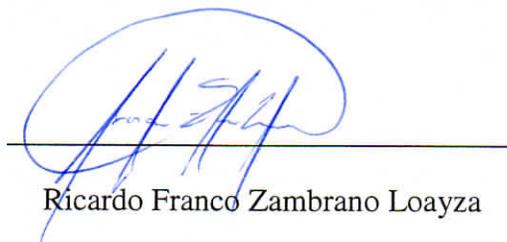
Gil Tarquino Álvarez Pacheco

**Director del Trabajo de Titulación**



Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Coordinador de Escuela**



Ricardo Franco Zambrano Loayza

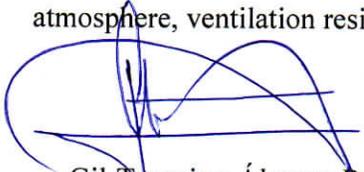
**Autor**

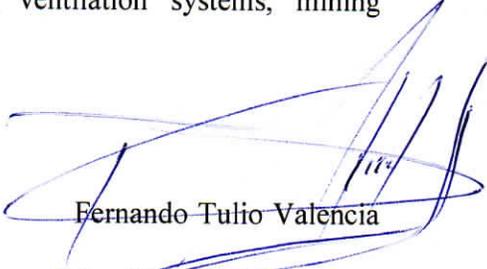
**ANALYSIS OF AIR FLOWS WITH A BASE ON THE TUNNEL SECTION FOR  
UNDERGROUND COAL MINES VENTILATION**

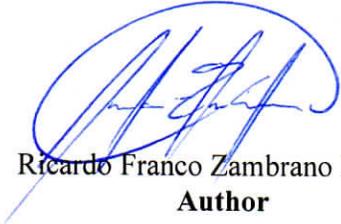
**ABSTRACT**

Mine ventilation is a topic of great relevance within the study of underground mining environments, as it guarantees adequate job conditions for the people who work there. Therefore, this study was aimed to help improve ventilation systems within "El Bloque" mine, as they could be affected due to the tunnels sections that are inside the mines. This mine is located in the municipality of Fredonia – Colombia, which is part of the *Sinifana* coalfield basin in the Southwest of Antioquia (Colombia). The objective was to simulate through VentSim® software, some possible scenarios in relation to the shape and size of the sections, so as to allow the handling of flows according to ventilation requirements established by decree number 1886 of 2015.

**Keywords:** equivalent orifice, VentSim® software, ventilation systems, mining atmosphere, ventilation resistances.

  
Gil Tarquino Álvarez Pacheco  
Guaricela  
**Thesis Director**

  
Fernando Tulio Valencia  
**School Coordinator**

  
Ricardo Franco Zambrano Loayza  
**Author**

Ricardo Franco Zambrano Loayza

Trabajo de Titulación

Ing. Gil Tarquino Álvarez Pacheco (Mgt)

Marzo, 2017

## **ANÁLISIS DE FLUJOS DE AIRE CON BASE EN LA SECCIÓN DEL TÚNEL PARA VENTILACIÓN DE MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN**

### **INTRODUCCIÓN**

Indudablemente, uno de los mayores problemas en la minería subterránea de carbón, ha estado relacionado con la ventilación al interior de las minas, lo cual ha favorecido las acumulaciones de gases, polvos y el desarrollo de incendios y explosiones. Estas últimas han desencadenado grandes pérdidas humanas y materiales en minas de diversas partes del mundo, por lo que un ineficiente sistema de ventilación genera ambientes inadecuados de trabajo, que trae como consecuencias:

- Cansancio prematuro
- Dificultad para respirar
- Fatigas
- Enfermedades pulmonares
- Un incremento considerable de temperatura

Todas estas consecuencias dificultan aún más las diferentes labores que se realizan al interior de la mina.

Debido a estos problemas generados por un ineficiente sistema de ventilación hemos decidido que durante el desarrollo de este trabajo se analizará cuidadosamente de qué forma afecta la forma y sección de una labor minera subterránea en la ventilación de las minas con la finalidad de mejorar y optimizar un sistema de ventilación reduciendo el riesgo laboral del personal y mejorando la atmósfera de trabajo lo cual contribuirá a una mayor productividad y eficiencia para la empresa.

A través del análisis del caso particular de la mina “El Bloque”, se pretende evaluar la influencia del tamaño y la forma en la sección de los túneles, con el fin de determinar cómo afecta esta condición el paso normal del aire al interior de la mina y nos permita caracterizar el grado de dificultad de la mina a ser ventilada con base en la tabla 1.4.

Se cree que en la medida en que las secciones de los túneles sean más amplias, se disminuye la resistencia de la mina a ser ventilada considerablemente facilitando el paso de aire y favoreciendo el ambiente de trabajo en la mina. Es por esto que con el uso del software de ventilación VentSim® se podrá realizar diferentes simulaciones con cambios que nos permitan determinar cuál es el mejor sistema de ventilación para la mina, a través del cual se cumpla con las especificaciones planteadas en el decreto N° 1886 del 2015 del Ministerio de Energía y Minas de la Republica de Colombia y además observar dichos cambios que se generan al variar las secciones de menor a mayor tamaño, de tal manera que se pueda corroborar si existe un gran impacto al realizar dichas variaciones.

## CAPÍTULO 1

### ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Introducción

En este capítulo se revisará todo lo temas relacionados con el trabajo desde diferentes aspectos como: el marco legal aplicable al proyecto, el estado del arte en ventilación de minas subterráneas de carbón, referencias bibliográficas necesarias para facilitar el entendimiento del tema de estudio y criterios de estudio necesarios para llevar a cabo de forma correcta los cálculos requeridos en un correcto sistema de ventilación.

#### 1.2. Marco legal

En vista de que el proyecto se llevó a cabo en una mina subterránea de carbón en Colombia se tomó en consideración para la aplicación de la normativa legal los artículos establecidos en el decreto 1886 del 21 de Septiembre de 2015 de la República de Colombia, en el cual se hace referencia de todos los temas descritos en cuanto a la ventilación en minería. Mediante este decreto se puede observar cuales son los reglamentos de ventilación para labores mineras subterráneas de carbón, las cuales se citaran a continuación:

#### **Aire respirable para dispositivos de protección personal:**

Es el aire comprimido o suministrado a través de una línea de aire y debe reunir como mínimo los siguientes requisitos:

1. Contenido de Oxígeno: mínimo 19.5%, máximo 23.5 % en volumen
2. Condensado de hidrocarburos (aceite de lubricación) menor o igual a 5 mg/m<sup>3</sup> de aire
3. Concentración de Monóxido de Carbono menor a 10 ppm
4. Concentración de Dióxido de Carbono menor de 1000 ppm
5. Libre de olores y de otros contaminantes
6. Reducir al mínimo el contenido de humedad de modo que el punto de rocío a una atmósfera de presión es 5,56° C por debajo de la temperatura ambiente
7. Temperatura óptima del aire debe ser de 25° C ± 4°C (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

## **Artículo 11. Obligaciones del titular del derecho minero**

### **Literales:**

4. Identificar, medir y priorizar la intervención de los riesgos existentes en las labores subterráneas y de superficie que estén relacionadas con estas que puedan afectar la seguridad, o la salud de los trabajadores
12. Garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos de medición necesarios para la identificación, prevención y control de los riesgos, incluyendo metanómetro, oxigenómetro, medidor de CO, de CO<sub>2</sub>, bomba detectora de gases y/o multidetector de gases; psicrómetro y anemómetro
13. Asegurar la realización de mediciones ininterrumpidas de oxígeno, metano, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico y demás gases contaminantes, antes de iniciar las labores y durante la exposición de los trabajadores en la explotación minera y mantener el registro actualizado en los libros y tableros de control
14. Garantizar el mantenimiento y calibración periódica de los equipos de medición, conforme a las recomendaciones del fabricante, con personal certificado y autorizado para tal fin
22. Tomar medidas preventivas y precauciones que garanticen la detección, la alarma y extinción de incendios y la ocurrencia de explosiones.
23. En caso de grave peligro para la seguridad y la salud, garantizar que las operaciones se detengan y los trabajadores sean evacuados a un lugar seguro (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

## **Artículo 12. Obligaciones de los trabajadores**

### **Literales:**

3. Utilizar en forma permanente y correcta los elementos y equipos de protección personal y demás dispositivos para la prevención y control de riesgos, procurando además, su mantenimiento y conservación
7. De acuerdo con las instrucciones recibidas por parte de la autoridad competente, colaborar en la extinción de incendios y en las acciones de salvamento minero.
9. Procurar el cuidado integral de su salud (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

### **Artículo 35. Plan de ventilación**

Toda labor minera subterránea debe tener un plan de ventilación en un término de seis meses, contados a partir de la publicación del presente reglamento, el cual debe contener como mínimo:

1. Nombre de la mina o labor subterránea, nombre de la empresa y nombre de la persona responsable del plan de ventilación
2. Persona o personas autorizadas para supervisar las siguientes actividades: inertización de la mina cuando sea el caso, suspensión de la ventilación, mantenimiento, reparación, actividades de prevención y las actividades contempladas en el artículo 45 y el párrafo 4 del artículo 46 del presente decreto
3. Las ubicaciones en plano y las condiciones operativas de los ventiladores
4. La ubicación de los puntos de aforo donde se realizarán las mediciones de material particulado, gases, explosivos y tóxicos, temperatura y de caudal de aire
5. La ubicación de los dispositivos, tales como reguladores o puertas reguladoras y conectores utilizados para controlar el movimiento del aire con áreas explotadas
6. La ubicación y la secuencia de la construcción de los sellos propuestos para cada área
7. La ubicación de ventiladores auxiliares cuando se requiere una cantidad mínima de aire en un frente de trabajo.
8. El nivel ambiente en partes por millón de monóxido de carbono, oxígeno y metano, en todos los puntos donde se realice monitoreo continuo
9. Protocolo de mantenimiento de los ventiladores
10. Registro de las capacitaciones realizadas al personal minero relacionadas con el tema de ventilación (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

### **Artículo 36. Calidad del aire en el sitio de trabajo**

Todas las labores mineras subterráneas accesibles al personal y aquellos lugares donde se localice maquinaria, deben estar recorridas de manera permanente por un volumen suficiente de aire capaz de mantener limpia la atmósfera de trabajo, en condiciones aceptables dentro de los valores límites permisibles. El aire que se introduzca a la labor minera subterránea debe estar exento de gases, humos, vapores o polvos nocivos o inflamables (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### **Artículo 37 Objetivos de la ventilación**

Los lugares donde se realicen labores mineras subterráneas por los trabajadores, deben estar ventilados de manera constante y suficiente, a fin de mantener una atmósfera en la cual:

1. El riesgo de igniciones y explosiones de metano y otros gases explosivos se haya eliminado o reducido al mínimo
2. El oxígeno sea adecuado para que se pueda respirar y se hayan neutralizado los gases o agentes nocivos que puedan existir en la atmósfera de la mina
3. Las concentraciones de polvo en el aire estén controladas y se mantengan dentro de los valores límites permisibles o en porcentajes que no sean nocivos para los trabajadores
4. Las condiciones de trabajo sean adecuadas teniendo en cuenta que el método de trabajo utilizado y el esfuerzo físico que realizan los trabajadores
5. Se mantenga la seguridad de los trabajadores para quienes trabajan o circulan por allí
6. Se cumpla con las normas aquí establecidas, sobre concentración de polvo, gases, radiación y condiciones climáticas, de acuerdo con los niveles establecidos por la normativa nacional vigente (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

### **Artículo 38. Volumen de oxígeno**

Ningún lugar de trabajo bajo tierra puede ser considerado apropiado para trabajar o transitar, si su atmósfera contiene menos del diecinueve coma cinco por ciento (19,5%), o más del veintitrés coma cinco por ciento (23,5%) en volumen de oxígeno (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### **Artículo 39. Valores límites permisibles para gases contaminantes**

En la atmósfera de cualquier labor subterránea, los valores límites permisibles (VLP) para los siguientes gases contaminantes son:

Tabla 1.1. Límites permisibles de gases

<b>GASES</b>	<b>FORMULA</b>	<b>TLV - TWA</b>	<b>TLV - STEL</b>
		<b>(ppm)</b>	<b>(ppm)</b>
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	5000	30000
Monóxido de Carbono	CO	25	-
Ácido Sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	1	5
Anhídrido Sulfuroso	SO <sub>2</sub>	-	0.25
Óxido Nítrico	NO	25	-
Dióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0.2	-

Fuente: (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

### **Artículo 40. Circuito de Ventilación Forzada**

Toda labor subterránea debe contar con un circuito de ventilación forzada. Dicho circuito debe ser calculado por un tecnólogo en minas, ingeniero de minas, ingeniero en minas, ingeniero de minas y metalurgia o por un especialista en ventilación de labores subterráneas (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### **Artículo 41. Encargado de la Supervisión de la Ventilación**

El responsable técnico de la labor minera subterránea debe nombrar en cada turno de trabajo, un encargado de la supervisión de la ventilación en todas las labores, quien deberá estar capacitado para tal efecto (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 42. Entrada y salida de aire**

En toda labor minera subterránea, las instalaciones para entrada y salida de aire deben ser independientes, con una distancia no inferior a los cincuenta metros (50 m) y obedecer a un diseño del circuito de ventilación, de acuerdo con lo señalado en este Reglamento (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 43. Mantenimiento de vías de ventilación**

Las vías de ventilación deben someterse a mantenimiento preventivo, para evitar posibles obstrucciones que puedan interrumpir el flujo normal del aire y serán accesibles al personal.

**Parágrafo.** Los ventiladores, puertas de regulación de caudales, medidores, sistemas de control y otros, deben estar sujetos a un riguroso plan de mantenimiento, del cual se llevarán los respectivos registros (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 44. Áreas de trabajo abandonadas**

Las áreas de trabajo antiguas o abandonadas que no estén ventiladas, deberán ser aisladas herméticamente del circuito de ventilación y señalizadas para evitar el tránsito de personal (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 45. Suspensión de la ventilación**

Para suspender la ventilación principal, la auxiliar o ambas en las labores de la Categoría II mencionadas en el artículo 58 de este Reglamento, es necesaria una orden previa escrita firmada por el responsable técnico de la labor subterránea o por la persona responsable de la ventilación, cuando ha sido delegado previamente por escrito por este, en la que se ordene la evacuación del personal y se prohíba el ingreso.

Posteriormente, cuando se restituya la ventilación principal o auxiliar y antes de autorizar el ingreso del personal, debe revisarse con el equipo de medición de gases, todos los frentes activos y las vías de tránsito de personal; esta decisión también debe quedar por escrito y reposar en los archivos de la empresa y en las instalaciones de la labor minera subterránea.

**Parágrafo 1.** Cuando por fallas del servicio de energía no haya ventilación, se debe evacuar inmediatamente el personal de la mina, incluyendo al encargado de labores de mantenimiento y bombeo de las aguas subterráneas.

**Parágrafo 2.** Al restituirse la ventilación y antes de la entrada del personal, el supervisor o el jefe inmediato debe verificar que las condiciones de la atmósfera al interior de la labor, cumplan con las disposiciones del presente Reglamento. Solo después podrá autorizar el ingreso del personal, de lo cual debe quedar evidencia por escrito (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 46. Equipos de medición de gases**

Todas las labores mineras subterráneas deben contar de forma permanente en sus instalaciones, con todos los equipos debidamente calibrados, que permitan la medición de gases, como Metano (porcentaje en volumen o porcentaje LEL), Oxígeno, Monóxido de Carbono, Ácido Sulhídrico, Gases Nitrosos y Bióxido de Carbono.

El responsable técnico de la labor subterránea determinará si otros gases deben ser monitoreados, lo cual debe quedar establecido en el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, SG-SST. Dichos equipos de medición deben contar con la certificación de cumplimiento mínimo de norma Ex, la cual se refiere a que son a prueba de explosión tipo intrínsecamente seguro a una falla y de protección de ingreso (IP) 65 o mayor.

**Parágrafo 1.** En toda labor minera subterránea deben efectuarse mediciones de los gases presentes en los frentes de trabajo, conforme a lo establecido en este Reglamento.

**Parágrafo 2.** Las mediciones de estos gases deben efectuarse como mínimo en los siguientes sitios:

1. Todos los frentes de trabajo bajo tierra
2. Los sitios bajo tierra donde se ubican equipos como: cabezas matrices y tambores de retorno de bandas transportadoras, panzers, equipos para bombeo de aguas subterráneas, sistemas de comunicación con superficie y subestaciones eléctricas bajo tierra
3. Vías principales de transporte
4. Vías de tránsito de personal
5. Comunicaciones con trabajos antiguos o abandonados
6. En cercanía a tabiques que aislen zonas incendiadas

El responsable técnico de la labor minera subterránea determinará aquellos sitios adicionales en los cuales sea necesario efectuar las mediciones.

**Parágrafo 3.** Los resultados de las mediciones de los gases deben ser publicados en el interior de la mina en tableros de registro y control y especialmente a la entrada de una labor en desarrollo, preparación y explotación; igualmente, en el libro de registro de control de gases de la labor. Adicionalmente los resultados de dichas mediciones deben ser divulgados a todos los trabajadores al inicio de cada turno.

**Parágrafo 4.** El supervisor o el jefe inmediato, debe anotar previamente a iniciar cada turno, los valores de los gases medidos en los frentes de avance. Se debe registrar igualmente la fecha, la hora y firma del supervisor.

**Parágrafo 5.** Cada uno de los equipos utilizados para la medición de gases en la mina deberá contar con una certificación del fabricante que especifique lo siguiente:

1. Que es apropiado para uso en minas subterráneas
2. Cumplir con los requisitos de protección de explosiones
3. Poder detectar el tipo de gas para el cual se esté utilizando
4. Ser preciso y fiable (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

#### **Artículo 47. Sistema de monitoreo permanente**

Las labores mineras subterráneas de carbón de la Categoría III establecidas en el artículo 58 de este Reglamento, además de contar con el equipo o equipos de medición, deben implementar un sistema de monitoreo permanente y continuo de metano y oxígeno, en las vías principales de transporte y ventilación, en:

1. Los frentes de avance y de explotación.
2. Los trabajos comunicados con el circuito de ventilación de la mina.
3. Las vías de circulación de personal (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 48. Sistema de monitoreo continuo de monóxido de carbono y oxígeno**

En las labores mineras subterráneas de carbón o material calcáreo, en donde se tengan focos activos de incendio, además de contar con los equipos de medición, debe implementarse un sistema de monitoreo permanente y continuo de Monóxido de Carbono (CO) y Oxígeno (O<sub>2</sub>) en los sitios definidos en el parágrafo 2° del artículo 46 de este Reglamento (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

**Artículo 49. Sistema de monitoreo cuando se utilicen vehículos con motor de combustión interna**

En las labores mineras subterráneas en donde se empleen vehículos con motor de combustión interna, además de contar con los equipos de medición señalados en este Reglamento, debe implementarse un sistema de monitoreo permanente y continuo de Monóxido de Carbono (CO) y Oxígeno (O<sub>2</sub>) en los sitios señalados en el párrafo 2° del artículo 46 de este Reglamento (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

**Artículo 50. Calibración de equipos**

Los equipos de medición de gases deben ser calibrados en un espacio libre de contaminación, con un gas patrón debidamente certificado y vigente, según las recomendaciones del fabricante o inmediatamente si falla la prueba de verificación. Las calibraciones deben ser realizadas por personal capacitado y entrenado (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

**Artículo 51. Prueba de verificación**

La prueba de verificación se debe realizar antes de cada uso o según la recomendación del fabricante del equipo. La lectura debe estar dentro del rango más o menos diez por ciento (+/- 10%) del valor estándar del gas patrón. Las pruebas de verificación deben ser realizadas por personal capacitado para tal fin (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

**Artículo 52. Registros de las mediciones, pruebas de verificación y calibración**

Las mediciones, pruebas de verificación y calibración deben ser trazables a través de registros y tableros de control de gases, los cuales deben estar disponibles cuando los requiera la autoridad minera, encargada de la administración de los recursos mineros o a quien esta delegue y ubicados en un lugar visible de la mina (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### Artículo 53. Suspensión de labores por concentración de metano

Los lugares y las concentraciones máximas permitidas de metano a partir de las cuales se deben suspender los trabajos y evacuar el personal de manera inmediata, serán los siguientes:

Tabla 1.2. Límites máximos en porcentaje de metano

Sitio de la labor subterránea	Porcentaje (%) máximo permisible de metano (CH <sub>4</sub> )	% LEL
En labores o frentes de explotación o avance.	1.0	20%
En los retornos principales de aire.	1.0	20%
En el retorno de aire de los tajos.	1.5	30%
En el retorno de aire de los frentes de preparación y desarrollo.	1.5	30%

Fuente: (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

**Parágrafo 1.** Superadas las concentraciones máximas señaladas, el personal de estas labores no puede ingresar o permanecer en los sitios de trabajo, hasta que se haya diluido el metano por debajo de los límites máximos permisibles establecidos, tarea que debe ser coordinada por el supervisor de turno. Cuando la concentración de metano sobrepase el dos por ciento (2%), a dichos lugares solo podrá ingresar personal de salvamento con los elementos y equipos de protección personal apropiados para esta operación, con el fin de diluir el metano por debajo de los valores máximos permisibles definidos en este Reglamento. Este personal además deberá:

1. Apagar inmediatamente los equipos de trabajo, excepto los sistemas de monitoreo continuo intrínsecamente seguros
2. Realizar inmediatamente los cambios o ajustes al sistema de ventilación para reducir la concentración del metano, a menos del uno por ciento (1%)
3. Reanudar las operaciones manuales o mecánicas hasta que la concentración del metano sea menor de uno por ciento (1%)

**Parágrafo 2.** El aire de retorno de frentes con ventilación auxiliar en labores subterráneas de las Categorías II y III de que trata el artículo 58 de este Reglamento, solo puede conducirse a frentes o tajos de explotación si no contiene más de cero coma cinco por ciento (0,5%) de metano (CH<sub>4</sub>).

**Parágrafo 3.** En vías mineras subterráneas donde haya cable o conductor eléctrico desnudo para movimiento de locomotoras Trolley, no se introducirán corrientes de ventilación con contenido de metano. En este caso, las líneas de contacto deben estar suficientemente alejadas del techo, con una distancia de mínimo cincuenta centímetros (50 cm) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 54. Cálculo del volumen mínimo de aire**

El volumen mínimo de aire que debe circular en cada labor subterránea, tiene que calcularse teniendo en cuenta el turno de mayor personal, la elevación de esta sobre el nivel del mar, los gases o vapores nocivos, los gases explosivos e inflamables y los gases producto de las voladuras, de acuerdo con los siguientes parámetros:

1. Excavaciones minerales hasta mil quinientos metros (1.500 m) sobre el nivel del mar: tres metros cúbicos por minuto (3 m<sup>3</sup>/min) por cada trabajador
2. Excavaciones mineras de mil quinientos metros (1.500 m) en adelante sobre el nivel del mar: seis metros cúbicos por minuto (6 m<sup>3</sup>/min) por cada trabajador

**Parágrafo 1.** Las cantidades mínimas de aire a que se refiere el presente artículo, deben ser incrementadas de acuerdo con la calidad y cantidad de los agentes nocivos presentes en la atmósfera, con el propósito de mantener unas condiciones de saneamiento adecuadas.

**Parágrafo 2.** En las labores mineras subterráneas donde haya tránsito de maquinaria Diésel (locomotoras, transcargadores, entre otros), debe haber el siguiente volumen de aire por contenido de Monóxido de Carbono (CO) en los gases del escape:

1. Seis metros cúbicos (6 m<sup>3</sup>) por minuto por cada caballo de fuerza (H.P.) de la máquina, cuando el contenido de monóxido de carbono en los gases del escape no sea superior de cero coma doce por ciento (0,12%); o mil doscientas (1.200) partes por millón ppm
2. Cuatro metros cúbicos (4 m<sup>3</sup>) por minuto por cada H.P. de la máquina, cuando el contenido de monóxido de carbono (CO) en los gases del escape no sea superior de cero coma cero ocho por ciento (0,08%), u ochocientas (800) partes por millón ppm (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

#### **Artículo 55. Prohibición de la ventilación por difusión**

Queda prohibida la ventilación por difusión, excepto en túneles o galerías avanzadas, hasta diez metros (10 m) a partir de la atmósfera libre o de la corriente principal de ventilación, donde no haya presencia de metano o de gases contaminantes de que trata el artículo 39 de este Reglamento, ni peligro de acumulación de los mismos (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 56. Velocidad de las corrientes de aire**

La velocidad media de una corriente de aire en minas de carbón, en el área máxima libre, no debe tener valores inferiores a los siguientes:

1. Excavaciones mineras con ventilación principal (Primaria):
  - Vías con locomotora Trolley: Un metro por segundo (1 m/s)
  - Vías de explotación (galería o sobreguía): cero coma cinco metros por segundo (0,5 m/s)

**2. Excavaciones mineras con ventilación auxiliar (Secundaria):**

- Vías en carbón: cero coma tres metros por segundo (0,3 m/s)
- Tambores, pozos o inclinados con avance hacia arriba: cero coma cinco metros por segundo (0,5 m/s)
- Bajadas, pozos o inclinados con avance hacia abajo: cero coma dos metros por se-gundo (0,2 m/s)
- Vías en roca: cero coma dos metros por segundo (0,2 m/s)

**3.** A una distancia de treinta metros (30) detrás del sitio donde está laborando el personal de un frente ciego, debe existir una velocidad mínima de diez metros por minuto (10 m/min). Lo anterior rige para frentes de recuperación, preparación y desarrollo en minas de carbón.

**Parágrafo 1.** La velocidad de una corriente de aire no debe exceder seis metros por segundo (6 m/s); lo anterior no rige para tambores, bajadas, inclinados, canales de ventilación, pozos o vías que no sirven para el tránsito normal de personal.

**Parágrafo 2.** La velocidad de la corriente de aire en tajos de explotación de carbón no debe sobrepasar de cuatro coma cinco metros por segundo (4,5 m/s) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

**Artículo 57. Verificación de caudales de ventilación**

Los caudales de ventilación que circulen en todas las vías de la labor minera subterránea, deben verificarse cada semana, o con una mayor frecuencia si el responsable técnico de la misma así lo determina; estas mediciones deben anotarse en el plano de ventilación, tableros y registros a que se ha hecho referencia en el presente Reglamento (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### Artículo 58. Clasificación de las labores mineras subterráneas de carbón

Para todos los aspectos relacionados con el presente Reglamento, las labores mineras subterráneas de carbón se clasifican en tres (3) categorías:

Tabla 1.3. Categorización de minas de carbón

<b>CATEGORÍA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
I. Minas o frentes de trabajo no grisutuosos.	Son aquellas labores o excavaciones subterráneas para las cuales la concentración de metano en cualquier sitio de la mina no alcanza el cero por ciento (0%).
<b>CATEGORÍA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
II. Minas o frentes débilmente grisutuosos.	Son aquellas labores o excavaciones subterráneas para las cuales la concentración de metano en cualquier sitio de la mina sea igual o inferior a cero coma tres por ciento (0,3%).
III. Minas o frentes fuertemente grisutuosos.	Son aquellas labores o excavaciones subterráneas para las cuales la concentración de metano en cualquier sitio de la mina sea superior a cero coma tres por ciento (0,3%).

Fuente: (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

### Artículo 59. Extracción del gas metano

En aquellos casos que el titular minero compruebe que en el área concesionada donde adelantará su proyecto minero de carbón subterráneo se encuentren volúmenes con altas concentraciones de metano, y considere que es viable su drenaje antes y/o durante el desarrollo de las labores de extracción del mineral, para autogeneración, uso o eliminación del mismo, estas labores deberán ser incluidas dentro del Plan de Trabajos y Obras (P.T.O.) o Programa de Trabajos e Inversiones (P.T.I.) o modificaciones a estos, presentado ante la autoridad minera para su evaluación y aprobación, ajustándose a las mejores prácticas internacionalmente aceptadas.

El gas extraído podrá ser utilizado en el proyecto minero o en caso de no ser utilizado el mismo, deberá ser quemado acorde con las estipulaciones técnicas que para este fin establezca la autoridad minera y ambiental.

**Parágrafo.** El seguimiento a la extracción y posterior uso del gas metano proveniente de la operación minera estará a cargo de la autoridad minera (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### **Artículo 60. Medición de las concentraciones de metano**

La concentración de metano en la atmósfera bajo tierra de las minas clasificadas en el artículo 58, se debe medir según los siguientes parámetros:

1. En la Categoría I, se debe controlar al iniciar cada turno y antes de iniciar cualquier voladura
2. En la Categoría II, se debe controlar al iniciar cada turno, antes de efectuar cualquier voladura o por lo menos cada dos (2) horas durante la jornada de trabajo
3. En la Categoría III, se debe controlar antes de iniciar cada turno y en forma permanente y continua en los sitios establecidos en el artículo 46 de este Reglamento

**Parágrafo 1.** Los resultados de estas mediciones deben ser registrados en tableros de control de gases ubicados dentro de la labor subterránea y en el libro de registro de control de gases de la mina.

**Parágrafo 2.** Las mediciones de metano deben efectuarse como mínimo en los sitios definidos en el parágrafo 2 del artículo 46 de este Reglamento (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### **Artículo 61. Ventilación en minas grisutuosas**

Para las labores clasificadas en la Categoría III del artículo 58 de este Reglamento, se debe proceder en la siguiente forma:

1. No se debe suspender la ventilación principal ni la auxiliar; si por cualquier causa:
  - a) Se suspende la ventilación principal en este tipo de explotaciones, se debe evacuar inmediatamente todo el personal de la mina o labor minera subterránea, incluyendo al personal encargado de labores de mantenimiento y bombeo de las aguas subterráneas, y comunicar la situación de manera inmediata a la autoridad de salvamento minero o quien haga sus veces
  - b) Se hace necesario suspender la ventilación auxiliar, se debe evacuar inmediatamente el personal de los frentes de trabajo afectados, esta medida debe ir precedida de una orden escrita del responsable técnico de la labor minera subterránea
2. El explotador minero debe disponer de una planta auxiliar de energía en superficie, que asegure continuidad en la ventilación principal y auxiliar de la mina, cuya capacidad dependerá de los requerimientos de los sistemas de ventilación y bombeo
3. Las corrientes de ventilación deben ser de forma horizontal o ascendente

Excepciones a esta disposición pueden ser autorizadas en cada caso por la autoridad minera, encargada de la administración de los recursos mineros

4. El suministro de aire respirable a frentes ciegos, horizontales o inclinados (tambores, bajadas, entre otros), debe hacerse con instalaciones de ventilación auxiliar, para avances de carbón cuya longitud sea superior a diez metros (10 m) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

## **Artículo 66. Clasificación de minas por contenido de polvo de carbón**

Una labor subterránea considerada dentro de la Categoría I del artículo 58 de este Reglamento, con respecto al metano, se clasifica como pulverulenta inflamable (polvo de carbón volátil muy fino), cuando el contenido de materias volátiles en el carbón que se explota, sea superior al dieciséis por ciento (16%), y una labor subterránea considerada dentro de las Categorías II y III respecto al metano (artículo 58), se clasifica como pulverulenta inflamable cuando el contenido de materias volátiles dentro del manto de carbón que se explota sea superior al catorce por ciento (14%).

**Parágrafo 1.** Para prevenir una explosión de polvo de carbón es necesario evitar que se presenten las siguientes condiciones de manera simultánea:

1. Presencia de polvo de carbón
2. Un tamaño de partículas que permita la propagación de la llama menor a cero coma cinco milímetros (0,5 mm)
3. Una atmósfera con oxígeno suficiente para mantener la combustión
4. Una nube de polvo con una concentración dentro del rango de explosividad
5. Una fuente con energía suficiente para la ignición
6. Que se supere el Límite Inferior de Explosividad (LEL) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

## **Artículo 67. Medidas de prevención para minas pulverulentas inflamables**

En las minas clasificadas como pulverulentas inflamables se deben tomar las siguientes medidas:

1. Evitar las acumulaciones de polvo
2. Humedecer los frentes de arranque y los puntos de cargue y descargue de mineral o estériles
3. Neutralizar los depósitos de polvo de carbón que se formen sobre los pisos, paredes y techos de las galerías principales de ventilación y transporte, con elementos tales como agua o polvo inerte de caliza, de acuerdo con las características definidas en el siguiente artículo

4. Ubicar barreras de polvo inerte de caliza o agua en las galerías principales de ventilación y transporte de carbón (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

#### **Artículo 68. Neutralización del polvo de carbón con polvo inerte de caliza**

En los procesos de neutralización con polvo inerte de caliza, se debe utilizar material a malla cuatrocientos (400) con un contenido de sílice menor del tres por ciento 3%.

**Parágrafo 1.** Esta neutralización debe hacerse frecuentemente con polvo inerte de caliza en porcentaje mínimo del ochenta por ciento (80%), de tal forma que el polvo de carbón sedimentado no contenga más de veinte por ciento (20%) de partes combustibles (método de empolvar con polvo inerte de caliza). La neutralización debe ser sometida a ensayos que evalúen y certifiquen su efectividad, lo cual es responsabilidad del explotador minero y los resultados deberán ser presentados a la autoridad minera.

**Parágrafo 2.** Queda prohibido emplear cal como material inerte en las barreras de polvo (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### **Artículo 69. Neutralización del polvo de carbón con agua**

Cuando la neutralización se hace con agua, las acumulaciones de polvo combustible deben mantenerse continuamente húmedas, de manera que este polvo tenga un contenido mínimo de agua del setenta y cinco por ciento (75%) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

**Artículo 70. Control de la propagación de explosiones de polvo de carbón**

Contra la propagación de explosiones de polvo de carbón, se deben instalar barreras de polvo inerte de caliza o recipientes con agua, teniendo en cuenta las siguientes normas:

1. Las barreras de polvo inerte de caliza o de agua contra explosiones se deben instalar en tramos de vías subterráneas, aproximadamente rectos, horizontales o inclinados, donde la sección sea lo más uniforme posible
2. Los tramos de vías rectos delante y detrás de la barrera contra explosiones, deben tener una longitud mínima de veinticinco metros (25 m)
3. En la zona donde se instale la barrera contra explosiones, debe indicarse en un tablero, la sección de la vía, así como el número de plataformas, la carga y el peso de esta, ya sea de polvo inerte de caliza o de agua
4. Las plataformas de las barreras de polvo inerte de caliza o agua, deben estar constituidas de tablonos no clavados y sin rebordes
5. El material inerte que se utiliza en las barreras de polvo, debe tener las mismas características del usado en los procesos de neutralización (artículo 68 de este Reglamento)
6. El material utilizado en los recipientes de las barreras de agua, debe ser lo suficientemente frágil, para que se rompa al ser alcanzado por un golpe de polvo o una onda explosiva. Estos recipientes deben tener sus correspondientes tapas para evitar evaporación y ser revisados y llenados periódicamente
7. Las barreras de polvo inerte de caliza o agua, deben ubicarse perpendiculares al eje de la galería o del inclinado
8. Las barreras de polvo inerte de caliza o agua que se utilizan para aislar sectores de explotación, deben contener por lo menos, cuatrocientos litros de material por metro cuadrado (400 l/m<sup>2</sup>) de sección transversal de la galería donde estén instaladas y su longitud debe ser inferior a ochenta metros (80 m)
9. Las barreras de polvo inerte de caliza o agua que se instalan en las galerías de transporte de carbón, deben contener por lo menos doscientos litros de material por metro cuadrado (200 l/m<sup>2</sup>) de sección transversal de la galería donde estén instaladas y su longitud debe ser inferior a cuarenta metros (40 m). Estas barreras deben estar señalizadas con colores reflectivos (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### 1.3. Marco Teórico

La ventilación garantiza un ambiente de trabajo adecuado, de esta manera la seguridad del personal y su salud no se ven afectadas por los diferentes contaminantes que se pueden encontrar al interior, y en caso de incendios ayuda a controlar el ambiente durante la evacuación e intervención de los equipos de emergencia. (McPHERSON).

#### 1.3.1. Orificio equivalente

Se define como orificio equivalente ( $\Omega$ ) de una mina, a la sección de un orificio de pared delgada, que crea la misma relación entre presión y caudal que el elemento definido por él. Suponiendo el aire en condiciones normales (presión barométrica de 760 mm de Hg. y  $t = 15^\circ\text{C}$ ). Ella está relacionada a la resistencia específica ( $R_e$ ) por la ecuación:

$$\Omega = 0.348 * \sqrt{\omega_o} * \frac{1}{\sqrt{R_e}}$$

Siendo  $\omega_o =$  densidad del aire inicial =  $1.2 \text{ Kg/m}^3$  se obtiene:

$$\Omega = \frac{0.38}{\sqrt{R_e}}$$

Esta magnitud, puede caracterizar una vía o varias vías bajo tierra o en general, el conjunto de elementos de una mina.

La noción de orificio equivalente presenta la ventaja de tener una significación física concreta; por este hecho es frecuentemente empleada; pero a menudo es más cómodo para efectos de cálculo, utilizar la noción de resistencia (Acerías Paz Del Río, 2006).

Además el orificio equivalente caracteriza claramente, en una mina cualquiera:

### “El grado de dificultad en la ventilación de la mina”

De acuerdo a las dificultades de ventilación, las minas se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo con la Tabla siguiente:

Tabla 1.4. Grado de dificultad de una mina a ser ventilada

<b>GRADO DE DIFICULTAD PARA VENTILAR</b>	<b>(<math>\Omega</math>) (m<sup>2</sup>)</b>	<b>RESISTENCIA ESPECÍFICA R<sub>e</sub></b>
MINAS DE SECCIÓN REDUCIDA: Difíciles de ventilar	0-1	0.143
MINAS REGULARES: Medianas dificultades de ventilar	1-2	0.142-0.035
MINAS DE SECCIÓN AMPLIA: Fáciles de ventilar	>2	<0.035

Fuente: (Acerías Paz Del Río, 2006).

### 1.3.2. Circuito de ventilación

Es el acceso de la mina por el cual circula una corriente de aire y es la representación de cómo se encuentran interconectadas las labores mineras subterráneas (galerías, chimeneas, piques, etc.) garantizando de este modo un flujo de aire en cantidad y calidad suficiente para diluir contaminantes a valores seguros en todos los lugares donde el personal se encuentre laborando (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### 1.3.3. Atmósfera minera

#### 1.3.3.1. Contaminación atmosférica.

Concentración anómala de diferente tipo de contaminantes en el aire como: gases, polvos, humos, aceites, etc (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.3.2. Corriente de ventilación

Es la cantidad de aire que circula por un acceso de la mina, su dirección da el sentido al recorrido de un determinado volumen de aire (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.3.3. Gases explosivos

Son aquellos que se han mezclado con el oxígeno en tales proporciones que puedan generar una explosión, si logran alcanzar la temperatura de ignición (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.3.4. Gases nitrosos y nítricos (NOx)

Son productos de diferentes derivaciones de óxidos de nitrógeno, son efectos habituales de las voladuras realizadas en los frentes de trabajo bajo diferentes concentraciones como: NO y NO<sub>2</sub>.

Estos gases son de suma importancia ya que no logran separarse en situaciones como esta, es por esto que se los debe reconocer juntos ya que según los porcentajes a los que se esté expuesto el personal puede llegar a producir la muerte por edema pulmonar. Se detectan por medio de equipos de medición y su característica más importante es que son de color amarillento y con un olor punzante (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.3.5. Gases tóxicos

Son aquellos gases que se producen durante la explotación del yacimiento, que al ser inhalados por el personal en ciertas cantidades pueden llegar a causar graves trastornos a su salud e incluso la muerte, los más comunes son:

- Monóxido de Carbono (CO)
- Humos nítricos (NOx)
- Ácido Sulhídrico (H<sub>2</sub>S)
- Anhídrido Sulfuroso (SO<sub>2</sub>)

Todos estos gases son medidos en partes por millón (ppm). Cada uno de estos gases tiene un valor límite permisible de exposición ya que pueden llegar a ser letales incluso en concentraciones muy bajas sin importar que el nivel de oxígeno de la atmosfera sea el óptimo (21%) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.3.6. Grisú

Es una mezcla de gas metano con aire en diferentes proporciones, es un gas incoloro, insípido, asfixiante, altamente combustible y explosivo. Tiende a acumularse en las partes superiores de las labores mineras subterráneas ya que su peso específico es menor al del aire; es por esto que es necesario medirlo con el multidetector de gases en las partes más altas de las labores mineras (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

Tabla 1.5. Gases frecuentes, efectos que producen y origen de los mismos.

GASES		ORIGEN
Necesarios para respiración	Oxígeno	Atmosfera exterior. Por regeneración del aire de respiración en equipos de autosalvamiento. Por generación en equipos de respiración con botella de O <sub>2</sub> o generación por vía química.
Anóxicos o asfixiantes	Nitrógeno	Atmosfera exterior. Aportación del exterior como gas inerte para extinción de fuegos o incendios.
	Metano	Desprendimiento de la mina.
	Anhídrido carbónico	Desprendimiento de CO <sub>2</sub> en la mina. Oxidación lenta del carbón y la madera.
Tóxicos químicos	Monóxido de carbono	Fuegos e incendios. Combustión lenta del carbón. Incendios y calentamientos de bandas transportadoras, aceites, cables eléctricos y otras sustancias plásticas.
	Gases Nitrosos	Voladura de explosivos. Gases de escape de motores de combustión interna.
	Sulfuro de hidrógeno	Aguas estancadas.
	Bióxido de nitrógeno	Oxidación del NO producido por explosivos y gases de escape.
Otros	Ácido fórmico Ácido cianhídrico Dioxina	Mala ventilación en el empleo de espumas de ureaformaldehído. Combustión de poliuretano. Emisión de vapores de difenilos y trifenilos.

Fuente: (Acerías Paz Del Río, 2006)

#### 1.3.3.7. El clima

Se define el clima de la mina como: "la influencia de la temperatura ambiente, de la radiación térmica y de la velocidad del aire sobre el bienestar y la capacidad de rendimiento del personal". Podría ampliarse este sentido y tomarse en consideración también la influencia del polvo, la oscuridad, la estrechez y otros efectos psicológicos, pero sería tal la dificultad de evaluación conjunta que no se hace así (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.4. Objetivo de la ventilación

El objetivo de la ventilación es proporcionar una cantidad de aire suficientemente rica en oxígeno para alimentar todas las formas de combustión.

Una mala ventilación puede ser debida a:

- La profundidad de la mina (alta temperatura)
- Las malas condiciones del circuito de ventilación: Longitud, sección, irregularidades
- La mala utilización de las puertas de ventilación
- La presencia de cantidades anormales de gases nocivos
- Humedad del aire
- No respetar los reglamentos y consignas establecidas

Para obtener una corriente de aire se precisan: Entrada de aire, salida de aire y una diferencia de presión. La corriente de aire va hacia donde la presión es menor (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### 1.3.5. Leyes de ventilación

Conjunto de leyes que rigen el diseño de un circuito eficiente de ventilación:

- a) Por cada 30m verticales que se desciende desde el suelo, la temperatura aumenta en 1°C (gradiente térmico)
- b) Para obtener una corriente de aire se precisa una entrada, una salida y una diferencia de presión (depresión)
- c) En un circuito, cuanto mayor es la depresión mayor será la cantidad de aire que pasa por él
- d) El porcentaje de gas será menor cuanto mayor sea la cantidad de aire respirable.
- e) Entre menos fugas haya en el circuito, mayor será la cantidad de aire que pasa por él (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### 1.3.6. Ventilación

Dentro de la minería subterránea y túneles en ing. Civil la ventilación desempeña una labor indispensable, en vista de que contribuye a la renovación del aire, dilución de gases contaminantes, polvo y control de humos en caso de incendios (Acerías Paz Del Río, 2006).

#### 1.3.6.1. Circuito de ventilación

Proceso a través del cual se garantiza un flujo constante de aire limpio al interior de una labor subterránea a lo largo de todos sus accesos, de forma que el aire al interior de la mina entre en un proceso de recirculación evitando de esta manera que se acumulen gases, polvos y agentes nocivos para la salud, los cuales disminuyan los niveles de oxígeno amenazando la salud del personal (McPHERSON).

#### 1.3.6.2. Mecánica de fluidos

Se encarga de estudiar las leyes de movimiento de fluidos y los procesos que estos tienen cuando interactúan con otros cuerpos sólidos (McPHERSON).

#### 1.3.6.3. Nodo de ventilación

Punto de cruce con entrada y salida de uno o varios caudales de ventilación (Acerías Paz Del Río, 2006).

#### 1.3.6.4. Vía de ventilación

Componente de una red de ventilación por el cual circula un caudal de aire establecido, está formado principalmente por un punto inicial y uno final. Dentro de las vías de ventilación podemos encontrar las siguientes:

- Galerías
- Chimeneas
- Túneles
- Tambor
- Entre otros (McPHERSON)

#### 1.3.6.5. Puertas de ventilación

Son estructuras que se ubican en diferentes puntos estratégicos dentro de una labor subterránea con el fin de detener o regular el paso de aire, evitando de esta manera pérdidas de caudal. Estas estructuras pueden ser de madera, plástico, caucho, metal o cualquier otro material (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.6.6. Plano de ventilación

Bosquejo de una labor subterránea en la cual se representa la red de ventilación propuesta, teniendo en cuenta todos sus componentes que la conforman como: nodos, puertas de ventilación, accesos, etc. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### 1.3.7. Tipos de ventilación

#### 1.3.7.1. Ventilación natural

Técnica de ventilación cuyo funcionamiento se basa en 2 accesos principales: uno de entrada y el otro de salida del aire, es utilizado principalmente en minas subterráneas ubicadas en zonas montañosas, aprovechando la diferencia de cotas se consigue un flujo de aire sin necesidad de recurrir a equipos mecánicos (ventiladores o extractores). La ventilación natural depende de:

- Diferencia de cota entre la superficie y sus labores subterráneas
- Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior

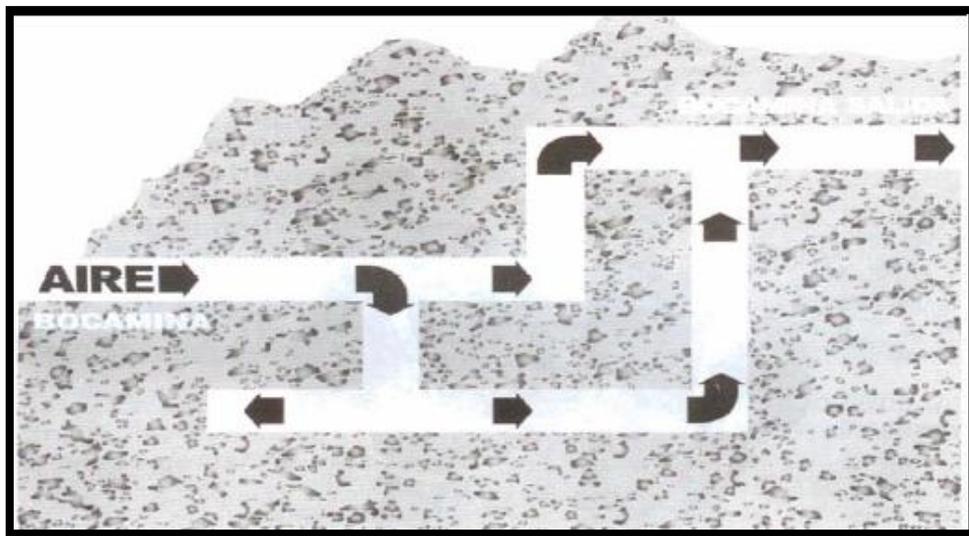


Figura 1.1. Esquema de ventilación natural.  
Fuente: (Gallardo, 2008)

#### 1.3.7.2. Ventilación mecánica

Es una técnica de ventilación aplicada a labores subterráneas cuya característica principal es la utilización de equipos electromecánicos para la inyección y/o extracción del aire en el interior de una labor subterránea, contribuyendo al control de los niveles de oxígeno, temperatura, control de gases, polvos nocivos y humos (Cristian & Jorge, 2011).

#### 1.3.7.3. Ventilación soplante

Operación que se realiza principalmente por inyección de aire limpio al interior de una labor subterránea con el propósito de desalojar y diluir los gases que se encuentran concentrados al fondo de las labores haciéndolos circular por los diferentes accesos hasta el exterior de la mina (Acerías Paz Del Río, 2006).

#### 1.3.7.4. Ventilación aspirante

Técnica de ventilación cuyo objetivo principal es el transporte de los agentes contaminantes que se encuentran en el interior de las labores subterráneas (gases, polvos, humos, etc.) a través de un conducto de ventilación hacia el exterior, de manera que se garantice una atmósfera de trabajo segura preservando la salud del personal (Acerías Paz Del Río, 2006).

#### 1.3.7.5. Ventilación Soplante/Aspirante

Este tipo de ventilación es una combinación de los dos sistemas descritos anteriormente, nos brinda una buena solución a los problemas que encontramos en minería subterránea ya que se emplean dos conductos diferentes de ventilación: el uno para extraer los agentes contaminantes mientras que al mismo tiempo el otro inyecta aire limpio al interior garantizando un adecuado ambiente de trabajo (Acerías Paz Del Río, 2006).

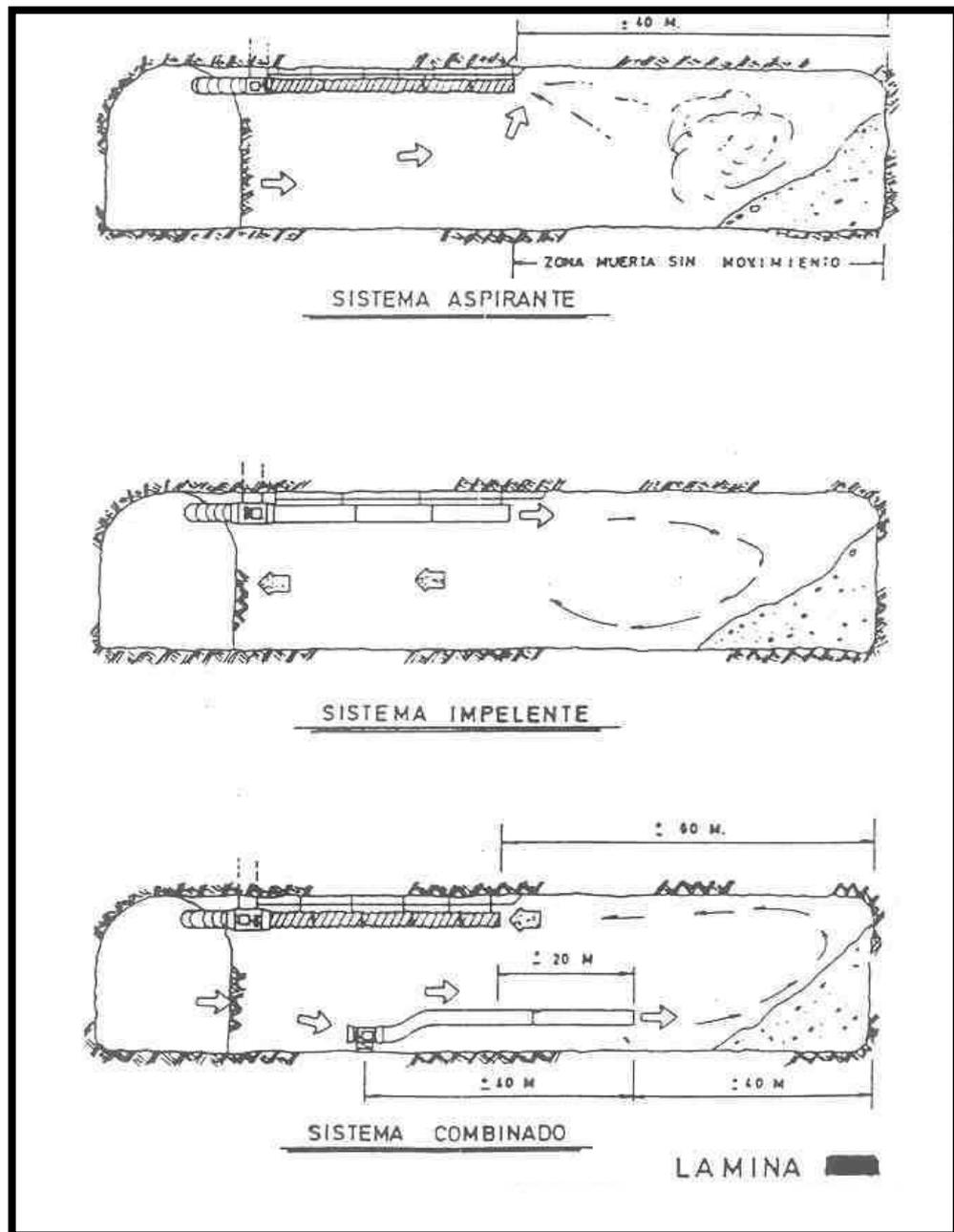


Figura 1.2. Esquema de tipos básicos de ventilación auxiliar de desarrollo

Fuente: (Gallardo, 2008)

### 1.3.8. Resistencia y obstáculos en ventilación

#### 1.3.8.1. Resistencia.

Es el nivel de dificultad que muestra una zona específica de una labor subterránea para conducir flujos de aire, dependiendo de la forma y tamaño del túnel, su longitud y su peso específico (Álvarez, Arias, Builes, Ordoñez, & Zapata, 2014).

#### 1.3.8.2. Pérdidas de carga

Es el estudio de los diferentes obstáculos que se pueden presentar a lo largo de una labor subterránea, es muy importante tenerlo siempre en cuenta al momento de diseñar un sistema de ventilación en vista de que nos ayuda a evitar un sobredimensionamiento en los sistemas a implementar o nos permite también evitar implementar sistemas ineficientes (Álvarez, Arias, Builes, Ordoñez, & Zapata, 2014).

#### 1.3.8.3. Resistencia de un túnel

Es la suma de resistencias que presenta:

- El perímetro del túnel
- Los diferentes obstáculos ubicados a lo largo del túnel
- La resistencia que presenta las diferentes labores de sostenimiento en la mina (Álvarez, Arias, Builes, Ordoñez, & Zapata, 2014)

#### 1.3.8.4. Obstrucciones

Representa a los obstáculos presentes a lo largo de las labores subterráneas ya sean fijos o móviles, cuya presencia nos representa una resistencia al paso de los flujos de aire inyectados al interior de la mina (Álvarez, Arias, Builes, Ordoñez, & Zapata, 2014).

#### **1.3.9. Barrera de polvo o agua**

Depósito de agua o polvo inerte ubicado de forma estratégica e inestable en el techo o paredes en diferentes puntos de una vía subterránea, cuyo objetivo es activarse en el momento de ser alcanzado por una onda explosiva durante una voladura o explosión de polvo de carbón creando una nube incombustible frenando la propagación de la explosión en el interior de la mina (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015)

### 1.3.10. Labor minera pulverulenta

Labor subterránea en minería de carbón, en la que se produce y acumula polvo de carbón finamente dividido en partículas, como consecuencia del arranque, manejo o transporte de dicho mineral (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

### 1.3.11. Cálculos y criterios técnicos

#### 1.3.11.1. Caudal

El caudal de aire es la medida de volumen de aire en la unidad de tiempo. Para ello se mide la velocidad de aire que atraviesa una sección dada. Las unidades en que se mide el caudal es  $\text{m}^3/\text{s}$  y para ello cuantificamos la velocidad del aire, en  $\text{m}/\text{s}$ , y la sección en la que se mide en  $\text{m}^2$ .

La normativa internacional señala una cantidad nunca inferior a  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  para la correcta dilución de los gases en minería y abastecimiento de aire. (Kerguelen, González, & Jiménez, 2013).

#### 1.3.11.2. Resistencia aerodinámica

Se define como la carga  $X$  de la corriente de aire en una sección de la labor, por la expresión de Bernoulli:

$$X = p + \gamma \cdot \frac{V^2}{2g} + \gamma \cdot Z$$

La pérdida de carga entre dos puntos, 1 y 2, será:

$$\Delta X = X_1 - X_2 = \left( p_1 + \gamma \cdot \frac{V_1^2}{2g} + \gamma \cdot Z_1 \right) - \left( p_2 + \gamma \cdot \frac{V_2^2}{2g} + \gamma \cdot Z_2 \right)$$

Se define la resistencia  $R$  de esta labor minera por la expresión:

$$R = \frac{10^3 \cdot \Delta X}{Q^2}$$

Esta expresión se puede referir al volumen de aire de una galería usando las dos fórmulas anteriores tal que:

$$R = \frac{10^3}{8g} \cdot \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot P \cdot L}{S^3}$$

Dónde:

- $g$  = es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s)
- $\lambda$  = es el coeficiente de frotamiento
- $\gamma$  = es la masa volúmica del fluido (kg/m<sup>3</sup>)
- $P$  = perímetro de la galería (m)
- $L$  = longitud de la galería (m)
- $S$  = sección recta (m<sup>2</sup>). Si la galería está sostenida por cuadros,  $S$  es la sección interior del cuadro (Prieto, 2015)

### 1.3.11.3. Coeficiente de forma de una galería

El coeficiente de forma es una expresión empírica que permite relacionar el perímetro de una galería con su sección, de tal forma:

$$\varphi = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$$

Si esta relación se aplica al cálculo de resistencia particularizada,  $R_s$ , para un valor de  $\gamma = 1,226$  se llega a la siguiente expresión:

$$R_s = 55 \cdot \lambda \cdot \varphi \cdot \frac{L}{S^{2,5}}$$

Si la galería está ocupada con material y/o obstáculos, (tuberías, cintas transportadoras, trenes, etc.) su resistencia aumenta. El nuevo valor se obtiene multiplicando la resistencia de la galería vacía por un coeficiente de obstáculos  $E$ , con lo que se obtiene la expresión final (Prieto, 2015):

$$R_s = 55 \cdot \lambda \cdot \varphi \cdot \frac{L}{S^{2,5}} \cdot E$$

Dónde:

- $\lambda$  = coeficiente de frotamiento
- $\varphi$  = coeficiente de forma de una galería
- $E$  = coeficiente de obstáculos de una galería
- $S$  = sección de la galería
- $L$  = longitud de la galería

#### 1.3.11.4. Cálculo de la resistencia aerodinámica de una galería

Partiendo de la fórmula anterior de resistencia, se observa que conocida la sección media a lo largo de la galería junto a su perímetro y longitud de la misma, solo faltaría el conocimiento de:

- E: Coeficiente de obstáculo.\_ Depende particularmente de cada obstáculo
- $\lambda$ : Coeficiente de frotamiento.\_ Se diferencia entre coeficiente de frotamiento de pared y de suelo

$$\lambda = 0.7\lambda_p + 0.3\lambda_s$$

Su cálculo se obtiene de tablas y ábacos en función del material de revestimiento y el estado del mismo (Kerguelen, González, & Jiménez, 2013).

#### 1.3.11.5. Cálculo de la red de ventilación

El objeto del cálculo de la red de ventilación es determinar el reparto del caudal total de aire que entra en la mina, entre sus distintas labores: pozos, galerías, talleres, refugios, etc. Para comprobar después que dichos caudales igualan o superan a los necesarios para que el trabajo en esas labores sea posible en las condiciones reglamentarias. El cálculo del reparto del aire, puede realizarse según diversos métodos, en función de la mayor o menor complejidad de la mina en estudio (Kerguelen, González, & Jiménez, 2013).

#### 1.3.11.6. Cálculo de la resistencia equivalente

Para el cálculo de minas sencillas, con una sola entrada y salida, se podrán disponer las resistencias de las galerías de tal forma que el cálculo se reduzca al cálculo de resistencias en serie, paralelo y diagonal.

- Resistencias en serie:  $R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n$
- Resistencias en paralelo:  $\frac{1}{\sqrt{R_e}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} \dots \dots \frac{1}{\sqrt{R_n}}$

- Resistencias en diagonal:

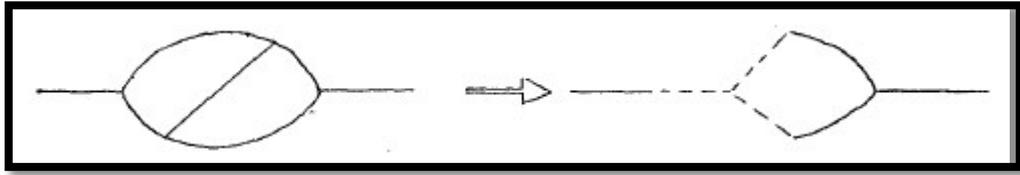


Figura 1.3. Resistencias en diagonal.  
Fuente: (Acerías Paz Del Río, 2006)

Para resolver este caso hay que realizar la conversión de estrella triángulo que se rige por las formulas:

$$R_{1-2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_1(R_2 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_1(R_2 + R_3)}} + \frac{R_2(R_1 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_2(R_1 + R_3)}} - \frac{R_3(R_1 + R_2)}{\sum R + 2\sqrt{R_3(R_1 + R_2)}} \right]$$

$$R_{2-3} = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_2(R_2 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_2(R_1 + R_3)}} + \frac{R_3(R_2 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_3(R_1 + R_2)}} - \frac{R_1(R_2 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_1(R_2 + R_3)}} \right]$$

$$R_{1-3} = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_3(R_1 + R_2)}{\sum R + 2\sqrt{R_3(R_1 + R_2)}} + \frac{R_1(R_2 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_1(R_2 + R_3)}} - \frac{R_2(R_1 + R_3)}{\sum R + 2\sqrt{R_2(R_1 + R_3)}} \right]$$

### 1.3.12. Elección del ventilador y cálculo del reparto de caudales

Una vez conocida la resistencia equivalente, o bien la potencia, se puede calcular la presión total que ha de suministrar el ventilador principal para que circule por la mina el caudal deseado  $Q$ . (Acerías Paz Del Río, 2006).

$$\Delta X = \frac{R_e}{1000} \cdot Q^2$$

Dónde:

- $\Delta X$  = presión total suministrada por el ventilador principal
- $R_e$  = Resistencia equivalente
- $Q$  = caudal

Esto se complementa con el cálculo del reparto de caudales entre los distintos ramales del circuito para lo que se utilizan las siguientes fórmulas:

Tramos en serie:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

Además:

$$\Delta X = R_e Q^2 = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) Q^2$$

Tramos en paralelo:

$$\Delta X = R_1 * Q_1^2 = R_2 * Q_2^2 = \dots \dots \dots R_n * Q_n^2$$

(Acerías Paz Del Río, 2006)

#### 1.3.12.1. Potencia necesaria

La potencia aerodinámica consumida por un ramal al circular un caudal Q, que experimenta una pérdida de carga  $\Delta X$ , viene dado por:

$$W = Q \cdot \Delta X$$

(Acerías Paz Del Río, 2006)

### 1.3.13. Evaluación de resultados

La etapa final en el cálculo de la red de ventilación es la comprobación en el reparto de caudales satisface las demandas requeridas, si todas las labores subterráneas se encuentran en un ambiente adecuadamente ventilado se puede dar por asentado que el problema está resuelto.

En caso de que alguna de las labores se encuentre con una deficiente ventilación es necesario revisar las resistencias planteadas y rehacer el cálculo. Esto significa que se debería ensanchar alguna galería, colocar puertas en ciertos sectores de la mina, o de forma general realizar labores mineras que busque siempre ser la más sencilla para evitar dificultades en la ventilación.

### 1.3.14. Ventilación principal

Se trata de la ventilación cuyo objetivo es transportar el aire limpio a las principales labores subterráneas. Está conformada principalmente por uno o varios pozos o galerías de entrada, una serie de niveles, galerías, pozos y chimeneas que lo distribuyen a lo largo de las diferentes labores y uno o varios pozos o galerías de salida.

Este proceso funciona con base a un ventilador principal el cual es una máquina que genera una elevación de presión equivalente a la pérdida de carga que experimenta el flujo de aire al realizar el recorrido por la red de ventilación (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2015).

#### 1.3.14.1. Criterios de ventilación en minería de carbón

- a) Esto quiere decir que si hablamos de una mina de carbón, pero que se encuentra dentro de la 1<sup>ra</sup> categoría se debe instalar un ventilador principal, el cual podría funcionar sólo cuando la ventilación natural no sea capaz de mantener las condiciones exigidas.
- b) Sin embargo, si la mina está clasificada como grisúosa, el/los ventilador/es trabajarán de forma continua excepto en los períodos de inactividad, cuyas paradas serán objeto de aprobación por parte de la Autoridad Minera Competente, que establecerá las prescripciones necesarias para garantizar la seguridad de los trabajadores.
- c) Si la mina es de 3<sup>a</sup> o 4<sup>a</sup> categoría con respecto al grisú, habrá dos o más ventiladores principales alimentados con fuentes distintas de energía, para que en caso de avería de uno de ellos, pueda asegurarse la continuidad de la ventilación, de forma que siempre pueda efectuarse la evacuación del personal con toda seguridad (Cristian & Jorge, 2011).

#### 1.3.15. Tipos de ventiladores

En la actualidad se distinguen dos tipos de ventiladores:

##### 1.3.15.1. Ventiladores centrífugos

El aire entra por un oído central y es aspirado por centrifugación en una rueda de alabes, de donde es impulsado a un cuerpo en forma de caracol, llamado voluta, cuya sección va creciendo hasta alcanzar el orificio de salida en la zona llamada difusor.

En este tipo de ventiladores el flujo de aire cambia su dirección, en un ángulo de 90°, entre la entrada y salida.

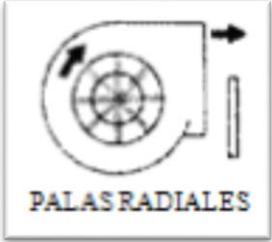
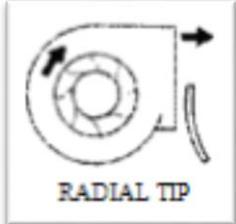


Figura 1.4. Ventilador centrífugo para minería.  
Fuente: (Grupo ITSA, 2011)

Se suelen sub-clasificar, según la forma de las palas o álabes del rotor, de la siguiente manera:

Tabla 1.6. Tipo de ventiladores centrífugos

VENTILADOR	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
	<p>Rotor con palas curvadas hacia adelante, apto para caudales altos y bajas presiones. No es autolimitante de potencia para un mismo caudal y un mismo diámetro de rotor, gira a menos vueltas con menor nivel sonoro</p>	<p>Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado de baja presión.</p>

	<p>Rotor de palas radiales. Es el diseño más sencillo y de menor rendimiento. Es muy resistente mecánicamente, y el rodete puede ser reparado con facilidad. El diseño le permite ser autolimpiante. La potencia aumenta de forma continua al aumentar el caudal.</p>	<p>Empleado básicamente para instalaciones industriales de manipulación de materiales. Se le puede aplicar recubrimientos especiales anti-desgaste. También se emplea en aplicaciones industriales de alta presión.</p>
	<p>Rotor de palas planas o curvas inclinadas hacia atrás. Es de alto rendimiento y autolimitador de potencia, puede girar a velocidades altas.</p>	<p>Se emplea para ventilación, calefacción y aire acondicionado. También puede ser usado en aplicaciones industriales, con ambientes corrosivos y/o bajos contenidos de polvo.</p>
	<p>Similar al anterior pero con palas de perfil aerodinámico. Es el de mayor rendimiento dentro de los ventiladores centrífugos. Es autolimitante de potencia.</p>	<p>Es utilizado generalmente para aplicaciones en sistemas de HVAC y aplicaciones industriales con aire limpio. Con construcciones especiales puede ser utilizado en aplicaciones con aire sucio.</p>
	<p>Rotores de palas curvadas hacia delante con salida radial. Son una variación de los ventiladores radiales pero con mayor rendimiento. Aptos para trabajar con palas antidesgaste. Son autolimpiantes. La potencia aumenta de forma continua al aumento del caudal</p>	<p>Como los radiales estos ventiladores son aptos para trabajar en aplicaciones industriales con movimiento de materiales abrasivos, pero con un mayor rendimiento.</p>

Fuente: (CHICAGO BLOWER ARGENTINA S.A., 2006)

### 1.3.15.2. Ventiladores axiales

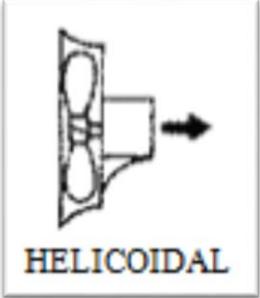
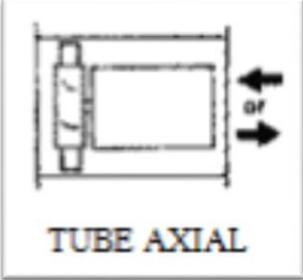
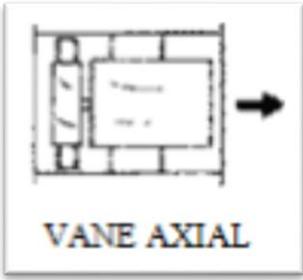
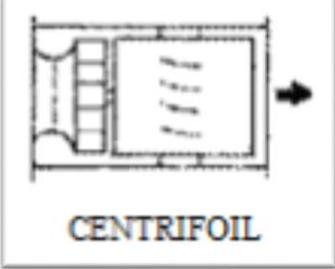
Comprenden en un conducto cilíndrico, una hélice constituida por un cierto número de paletas fijadas a, sobre un cubo o haciendo cuerpo con él. El aire entra y sale paralelamente a la máquina, y su funcionamiento puede asimilarse al de una tuerca y tornillo. En la actualidad es el modelo más extendido.

Las directrices (compuertas) tienen la misión de hacer desaparecer la rotación existente o adquirida por el fluido en la instalación, a la entrada del rodete o tras su paso por el mismo. Estas directrices pueden colocarse a la entrada o a la salida del rodete, incluso las hay fijas ó removibles.



Figura 1.5. Ventilador axial en mina subterránea  
Fuente: (Minería Chilena, 2014)

Tabla 1.7. Tipo de ventiladores axiales

VENTILADOR	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
 <p data-bbox="379 555 592 589"><b>HELICOIDAL</b></p>	<p data-bbox="703 293 1038 640">Ventiladores aptos para mover grandes caudales de aire con bajas presiones. Son de bajo rendimiento. La transferencia de energía se produce mayoritariamente en forma de presión dinámica.</p>	<p data-bbox="1070 342 1390 595">Se aplica en circulación y extracción de aire en naves industriales. Se instalan en pared sin ningún conducto. Utilizados con objetivos de renovación de aire.</p>
 <p data-bbox="379 954 596 987"><b>TUBE AXIAL</b></p>	<p data-bbox="703 752 1038 999">Tienen rendimiento algo superior al anterior y es capaz de desarrollar una presión estática mayor. Por su construcción es apto para intercalar en conductos.</p>	<p data-bbox="1070 663 1398 1088">Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado que requieran altos caudales con presión media a baja. También se utiliza en algunos sistemas industriales como cabinas de pintura y extracciones localizadas de humos.</p>
 <p data-bbox="379 1413 596 1447"><b>VANE AXIAL</b></p>	<p data-bbox="703 1211 1038 1458">Con diseños de palas AIRFOL, permiten obtener presiones medias y altas con buenos rendimientos. Las palas pueden ser fijas o de ángulo ajustable.</p>	<p data-bbox="1070 1104 1390 1570">Tiene aplicaciones similares a los TUBEAXIAL, pero con la ventaja de tener un flujo más uniforme y la posibilidad de obtener presiones mayores. Para una determinada prestación es relativamente más pequeño que el ventilador centrífugo equiparable.</p>
 <p data-bbox="384 1816 584 1850"><b>CENTRIFOIL</b></p>	<p data-bbox="703 1585 1038 1890">Se trata de un ventilador con rotor centrífugo pero de flujo axial. Es decir reúne las ventajas del ventilador centrífugo y la facilidad de montaje de un axial con el consiguiente ahorro de espacio.</p>	<p data-bbox="1070 1686 1390 1794">Las mismas aplicaciones que el ventilador VANEAXIAL.</p>

Fuente: (CHICAGO BLOWER ARGENTINA S.A., 2006)

### 1.3.16. Acoplamiento de ventiladores

En ocasiones los ventiladores no trabajan de forma aislada, sino que se acoplan entre sí. A continuación se indicará diferentes modelos de acoplamiento de ventiladores para minería subterránea.

#### a) En serie sobre un mismo pozo o galería.

- El caudal de aire que pasa por ambos ventiladores debe ser igual y la depresión total es igual a la suma de las depresiones de cada uno de ellos por separado.
- La curva característica de ambos se construye sumando la de cada uno de ellos.
- El caudal total de dos ventiladores iguales girando a las mismas revoluciones siempre es mayor que el caudal de cada uno por separado, pero menor que la suma de los caudales de trabajo individual.
- Si las características de ambos ventiladores no son iguales, el trabajo en conjunto será ventajoso para una mina con gran resistencia, y todo lo contrario para una mina con resistencia pequeña (Acerías Paz Del Río, 2006).

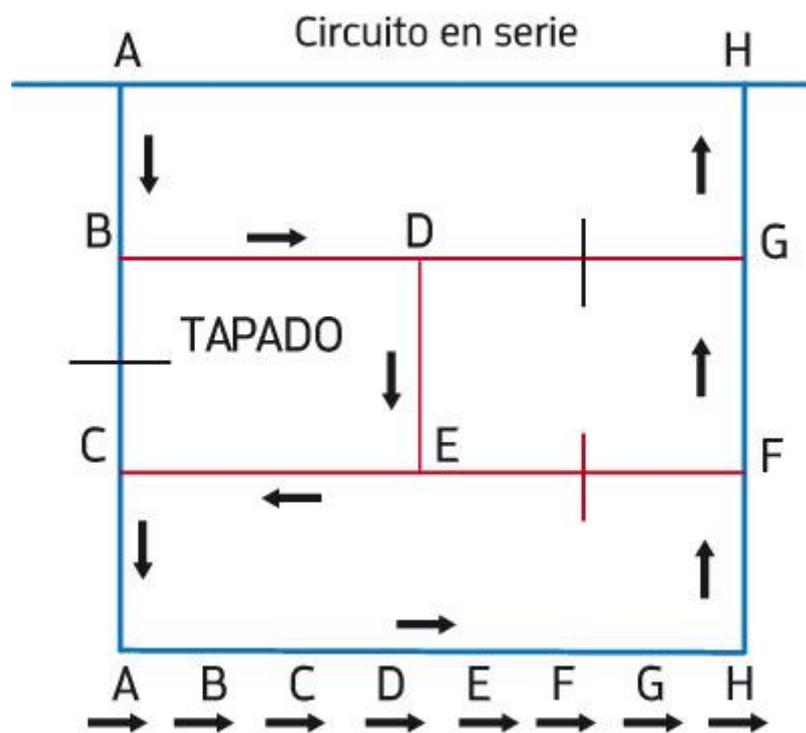


Figura 1.6. Circuito de ventilación en serie  
Fuente: (Revista Mundo HVACR)

### b) En paralelo sobre un mismo pozo.

- La instalación en paralelo de dos ventiladores hace que sus depresiones sean iguales y el caudal total, la suma de ambos caudales.
- En este caso y debido al aumento de las pérdidas de presión, la suma de los caudales es menor que la suma de los caudales individuales.
- Si los comparamos con una instalación en serie sobre un mismo pozo, la conexión en paralelo también puede tener efecto beneficioso para la instalación, pero también puede no serlo e incluso puede ser peligroso para la misma.
- Así pues, para minas de baja resistencia, tiene un efecto beneficioso y perjudicial para el caso contrario.
- Este tipo de conexión es el más frecuente, e incluso en periodos largos uno de ellos se mantiene como ventilador de reserva. Aunque no es necesario, conviene que ambos ventiladores sean idénticos (Acerías Paz Del Río, 2006).

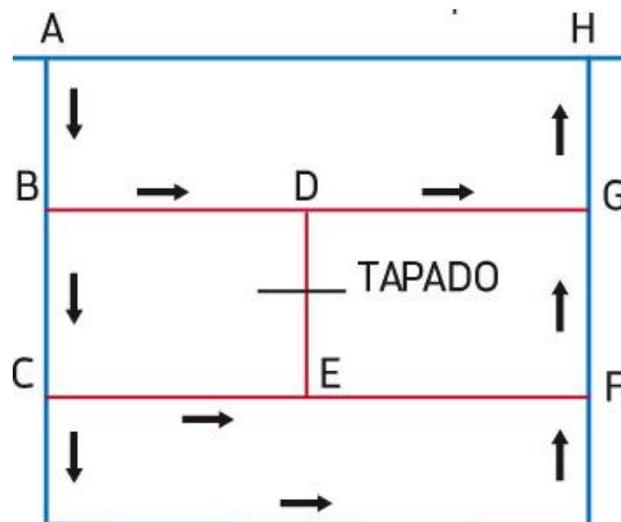


Figura 1.7. Circuito de ventilación en paralelo  
Fuente: (Revista Mundo HVACR)

### 1.3.17. Inversión de la corriente

En las minas de carbón y en labores con riesgo de explosión:

**"Los ventiladores deben disponerse de forma que pueda invertirse la ventilación".**

La inversión de la ventilación debe aplicarse en caso de aparición de un fuego o incendio, si este nace en el pozo de entrada de aires o en las galerías principales de entradas próximas (Acerías Paz Del Río, 2006).

### 1.3.18. Criterios de selección de ventilación secundaria

Tabla 1.8. Criterios de selección de ventilación secundaria

<b>Objetivos</b>	<b>Soplante</b>	<b>Mixta</b>	<b>Aspirante</b>
<b>Facilidad de instalación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Instalación mas sencilla.</li> <li>➤ Permite el empleo de tuberías de lona, sin armadura y facil manejo.</li> <li>➤ Es la mas económica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Es de instalación más compleja.</li> <li>➤ Requiere tuberías rígidas, o si no de lona, que esté armada con espiral de acero.</li> <li>➤ Más costosa.</li> </ul>	Cuando se avanza la galería con explosivos, suele utilizarse uno de los otros dos esquemas, para que el aire llegue bien al frente. Si la labor es grisuesa ello es, además obligado. El esquema aspirante, se reduce casi exclusivamente al avance con minadores y máquinas de corte, para evacuar más rápidamente el polvo. Por estas razones no se tiene en consideración este sistema.
<b>Tempretatura en frente</b>	El aire se conduce muy rápido y llega al frente más frío.	El aire entra muy lentamente y se calienta antes de llegar al frente.	
<b>Polvo, gases en el frente y nieblas</b>	Todo el aire de la instalación se dirige al frente, creando en él buenas condiciones si la tubería está bien instalada.	En general, la instalación soplante del frente solo mueve una fracción del aire. Si la instalación de tuberías nos es buena, su corta longitud garantiza siempre el movimiento de aire en el corte.	
<b>Gases de voladura</b>	Debe retornar por la galería, ocasionando problemas al personal sobre todo si en el fondo de saco es largo, pero se evita realizando una buena instalación.	Los gases retornan por la tubería (salvo la parte que pueda recircular) evitando que el personal tenga que respirarlos sobre todo si el fondo de saco es largo y la instalación no es buena.	

Fuente: (Prieto, 2015)

### **1.3.19. Recomendaciones para la ventilación secundaria**

Existen 3 reglas de oro de la ventilación secundaria:

**a) Evitar las fugas en las tuberías.**

Para ello:

- Utilizar juntas diseñadas para minimizar las fugas. Ello ha de hacerse compatible con la duración de la instalación, la longitud del fondo de la mina y los cambios de dirección
- Utilizar tuberías resistentes a los golpes y desgarros cuando, por la escasez de sección, puedan ser alcanzadas por el material del transporte.
- Evitar y corregir los desacoplamientos
- Realizar una buena instalación y conservación. Evitar las "labores mal hechas"
- 

**b) Mejorar la instalación de uno o varios ventiladores en los extremos de la tubería.**

- Cuando se escalonan los ventiladores, se producen fugas hacia afuera y hacia adentro de la tubería, que originan recirculaciones del aire, de forma que el tiempo de limpieza del fondo de la mina aumenta mucho.
- Con uno o varios ventiladores en cola no puede haber recirculación del aire.
- Esta segunda regla sólo puede aplicarse de manera efectiva cuando se cumpla también la primera.
- En minas con grisú u otros gases inflamables esta instalación debe ser la "normal", cuando se utilizan electroventiladores, pues: "En las instalaciones de ventilación secundaria, tanto los electroventiladores como sus cofres y cables de alimentación se instalarán, normalmente, fuera del fondo de la mina y en emplazamientos bañados por las corriente de ventilación principal"

**c) Antes de iniciarse el avance del fondo de explotación, debe calcularse la instalación de ventilación secundaria (Acerías Paz Del Río, 2006).**

### **1.3.20. Metodología para la medida de aforos de ventilación**

Aquí se describe la metodología para llevar a cabo la toma de datos de campo para la determinación de los parámetros necesarios para la caracterización de los circuitos de ventilación (Universidad Nacional De Colombia, 2016).

#### **1.3.20.1. Parámetros a medir**

La toma de datos se realizará en cada una de las estaciones de medida que se determinen a partir del plano general de la mina y esquema de ventilación actualizados, esta documentación debe ser aportada por el servicio topográfico de la instalación.

Los parámetros a medir en cada estación serán los siguientes:

##### **a. Levantamiento depresiométrico.**

Se denomina levantamiento depresiométrico a la determinación de las presiones de un circuito de ventilación. En general, se medirá la presión en cada estación de medida por el método barométrico, para el análisis de las principales ramas del circuito principal de ventilación de la mina. Si es necesario, en lugares singulares de la mina se utilizará el método de medida con tubos de pitot.

##### **b. Medida de secciones.**

El servicio topográfico de la mina debería calcular la sección útil de la galería en los puntos de medición seleccionados, no obstante el equipo de trabajo encargado de la medida de aforos debería realizar una medida aproximada de todas las secciones.

Las coordenadas y cotas de todas las estaciones de medida deben ser aportadas por el servicio topográfico de la mina.

**c. Medida de velocidades y caudales de la corriente de aire.**

Se medirá con anemómetro la velocidad de la corriente de ventilación que circula por cada una de las galerías donde están ubicadas las estaciones de medida.

El caudal que circula por cada estación de medida se calcula a partir de la sección útil de la galería en la estación de medida y la velocidad media en ella.

**d. Medida de temperaturas.**

Se medirán las temperaturas seca y húmeda en cada estación de medida con el psicrómetro o el Termohigroanemómetro (Universidad Nacional De Colombia, 2016).

**1.3.20.2. Prueba verificación (bump test).**

Procedimiento mediante el cual se determina, a través de un gas patrón, si un detector de gases es apto su uso. Si el instrumento responde dentro del rango de tolerancia establecida por el fabricante, la verificación es aceptada. De lo contrario se rechaza y se debe realizar la calibración equipo (Universidad Nacional De Colombia, 2016).

**1.3.21. Aforo de galerías****Instrumentación necesaria:**

- Termohigroanemómetro
- Flexómetro de 5m de longitud o aparato óptico de medida
- Multidetector de gases (metano, oxígeno, monóxido de carbono y ácido sulfhídrico)

### Procedimiento de medición:

Previo a la entrada en el interior de la mina, se realizarán las siguientes acciones:

- Determinar las zonas puntuales de levantamiento de información en el plano de la mina
- Calibrar los equipos a utilizar durante los aforos de ventilación

En todas las zonas de medida seleccionadas se realizará lo siguiente:

- Anotar fecha y hora
- Identificar aproximadamente en el plano general y señalar con pintura indeleble
- Solicitar a departamento de topografía de mina las coordenadas y cota de los puntos señalizados
- Medir aproximadamente la sección útil de la galería
- Base y altura máxima
- Representación aproximada del perfil y coeficiente de forma  $k$

$$S = k \times B \times H$$

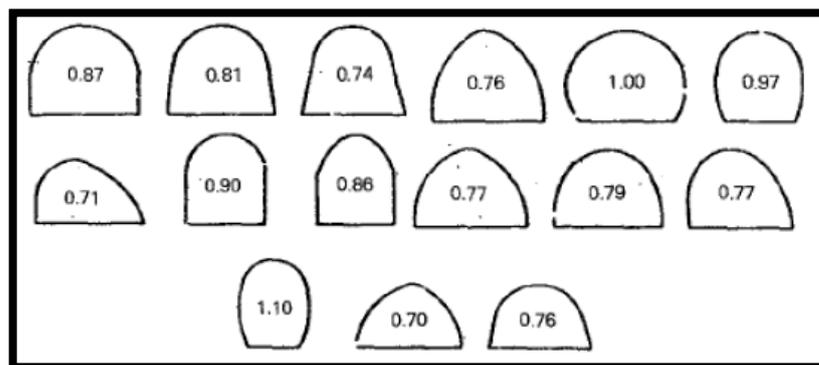


Figura 1.8. Criterios de selección del parámetro  $K$   
Fuente: (Acerías Paz Del Río, 2006)

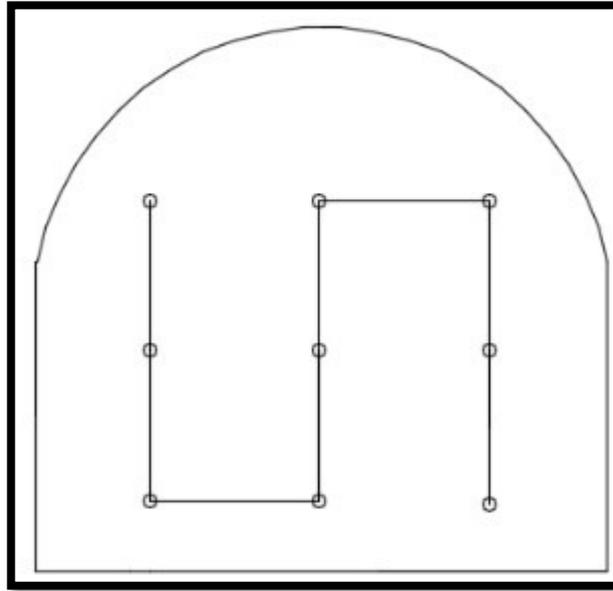


Figura 1.9. Orden de medidas con el anemómetro  
Fuente: (Acerías Paz Del Río, 2006)

Medir la velocidad de la corriente de aire en los puntos fijados en la sección de la galería, identificando el sentido de la corriente.

- Punto 1: Arriba izquierda.
- Punto 2: Centro izquierda.
- Punto 3: Abajo izquierda.
- Punto 4: Abajo central.
- Punto 5: Centro.
- Punto 6: Arriba central.
- Punto 7: Arriba derecha.
- Punto 8: Centro derecha.
- Punto 9: Abajo derecha.

$$V_a = \frac{\sum_1^9 V_n}{9}$$

- Medir el área de la sección e identificar su forma
- Medir la velocidad del aire, temperatura (húmeda y seca) y la humedad relativa con el Termohigroanemómetro
- Medir la concentración de los diferentes gases con el multidetector de gases
- Anotar los valores
- Realizar el cálculo del caudal de aire en la zona determinada

- Anotar, si procede en el apartado de observaciones, las perturbaciones apreciables del flujo de la corriente de ventilación, fugas en puertas de regulación
- Anotar, en el apartado de observaciones, los equipos, instalaciones y obstáculos que hay montados entre este punto y el anterior (Universidad Nacional De Colombia, 2016)

### **1.3.22. Medida en puertas.**

#### **Instrumentación necesaria:**

- Termohigroanemómetro
- Flexómetro de 5m de longitud o aparato óptico de medida
- Multidetector de gases (metano, oxígeno, monóxido de carbono y ácido sulfhídrico)

#### **Procedimiento de medición:**

Una vez localizada la sección donde se va a medir:

- Anotar fecha y hora
- Identificar y situar aproximadamente en el plano general la puerta y señalar con pintura indeleble
- Solicitar al departamento de topografía de mina las coordenadas y cota del lugar donde está colocada la puerta
- Medir aproximadamente las dimensiones de la sección donde está construida la puerta así como las dimensiones de la misma
- Medir la velocidad del aire, temperatura (húmeda y seca) y la humedad relativa con el Termohigroanemómetro
- Medir la concentración de los diferentes gases con el multidetector de gases.
- Anotar los valores
- Realizar el cálculo del caudal de aire en la zona determinada (Universidad Nacional De Colombia, 2016)

#### **1.4. Conclusiones.**

- A lo largo de este capítulo se contempló el marco legal aplicable al proyecto con base al artículo 1886 de la Republica de Colombia con el fin de ayudarnos a determinar bajo qué condiciones de ventilación debe operar la mina para cumplir con las diferentes normas establecidas en el mismo.
- Además de la normativa legal se revisó los diferentes conceptos, principios y procedimientos que se aplican al proyecto de ventilación de manera que permita entender de forma más clara como se trabaja en proyectos de ventilación de minas subterráneas de carbón.

## CAPÍTULO 2

### DESARROLLO DEL PROYECTO

#### **2.1. Introducción.**

Durante el desarrollo del trabajo se procederá acorde con la metodología planteada para el trabajo desde la toma de datos en campo mediante los diferentes aforos de ventilación que se van a realizar en la mina para posteriormente crear una base de datos con esta información obtenida en el campo que nos permita introducirlos con mayor facilidad al software VentSim® de modo que nos ayude a observar bajo qué condiciones se encuentra el ambiente de trabajo al interior de la mina y como está estructurado el sistema de ventilación.

Partiendo de la información obtenida e introducida al programa se empezarán a correr simulaciones bajo diferentes condiciones de ventilación lo cual nos ayudará a determinar cuál el sistema de ventilación más óptimo y que tipo de equipos se deben implementar o que se debe modificar en la mina (tapones, puertas, etc.) para garantizar un ambiente de trabajo adecuado y seguro.

#### **2.2. Datos generales de la mina “El Bloque”**

La unidad minera El Bloque, se encuentra ubicada en el Sur Oeste del Departamento de Antioquia, se accede desde la zona urbana del municipio de Medellín, tomando la vía troncal del café que conduce al municipio de Fredonia, hasta el sitio denominado Hotel Hacienda La Bonita a 200 m del Hotel se encuentra la entrada que conduce a la mina de aproximadamente 1.2 Km por una vía en regulares condiciones.

En la unidad minera se cuenta con unas completas instalaciones para adelantar la operación minera en donde se encuentra dividida en 6 bloques, los cuales son:

- Oficinas administrativas
- Polvorín
- Taller
- Tolvas (conminución y clasificación)
- Cuarto de compresor.
- Salón de capacitaciones.

A la mina se accede por la bocamina ubicada en la cota 1.122 m.s.n.m con coordenadas Este 1154047; Norte 1154721. El carbón que se extrae actualmente proviene de manto 2 y 3 del nivel 25, en donde se tiene una producción de 2.500 toneladas mensuales.

La mina cuenta con 140 trabajadores de los cuales 120 desempeñan actividades relacionadas con la explotación de carbón en dos turnos; para el arranque del carbón se usa material explosivo (indugel plus permisible) y aire comprimido (martillo picador), en el caso de manto 2 el arranque de carbón se realiza con martillo picador, para manto 3 se usa la combinación entre voladura con indugel plus permisible y martillo picador (Consortio Sinifaná, 2011).

### **2.2.1. Hidrografía y fisiografía**

En general la región presenta una topografía ondulada con pendientes moderadas, con la ocurrencia aislada de escarpes rocosos continuos a manera de contrafuertes de los estratos arenosos más duros, los que a su vez sirven de límite lateral a depósitos de materiales recientes producidos por desprendimientos en masa que históricamente han sido muy frecuentes en la región. Por fuera del área y hacia el nororiente del contrato minero se presentan terrenos de topografía muy abrupta, correspondientes a las unidades rocosas cristalinas de composición granítica y esquistosa, que se presentan hacia el noreste, y de composición diorítica hacia el sudoeste (Consortio Sinifaná, 2011).

### **2.2.2. Clima y vegetación**

El área se caracteriza por tener un clima de piso térmico medio, con temperaturas comprendidas entre los 18°C y 24°C; la precipitación promedio es de 1.500 mm/año.

De acuerdo con el sistema de clasificación de Holdridge la zona de vida corresponde a un bosque muy húmedo piemontano o tierra cafetera muy húmeda.

La vegetación natural se encuentra muy intervenida, encontrándose sólo reductos de bosque natural y secundario, principalmente en los cursos de las quebradas; por lo tanto, la mayor parte de la región está dedicada a parcelas de recreo y potreros para pastoreo libre de ganado; además, se encuentran pequeños cultivos de plátano, yuca y maíz (Consortio Sinifaná, 2011).

### **2.2.3. Estratigrafía**

La zona de interés pertenece a la cuenca carbonífera de Antioquia, litológicamente denominada como la Formación Amagá, unidad que contienen los mantos de carbón económicamente explotables. La cuenca está limitada al Oeste por rocas ígneas de la Diorita de Pueblito y al Este por rocas granulares del Stock Granítico de Amagá y por rocas metamórficas del Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central, complementados con depósitos superficiales de vertiente y aluviales que ocurren a lo largo de las laderas y drenajes principales.

La Formación Amagá es la unidad portadora de los mantos de carbón que se explotan en la región y aflora en toda la extensión del área. Regionalmente constituye un conjunto de estratos compuestos básicamente por: conglomerados, areniscas, arcillas pizarrosas, lutitas y mantos de carbón, dispuestos en una franja que se extiende de norte a sur en la zona oeste del departamento de Antioquia (Consortio Sinifaná, 2011).

#### **2.2.4. Geología estructural**

El área está situada en el denominado corredor del sistema de fallamiento Cauca - Romeral, caracterizada por la presencia de estructuras regionales falladas y plegamientos; así, hacia la parte occidental existe la zona de falla Amagá y hacia el oriente la falla Piedecuesta. A nivel regional, los estratos de la formación Amagá exhiben plegamientos muy continuos que afectan las capas carboníferas. Se distingue entre otros el sinclinal Amagá que es la estructura regional dominante, en cuyo flanco oriental se encuentra la mayor parte de los carbones (Consortio Sinifaná, 2011).

#### **2.3. Optimización de la red de ventilación**

Para mejorar la red de ventilación establecida al interior de la mina “El Bloque” se procederá a trabajar a través de VentSim® (Mine Ventilation Simulation Software) el cual nos brinda una extensa gama de herramientas que nos permitirá realizar varias simulaciones de ventilación bajo diferentes parámetros y operando con base en la información obtenida del trabajo de campo.

Con el objetivo de tomar datos requeridos para la caracterización de la mina tales como:

- Velocidad de aire
- Área promedio
- Temperatura efectiva
- Humedad
- Gases presentes

Durante la visita a la unidad minera se observa que cuentan con un circuito de ventilación definido que se encuentra registrado y se están adelantando diferentes trabajos para mejorar las condiciones ambientales y laborales de la unidad minera; sin embargo en esta unidad minera cuenta con ventilación forzada durante las 24 horas al día y los 365 días del año, solo se apaga el ventilador principal para hacerle mantenimiento programado dos ocasiones durante el año (Domingos), para este día no se programa personal para adelantar labores de explotación en la unidad minera.

Para la toma de datos de ventilación se planeó realizar un recorrido de tal manera que se abarque toda la mina en las horas de la mañana; durante la visita se evidenció que cuenta con ayuda de un ventilador principal y seis ventiladores auxiliares secundarios que trabajan a succión ubicados a plena sección, además cuentan con una serie de ventiladores para los diferentes frentes de trabajo que se detallaran posteriormente. Actualmente en la unidad minera cuenta con un punto de monitoreo de gases fijo, en donde suministra un monitoreo continuo de CH<sub>4</sub> en el nivel 15 que cumple la función de nivel de retorno del aire.

### **2.3.1. Ingreso y levantamiento de información**

Se ingresa por bocamina en una cruzada de 62 m aproximadamente, luego se toma la clavada principal hasta llegar al nivel 15; en este recorrido se tomaron 5 puntos de aforo a la ventilación, luego se ingresa al sector de Bloque Norte que está definido únicamente como vía de ventilación hasta llegar al nivel 6; en este sector se tomaron 8 puntos de aforo a la ventilación, posteriormente se retorna al nivel 15 por la clavada principal de Bloque Norte, sobre el nivel 15 se toman 5 puntos de aforo de ventilación hasta llegar a la clavada del 34 en donde se tomaron 4 puntos de aforo a la ventilación.

Una vez en el nivel 25 sobre la cruzada que comunica al sector de manto 2 y manto 3 se tomaron en total 10 puntos de aforo de ventilación; en este sector se encuentra un tambor que comunica al nivel 6, en esta zona se toma un punto de aforo de ventilación.

Durante el recorrido se observó que tienen instaladas algunas trampas de material calcáreo, tableros de medición de gases que se actualizan durante el turno, tapones y cortinas temporales que sirven para definir un circuito de ventilación en la mina. Sus distribuciones se encuentran especificadas en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Ubicación de accesorios de ventilación en la mina El Bloque

<b>Accesorios de ventilación usados</b>	<b>Ubicación</b>
Barreras de polvo inerte de material calcáreo	Se encuentran en la clavada principal de mineral a 15 metros del volcador de material.
Tableros de medición de gases	Se encuentra ubicado en manto 2 y manto 3 del nivel 25.
Tapones	Todo trabajo abandonado en la mina se taponan con muros.
Cortinas de bandas	Se encuentran ubicadas en la clavada del 34.

Fuente: (Universidad Nacional De Colombia, 2016)

### **2.3.2. Topografía y puntos de aforo de ventilación**

En la figura 10. Se puede observar los puntos en las cuales se realizaron los aforos de ventilación con algunos de los datos tomados como: caudal de aire, humedad relativa, temperatura específica, porcentaje de gas metano (CH<sub>4</sub>), niveles de Oxígeno y monóxido de carbono (CO).

Además de eso se puede apreciar los diferentes ventiladores que se encuentran instalados al interior de la mina con su especificación de potencia para poder ingresarlos posteriormente en las simulaciones del software.

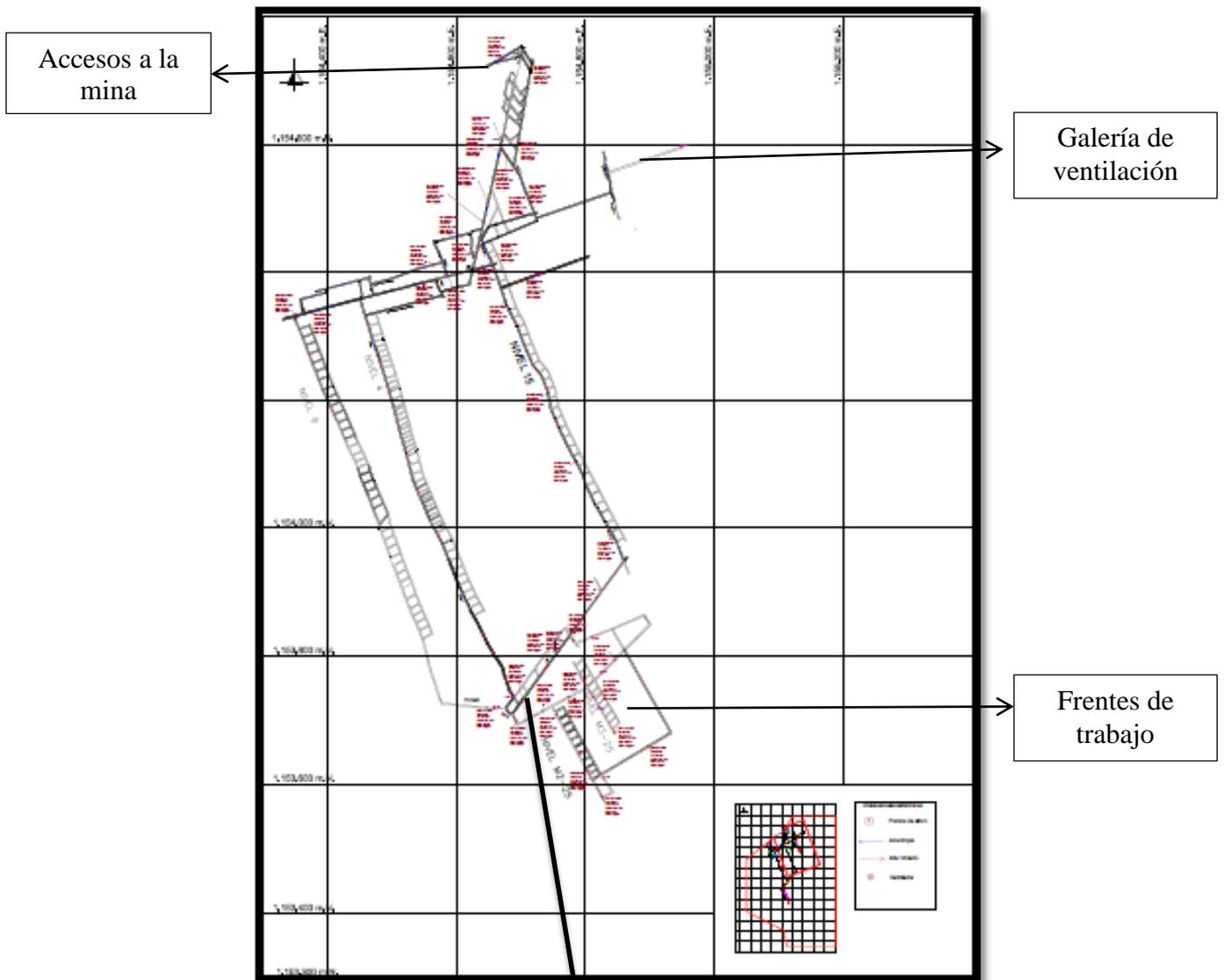
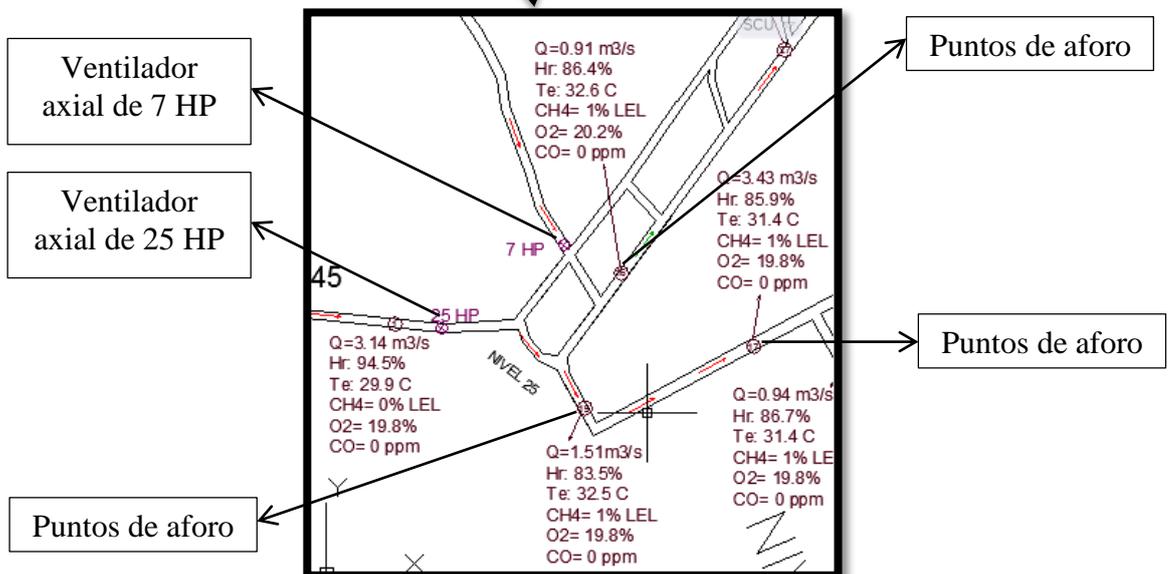


Figura 2.1. Topografía de la mina El Bloque  
Fuente: (Consortio Sinifaná, 2011)



### 2.3.3. Hoja de datos levantados en el campo

Tabla 2.2. Hoja de datos obtenidos en el campo

PP digital	Base mayor	Base menor	Anchura	Altura	lado I	Área por figura	Perímetro m	Vel m/s	CH4 ( %LEL)	O2 (% vol)	CO (PPM)	H2S (PPM)	T seca (° C )	T húmeda (° C )	T efectiva (°C)	Humedad relativa %	Área (m2)	Caudal (m3/s)	Caudal (m3/min)
1	0,45	0	0,45	1,1		0,495	3,10	6,30	0	19,8	0	0	29,9	29,2	23,11	94,5	0,50	3,14	188,1
2	1,28	0	1,28	1,5		1,920	5,56	1,52	0	20,7	0	0	23,9	22,3	21,26	88,3	1,92	2,91	174,78
3	1,13	0	1,13	1,1		1,243	4,46	1,45	0	20,7	0	0	24	22,3	21,36	86,8	1,25	1,81	108,54
4	1,33	0	1,33	1,8		2,394	6,26	0,04	0	20,4	0	0	27,1	26,7	26,78	96,6	2,40	0,09	5,64
5	1,3	0	1,3	1,1		1,430	4,80	1,00	0	20,7	0	0	25,3	22,6	22,41	80,4	1,43	1,43	85,8
6	1,13	0	1,13	1,52		1,718	5,30	1,49	0	19,9	0	0	28,6	28,1	26,76	98,7	1,72	2,56	153,42
7	1,95	0	1,95	1,54		3,003	6,98	0,80	0	19,6	0	0	28,6	28,1	27,45	99,1	3,00	2,40	144,12
8	1,33	0	1,33	1,7		2,261	6,06	1,30	0	19,6	0	0	28,1	28,0	26,73	99,2	2,27	2,95	177,06
9	1,41	0	1,41	1,9		2,679	6,62	0,70	0	19,2	0	0	28,6	28,5	27,83	92,2	2,68	1,88	112,8
10	1,97	0	1,97	1,65		3,251	7,24	0,33	0	20,7	0	0	23,7	21,8	22,04	84,8	3,25	1,08	64,92
11	1,31	0	1,31	1,6		2,096	5,82	0,98	0	20,8	0	0	23,9	21,5	21,24	80,4	2,09	2,05	123,12
12	2,02	0	2,02	1,62		3,272	7,28	0,06	0	20,8	0	0	23,1	21,8	22,13	89,6	3,27	0,21	12,48
13	2,02	0	2,02	1,52		3,070	7,08	0,78	0	20,8	0	0	24,1	20,4	20,73	71,0	3,08	2,40	144,06
14	2,47	0	2,47	1,85		4,570	8,64	0,07	0	20,8	0	0	23,2	22,5	22,64	94,4	4,58	0,34	20,1
15	1,83	0	1,83	1,58		2,891	6,82	0,5	1	19,8	0	0	32,5	30	30,22	83,5	2,8914	1,52	91,12
16	2,4	1,75	2,075	1,57	1,60	3,258	7,36	0,3	1	20,2	0	0	32,6	33,3	32,80	84,6	3,1955	0,92	55,09
17	1,8	1,5	1,65	1,6	1,61	2,640	6,80	1,30	1	19,8	0	0	31,4	29,3	28,63	85,9	2,64	3,43	205,92
18	1,91	1,57	1,74	1,51	1,52	2,627	5,79	0,36	1	19,8	0	0	31,4	29,4	29,64	86,7	2,63	0,94	56,30
19	2,3	2,13	2,215	1,99	1,99	4,408	8,58	0,36	2	19	5	0	31,6	31,0	30,82	95,6	4,41	1,57	94,45
20	1	0,7	0,85	1,18	1,19	1,003	4,08	0,22	3	18,9	4	0	32,1	31,4	31,39	94,4	1,00	0,22	13,08
21	1,92	1,46	1,69	1,7	1,72	2,873	6,81	0,90	1	19,8	0	0	32,2	30,5	30,11	88,4	2,87	2,59	155,14
22	0,68	1	0,84	0,85	0,86	0,714	3,41	0,90	3	18,4	6	0	31,9	30,4	29,95	93,5	0,71	0,64	38,56
23	1,3	1,72	1,51	1,45	1,47	2,190	5,95	0,90	1	19,8	0	0	31,6	29,5	29,23	85,8	2,19	1,97	118,23
24	1,89	1,61	1,75	1,94	1,95	3,395	7,39	0,42	4	18,8	19	0	31,7	31,2	30,93	96,5	3,40	1,41	84,88
25	1,55	1,43	1,49	1,74	1,74	2,593	6,46	0,12	1	19,6	0	0	31,8	30,5	30,77	89,7	2,59	0,30	18,09
26	0,7	0,51	0,605	0,77	0,78	0,466	2,76	5,2	2	19,3	3	0	32	30,7	25,89	91,5	0,47	2,42	145,35
27	2,1	1,64	1,87	1,65	1,67	3,086	7,07	0,6	1	20,1	0	0	30,8	29,3	29,15	98,8	3,1	1,86	111,60
28	1,75	1,65	1,7	1,5	1,50	2,550	6,40	0,6	1	18,2	0	0	32,1	32,2	31,57	99,9	2,6	1,56	93,60
29	2,35	2,7	2,525	2,31	2,32	5,833	9,68	0,7	1	19,1	0	0	31	31	30,3	99,9	5,8	4,06	243,60
30	1,92	1,53	1,725	1,84	1,85	3,174	7,15	0,9	1	19	0	0	30,9	30,9	30	99,9	3,2	2,88	172,80
31	1,91	1,7	1,805	1,52	1,52	2,744	6,66	1,1	1	19	0	0	30,6	30,6	29,5	99,9	2,7	2,97	178,20
32	1,7	1,19	1,445	1,9	1,92	2,746	6,72	1,1	1	18,9	0	0	30,4	30,4	29,3	99,9	2,75	3,03	181,50
33	2,6	1,7	2,15	2,18	2,23	4,687	8,75	0,36	2	19,1	0	0	31,5	30,3	30,30	99,9	4,69	1,67	100,44
34	2,09	1,74	1,915	1,54	1,55	2,949	6,93	0,08	2	19	0	0	31,7	30,4	30,71	99,9	2,95	0,25	14,75
35	1,7	1,7	1,7	1,67	1,67	2,839	6,74	2,1	1	19,2	0	0	29,8	29,7	27,63	99,9	2,8	5,88	352,80
36	2,21	2,5	2,355	1,27	1,28	2,991	7,27	0,7	2	20,6	0	0	23,9	22,5	22,22	88,9	2,99	2,09	125,62
37	1,89	1,48	1,685	1,6	1,61	2,696	6,60	0,5	1	20,7	0	0	23,6	21,8	21,84	84,9	2,70	1,35	80,88
38	1,83	1,65	1,74	1,62	1,62	2,819	6,72	0,9	1	20,7	0	0	23,7	21,3	21,12	81,3	2,82	2,54	152,22
39	1,97	1,78	1,875	1,27	1,27	2,381	6,30	0,28	1	20,7	0	0	22,7	20,6	20,95	82,5	2,38	0,66	39,69
40	2,05	1,53	1,79	1,78	1,80	3,186	7,18	0,4	0	21	0	0	24	22,7	22,69	74,6	3,19	2,87	172,05

## **2.4. Simulación de ventilación natural y actual de la mina**

Con los datos obtenidos en el campo mediante los aforos y recorrido por la mina, se puede apreciar que se forman una serie de nodos, galerías, ramas, tapones, etc. Que componen el circuito, los cuales deben ser ingresados al software para poder tener un circuito de ventilación más realista asignado las respectivas resistencias y demás accesorios y detalles de ventilación de tal manera que nos permita visualizar más fácilmente los siguientes aspectos:

- Zonas la ventilación deficiente
- Zonas de acumulación de gases
- Nivel de material particulado en el aire
- Temperaturas en diferentes zonas de la mina
- Flujos de aire a lo largo de los accesos de la mina
- Ambiente de trabajo, etc.

### **2.4.1. Simulación de ventilación natural**

La visualización gráfica que ofrece el software es muy útil para comprobar los valores de los parámetros simulados, pero para poder comprender mejor el modelo es importante conocer los sentidos que toma la ventilación. Es decir de qué manera está fluyendo a través de los diferentes accesos que existen en la mina o en qué lugares existen obstrucciones que impiden que el aire fluya a los niveles más profundos de la mina disminuyendo de esta manera la eficiencia del sistema de ventilación.

Con los datos proporcionados por parte de la empresa en cuanto a la topografía de la mina, se puede observar que se crean una serie de nodos y ramas las cuales componen el circuito de ventilación. Debido a esto se debe proceder a trabajar en el software de manera cronológica es decir detallando información sobre diferentes aspectos como: (el área y forma de la sección, niveles de gases en el ambiente, puertas, sellamientos, etc.) realizando un barrido de la mina desde sus accesos principales hasta los niveles más profundos de la mina, de tal forma que nos permita poder representar el circuito de ventilación en el software lo más similar a la realidad.

A continuación se mostrará una simulación de la mina solo con base en su ventilación natural, es decir, sin el funcionamiento de los ventiladores presentes con el objetivo de que nos sirva de referencia en las posteriores simulaciones ayudándonos a observar los cambios en los flujos de caudales y temperaturas en los diferentes niveles de la mina.

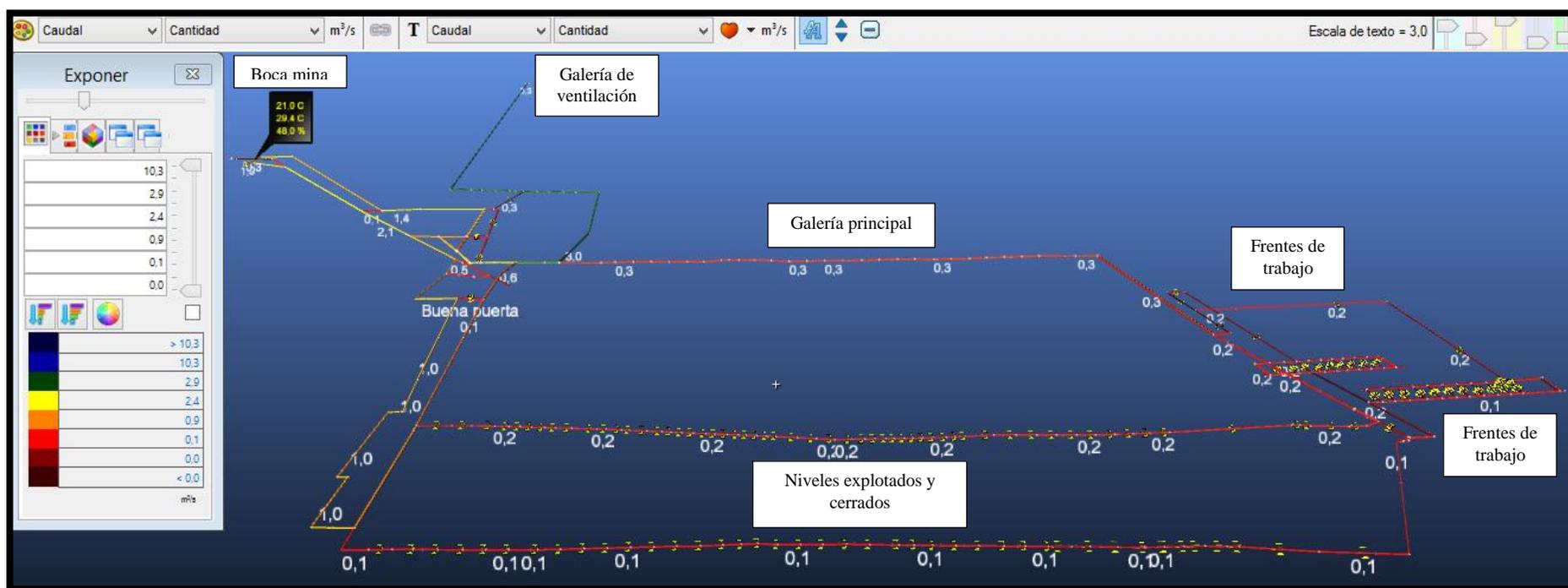


Figura2.2. Ventilación natural en la mina

Como se puede observar en la simulación realizada solo con ventilación natural los valores de caudales de aire son muy bajos a medida que nos vamos adentrando a los niveles más profundos, esto da paso a que se incumpla con lo establecido en el Art. 28 del decreto 1886.

Se puede observar claramente que solo en las cercanías de la bocamina y de la galería de ventilación, los caudales que están por encima de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  pero que de igual manera no llega a cumplir con la normativa legal que establece las condiciones de trabajo en minería subterránea por lo cual la mina no puede operar solo con base en ventilación natural y se ve en la necesidad de recurrir a ventilación artificial mediante la implementación de ventiladores en diferentes puntos a lo largo de la mina los cuales se van a mostrar más adelante.

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Conductos de ventilación	295
Longitud total	6.684,9 m
Caudal de aire total de admisión	3,4 $\text{m}^3/\text{s}$
Caudal de aire total de escape	3,5 $\text{m}^3/\text{s}$
Flujo de masa total	3,78 Kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	5,21347 $\text{Ns}^2/\text{m}^8$
Resistencia de la mina (incluyendo conductos)	5,21347 $\text{Ns}^2/\text{m}^8$
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia de aire (pérdida por fricción)	0.2 KW Total
	0.0 KW Chimenea
	0.2 KW Conducir
	0.0 KW Conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0.0 KW
Potencia eléctrica de entrada	0.0 KW
Costo de energía anual de la red	\$0
Eficiencia de la red	Infinito %
Que consta de:	
0 Ventiladores	0.0 KW
0 Presiones fijadas	0.0 KW
0 Flujos fijados	0.0 KW
0 Refrigeración	0.0 KW

Figura 2.3. Resultados de simulación del sistema de ventilación natural

Como se observa en el cuadro de resumen del sistema de ventilación natural los valores más altos solo se encuentran en el punto de entrada y salida del circuito, los costos de energía anual son de 0 en vista que no se está utilizando ningún sistema artificial de ventilación.







Figura 2.6. Temperaturas de bulbo húmedo actual en °C.

Aquí se pueden observar a que temperatura se encuentran los diferentes niveles de la mina expresados en bulbo húmedo.

Como se puede apreciar en la figura 2.4. La diferencia de caudales de aire a lo largo de los distintos accesos de la mina es muy notoria esto se debe a que se cuenta con la implementación de 9 ventiladores distribuidos en diferentes puntos de la mina, cumpliendo diferentes funciones según su ubicación, algunos funcionan como extractores y otros como ventiladores, por la gran dimensión de la mina los ventiladores están en constante funcionamiento las 24 horas al día y los 365 días del año, como ya se explicó anteriormente.

El ventilador que se encuentra apagado en el sistema se debe a que se encuentra operando bajo presiones muy bajas o nulas dentro del software se conoce como estado “stall” es decir que está operando con presiones por debajo de su capacidad más baja pero superiores a cero lo cual es solo una pérdida de energía para la empresa y en vez de contribuir al circuito de ventilación representa una resistencia considerable disminuyendo de esta manera el flujo de aire.

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Conductos de ventilación	312
Longitud total	6.768,2 m
Caudal de aire total de admisión	10,4 m <sup>3</sup> /s
Caudal de aire total de escape	10,0 m <sup>3</sup> /s
Flujo de masa total	11,14 Kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	9,87608 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (incluyendo conductos)	9,90725 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia de aire (pérdida por fricción)	10,6 KW Total
	0.0 KW Chimenea
	10,6 KW Conducir
	0.0 KW Conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0,0 KW
Potencia eléctrica de entrada	15,0 KW
Costo de energía anual de la red	\$ 13.116
Eficiencia de la red	70,9 %
Que consta de:	
9 Ventiladores	15,0 KW
0 Presiones fijadas	0.0 KW
0 Flujos fijados	0.0 KW
0 Refrigeración	0.0 KW

Figura 2.7. Resumen del sistema de ventilación actual

A diferencia del ejemplo con ventilación natural en este cuadro ya se muestran otros campos como el costo de energía anual por los ventiladores instalados flujos de aire más altos potencia eléctrica requerida.

### **2.4.3. Análisis de la simulación natural y actual de la mina**

Una vez realizadas ambas simulaciones en el software VentSim® con los diferentes valores levantados durante la visita de campo y los aforos realizados se puede determinar que es imposible abastecer a la mina con un caudal de aire necesario para operar con normalidad en los frentes de trabajo y demás niveles mediante un sistema de ventilación no forzado, es decir, solo mediante el uso de ventilación natural.

De igual forma analizando los resultados numéricos de flujos de caudal en la mina en ambas simulaciones se observan zonas en la mina en las cuales los valores de flujos de aire son muy bajos o negativos lo cual sería alarmante en caso de que por esos accesos tenga que circular personal o sean frentes de trabajo pero generalmente estas zonas son galerías o frentes de trabajo abandonado que se encuentran sellados o parcialmente rellenos por material estéril, derrumbes o inundaciones por la presencia de aguas subterráneas.

Sin embargo se va a realizar varias simulaciones en las cuales estas zonas serán selladas completamente evitando que se generen fugas o pérdidas de caudal de aire para ver en qué forma contribuyen a la optimización del sistema.

O por el contrario habilitarlas de tal forma que faciliten el paso del aire a los niveles más profundos y analizar bajo cuál de las dos circunstancias mejora considerablemente el sistema siempre y cuando analizando la opción más rentable desde el punto de vista técnico/económico.

Se puede tener en consideración para las posteriores simulaciones alternativas como:

- La colocación de sellos en puntos estratégicos que favorezcan al circuito de ventilación establecido
- La ampliación de las galerías principales por las que constantemente circula el personal de tal forma que facilite el paso de aire a los niveles más profundos
- Reubicación de ventiladores que estén operando de forma ineficiente
- Instalación de ductos de ventilación a zonas en las cuales los niveles de aire sean muy bajos

### **2.5. Simulación de alternativas de ventilación propuestas**

Con el fin de mejorar el circuito de ventilación de la mina se han introducido al modelo de ventilación actual diferentes alternativas de manera que aporten a una mejora en la red de ventilación, incorporando nuevos sellos, puertas, ventiladores, etc. a lo largo de todo el sistema de ventilación esperando se logre obtener resultados positivos que logren cumplir con el objetivo del estudio.

Después de realizar diferentes simulaciones bajo condiciones de ventilación alternas, se pueden apreciar los diferentes resultados de flujos de caudal de aire en la mina, de los cuales se obtendrá el que nos brinde el mejor resultado técnico/económico.

A continuación se detallará cuáles fueron los diferentes cambios que se realizaron para cada una de las simulaciones presentadas bajo diferentes condiciones, en busca de una optimización en la red de ventilación de la mina vista desde diferentes parámetros como:

- Caudales de aire
- Velocidades de los flujos de aire
- Temperaturas generadas en bulbo húmedo

Una vez que se halla ingresado las diferentes simulaciones se procederá a realizar un análisis comparativo de los resultados de cada una para poder determinar cuál es la que mejora las condiciones de ventilación de la mina, de forma que cumpla con las normas establecidas y brinde un mejor ambiente de trabajo y seguridad para el personal que labora en la misma.

Durante el desarrollo del trabajo se buscará la alternativa más conveniente para garantizar un sistema óptimo de ventilación siempre y cuando cumplan con los parámetros mínimos establecidos en el decreto 1886 los cuales son:

- Contenido de Oxígeno: mínimo 19.5%, máximo 23.5 % en volumen
- Condensado de hidrocarburos (aceite de lubricación) menor o igual a 5 mg/m<sup>3</sup> de aire
- Concentración de Monóxido de Carbono menor a 10 ppm
- Concentración de Dióxido de Carbono menor de 1000 ppm
- Libre de olores y de otros contaminantes
- Reducir al mínimo el contenido de humedad de modo que el punto de rocío a una atmósfera de presión es 5,56°C por debajo de la temperatura ambiente
- Temperatura óptima del aire debe ser de 25°C ± 4°C

### 2.5.1. Simulación con reubicación de ventiladores

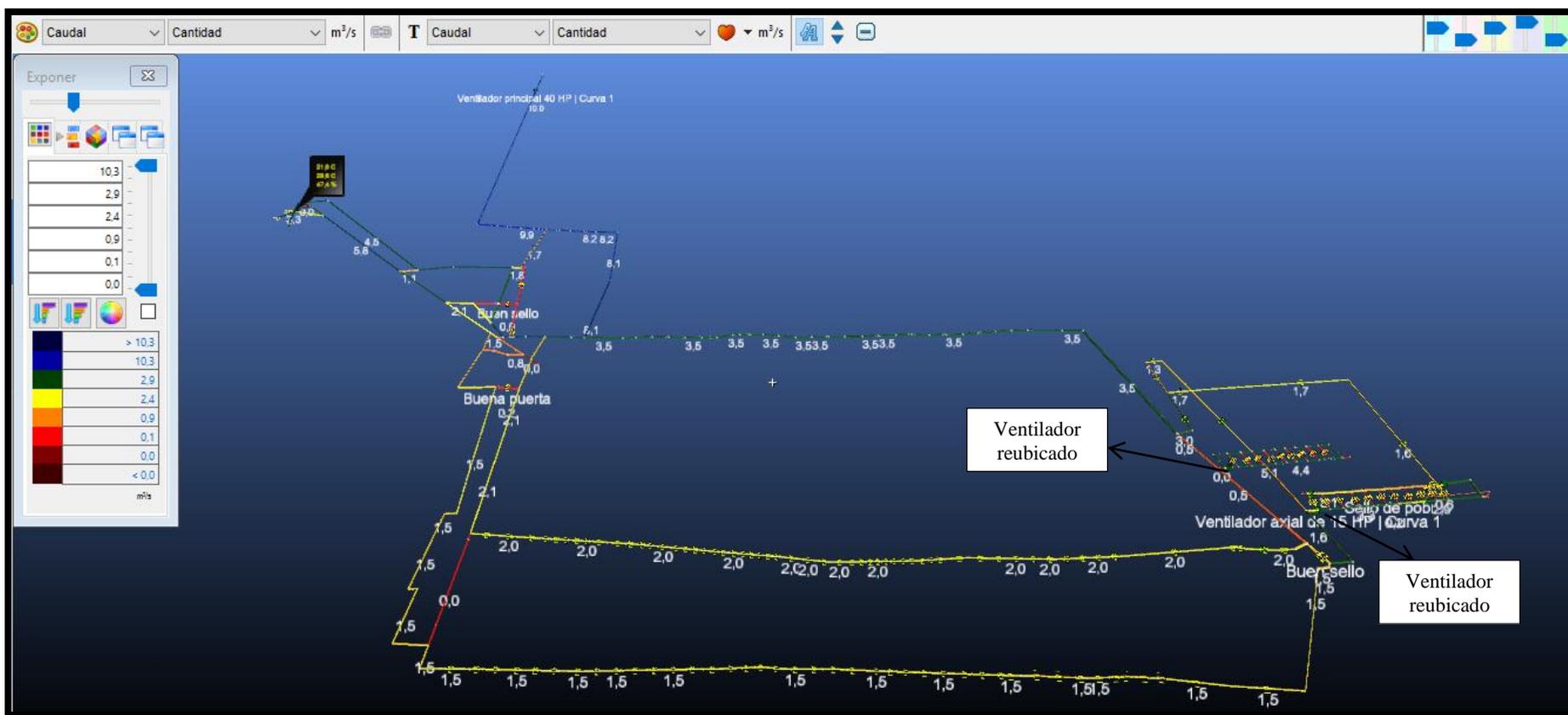


Figura 2.8. Caudales de aire simulación 1 en  $m^3/s$ .

Para esta simulación se reubico el ventilador que se muestra apagado en la figura 2.4. En los frentes de explotación lo cual incremento considerablemente el caudal de aire que circula en esos niveles de la mina, se reubicaron 2 ventiladores más para mejorar las condiciones de caudales de aire y temperatura facilitando de esta manera las labores de extracción de carbón y brindando mayor seguridad al personal.

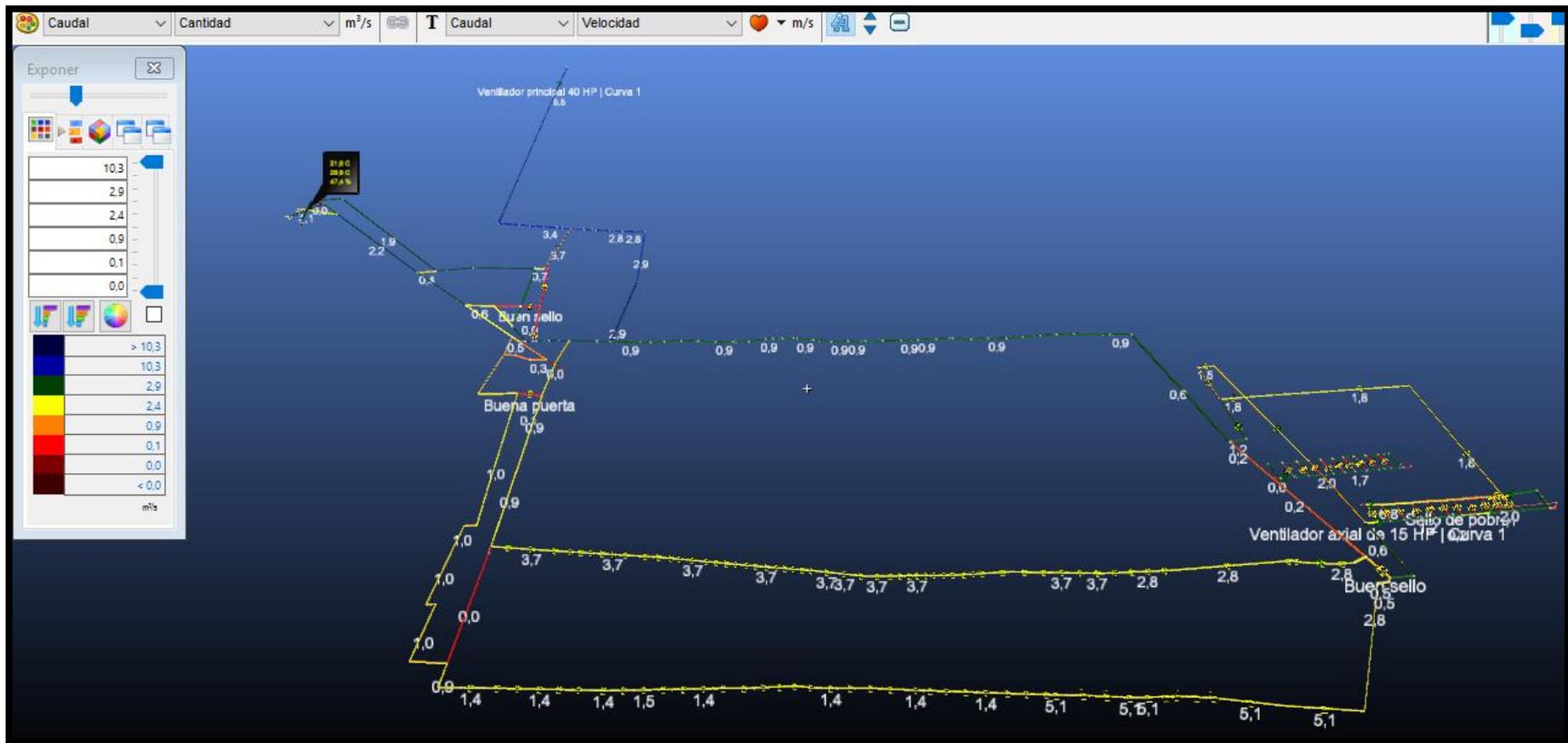


Figura2.9. Velocidad de flujos de aire simulación 1 en m/s.

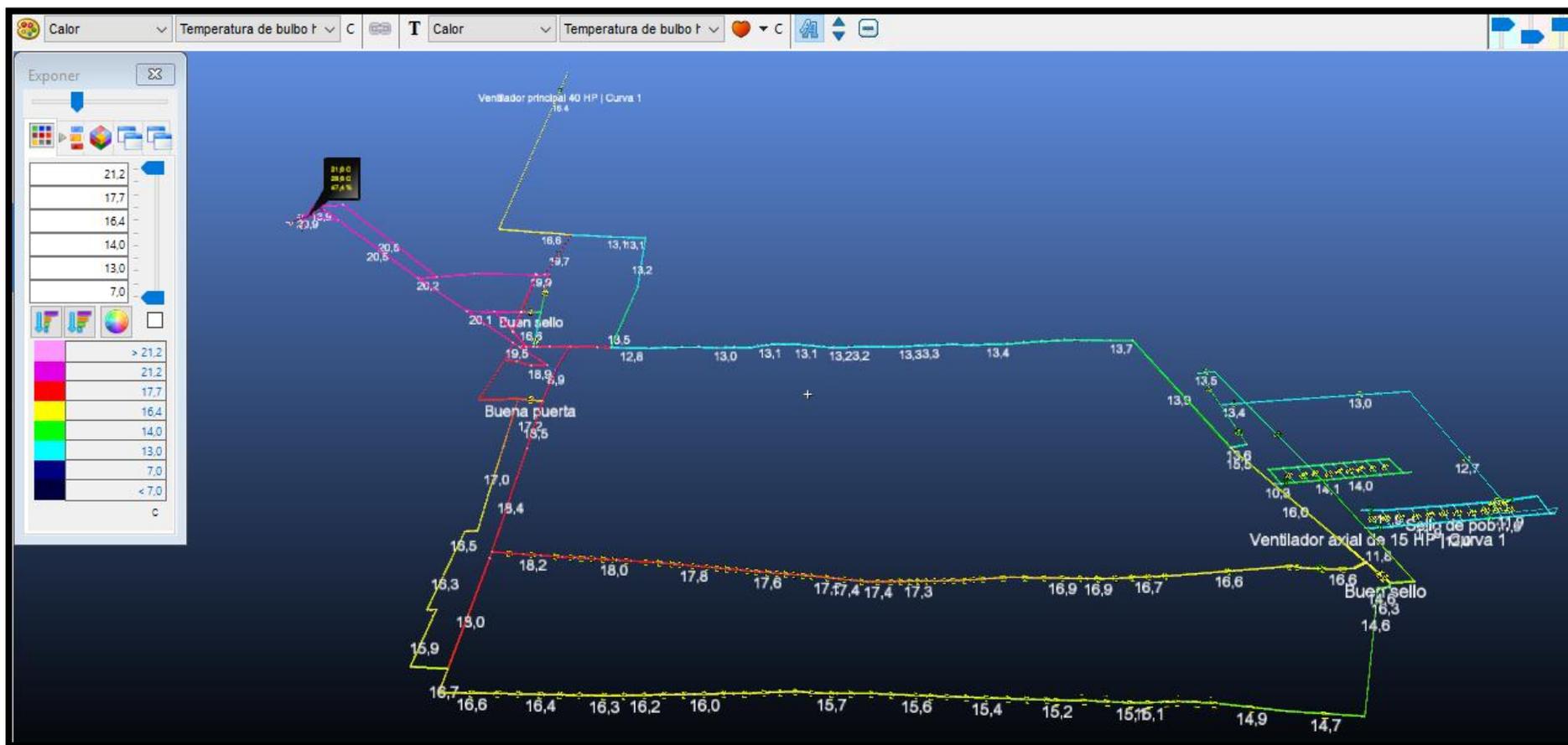


Figura 2.10. Temperatura bulbo húmedo simulación 1 en °C.

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Conductos de ventilación	303
Longitud total	6.743,3 m
Caudal de aire total de admisión	10,4 m <sup>3</sup> /s
Caudal de aire total de escape	10,0 m <sup>3</sup> /s
Flujo de masa total	11,14 Kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	9,79353 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (incluyendo conductos)	9,79592 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia de aire (pérdida por fricción)	10,5 KW Total
	0.0 KW Chimenea
	10,5 KW Conducir
	0.0 KW Conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0,0 KW
Potencia eléctrica de entrada	14,8 KW
Costo de energía anual de la red	\$ 12.958
Eficiencia de la red	70,9 %
Que consta de:	
9 Ventiladores	14,8 KW
0 Presiones fijadas	0.0 KW
0 Flujos fijados	0.0 KW
0 Refrigeración	0.0 KW

Figura 2.11. Resumen del sistema de ventilación simulación 1



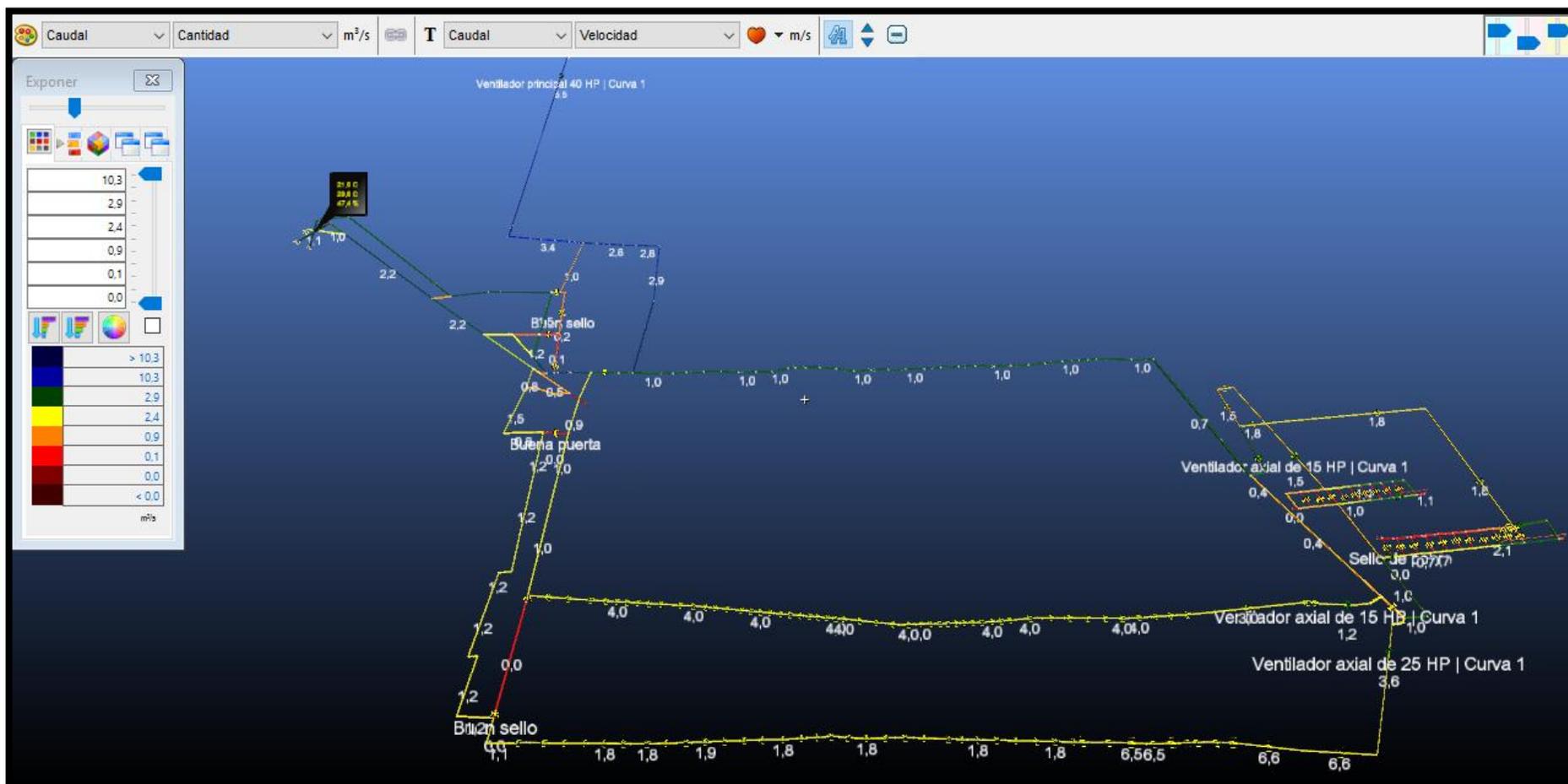


Figura 2.13. Velocidad de flujos de aire simulación 2 en m/s.

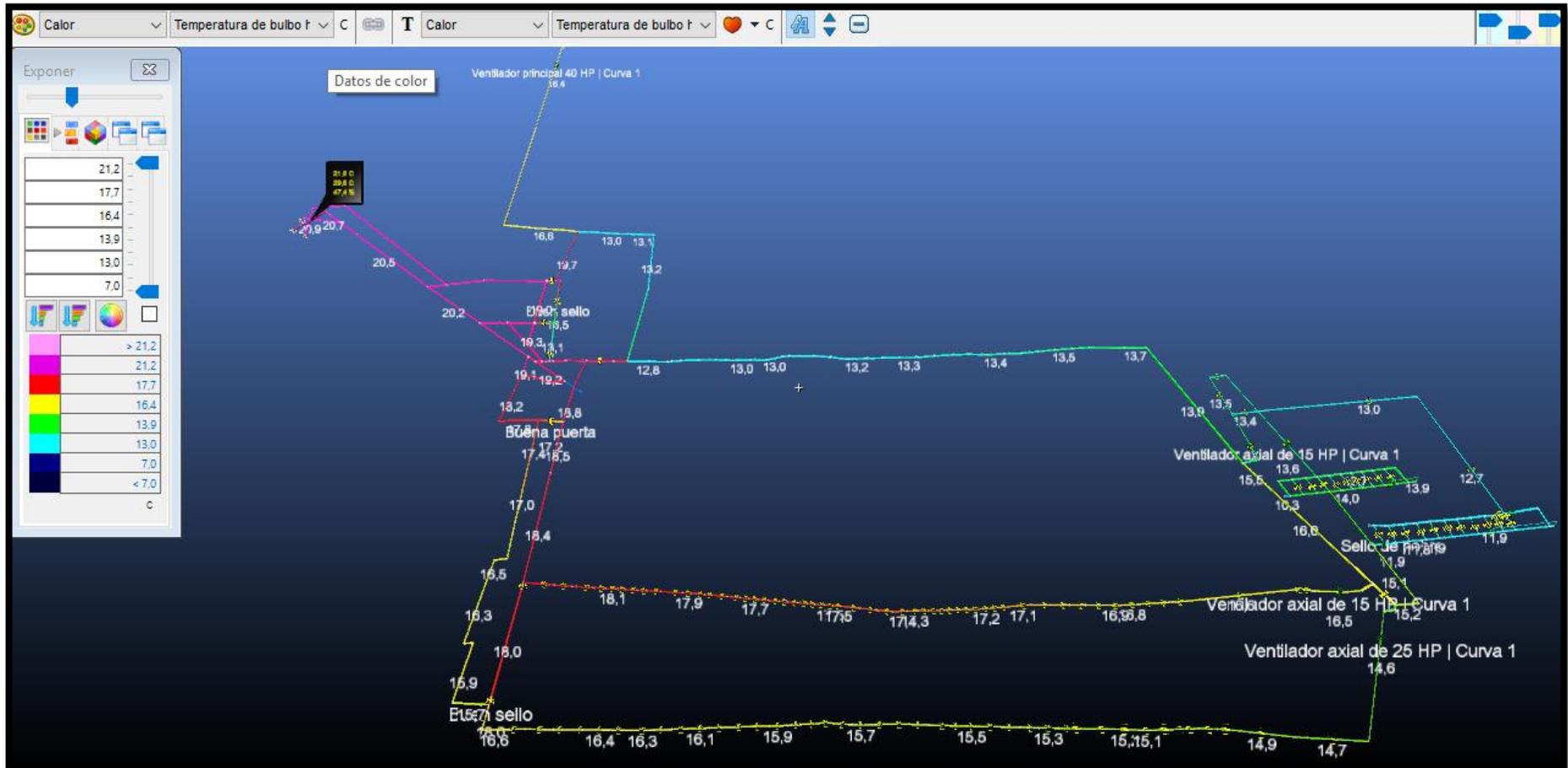


Figura 2.14. Temperatura bulbo húmedo simulación 2 en °C.

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Conductos de ventilación	312
Longitud total	6.768,2 m
Caudal de aire total de admisión	10,3 m <sup>3</sup> /s
Caudal de aire total de escape	9,9 m <sup>3</sup> /s
Flujo de masa total	10,99 Kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	11,06058 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (incluyendo conductos)	11,06360 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia de aire (pérdida por fricción)	11,4 KW Total
	0.0 KW Chimenea
	11,4 KW Conducir
	0.0 KW Conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0,0 KW
Potencia eléctrica de entrada	16,0 KW
Costo de energía anual de la red	\$ 13.998
Eficiencia de la red	71,2 %
Que consta de:	
9 Ventiladores	16,0 KW
0 Presiones fijadas	0.0 KW
0 Flujos fijados	0.0 KW
0 Refrigeración	0.0 KW

Figura 2.15. Resumen del sistema de ventilación simulación 2

### 2.5.3. Simulación combinada

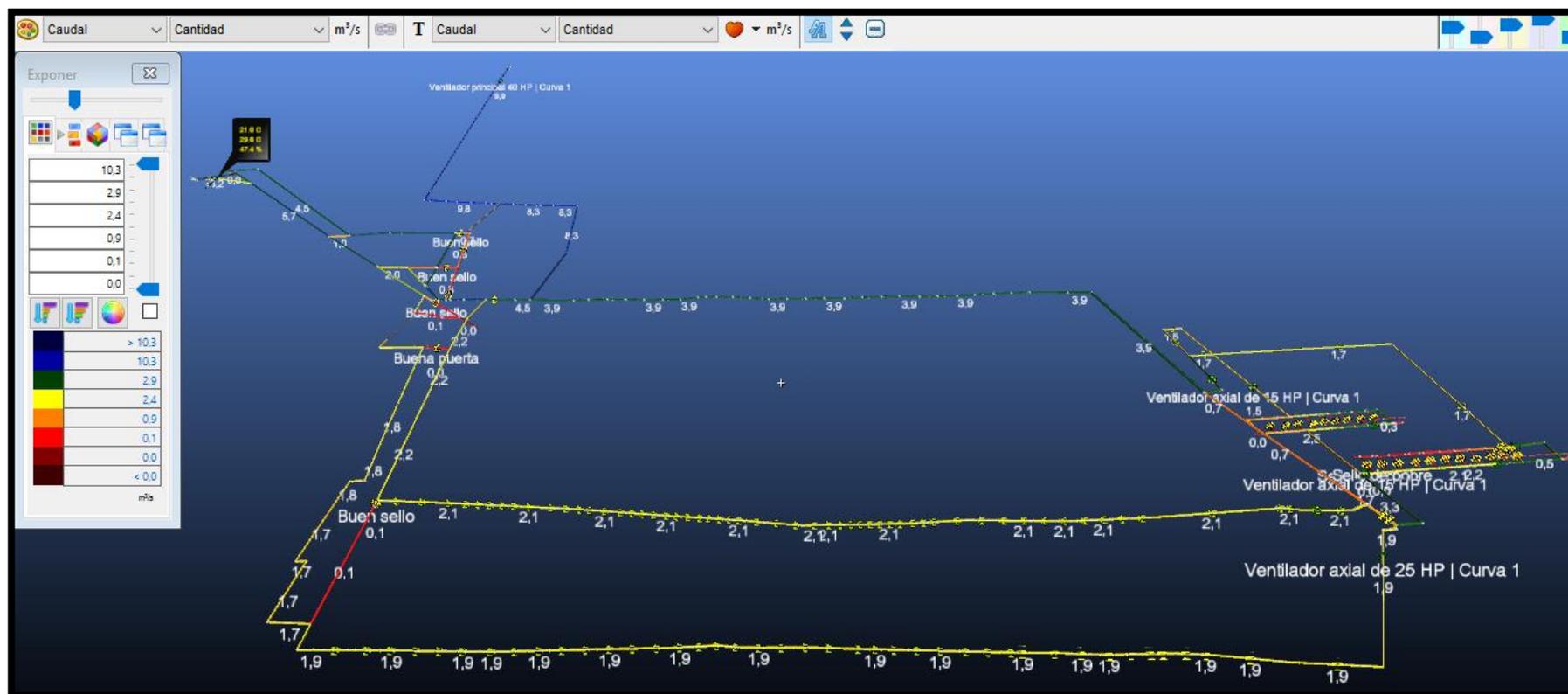


Figura 2.16. Caudales de aire simulación 3 en  $m^3/s$ .

Esta simulación se la va a realizar reubicando los ventiladores y colocando sellamientos de forma conjunta como se hizo en las simulaciones 1 y 2 de manera que se logre alcanzar un grado más óptimo de ventilación.

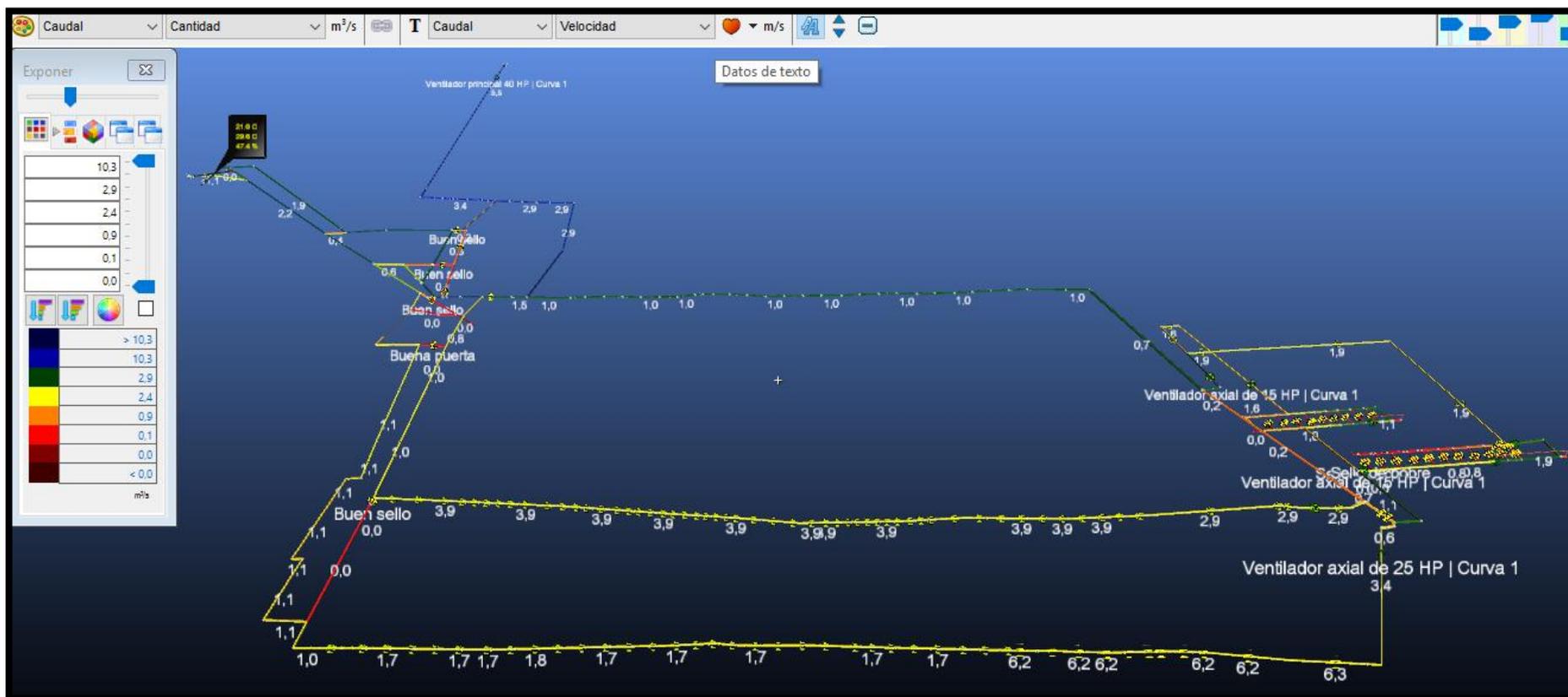


Figura 2.17. Velocidad de flujos de aire simulación 3 en m/s.

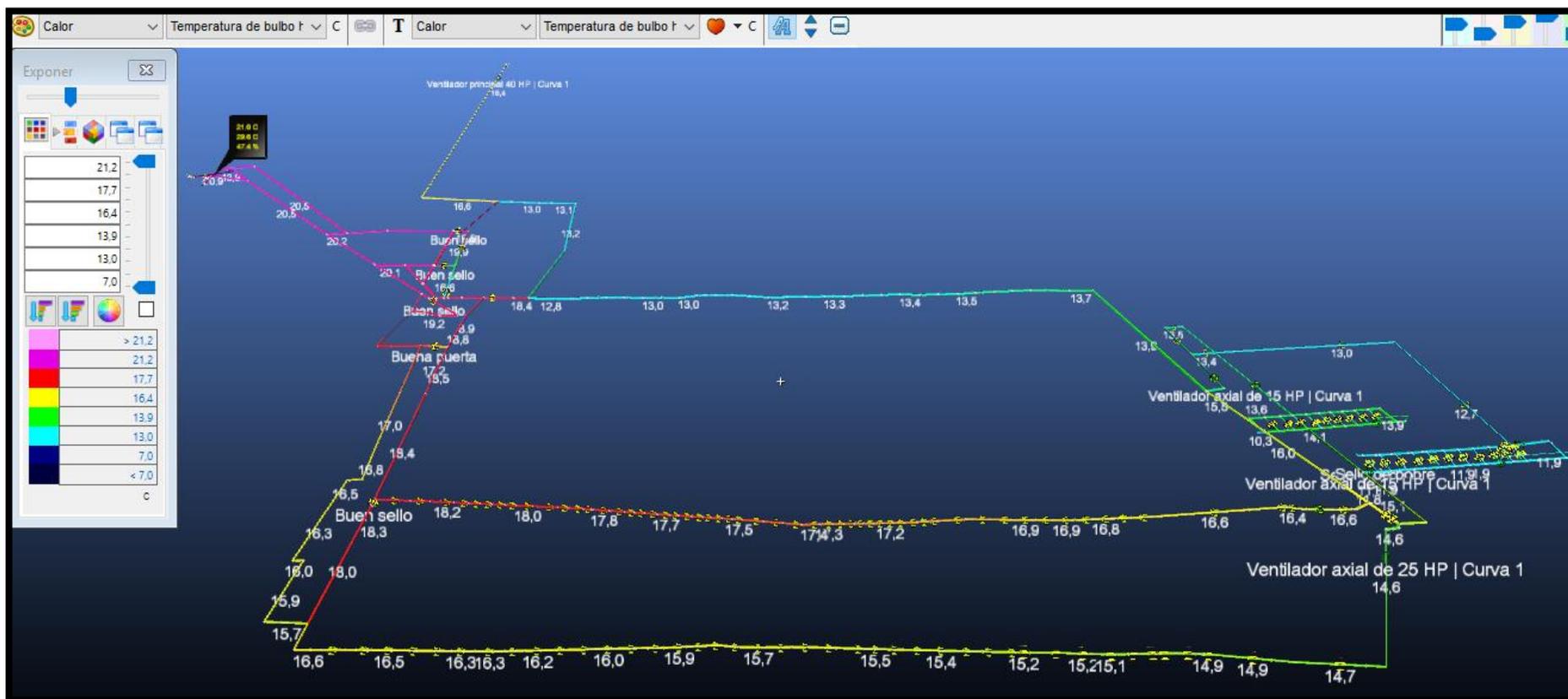


Figura 2.18. Temperatura bulbo húmedo simulación 3 en °C.

RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
<b>Conductos de ventilación</b>	312
<b>Longitud total</b>	6.768,2 m
<b>Caudal de aire total de admisión</b>	10,3 m <sup>3</sup> /s
<b>Caudal de aire total de escape</b>	10,0 m <sup>3</sup> /s
<b>Flujo de masa total</b>	11,05 Kg/s
<b>Resistencia de la mina (sin tubo)</b>	10,47210 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
<b>Resistencia de la mina (incluyendo conductos)</b>	10,47444 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
RESUMEN DE POTENCIA	
<b>Potencia de aire (pérdida por fricción)</b>	10,9 KW Total
	0.0 KW Chimenea
	10,9 KW Conducir
	0.0 KW Conducto de ventilación
<b>Refrigeración potencia de entrada</b>	0,0 KW
<b>Potencia eléctrica de entrada</b>	15,4 KW
<b>Costo de energía anual de la red</b>	\$ 13.481
<b>Eficiencia de la red</b>	71,0 %
Que consta de:	
<b>9 Ventiladores</b>	15,4 KW
<b>0 Presiones fijadas</b>	0.0 KW
<b>0 Flujos fijados</b>	0.0 KW
<b>0 Refrigeración</b>	0.0 KW

Figura 2.19. Resumen del sistema de ventilación simulación 3

## 2.5.4. Simulación con ampliación de galerías principales

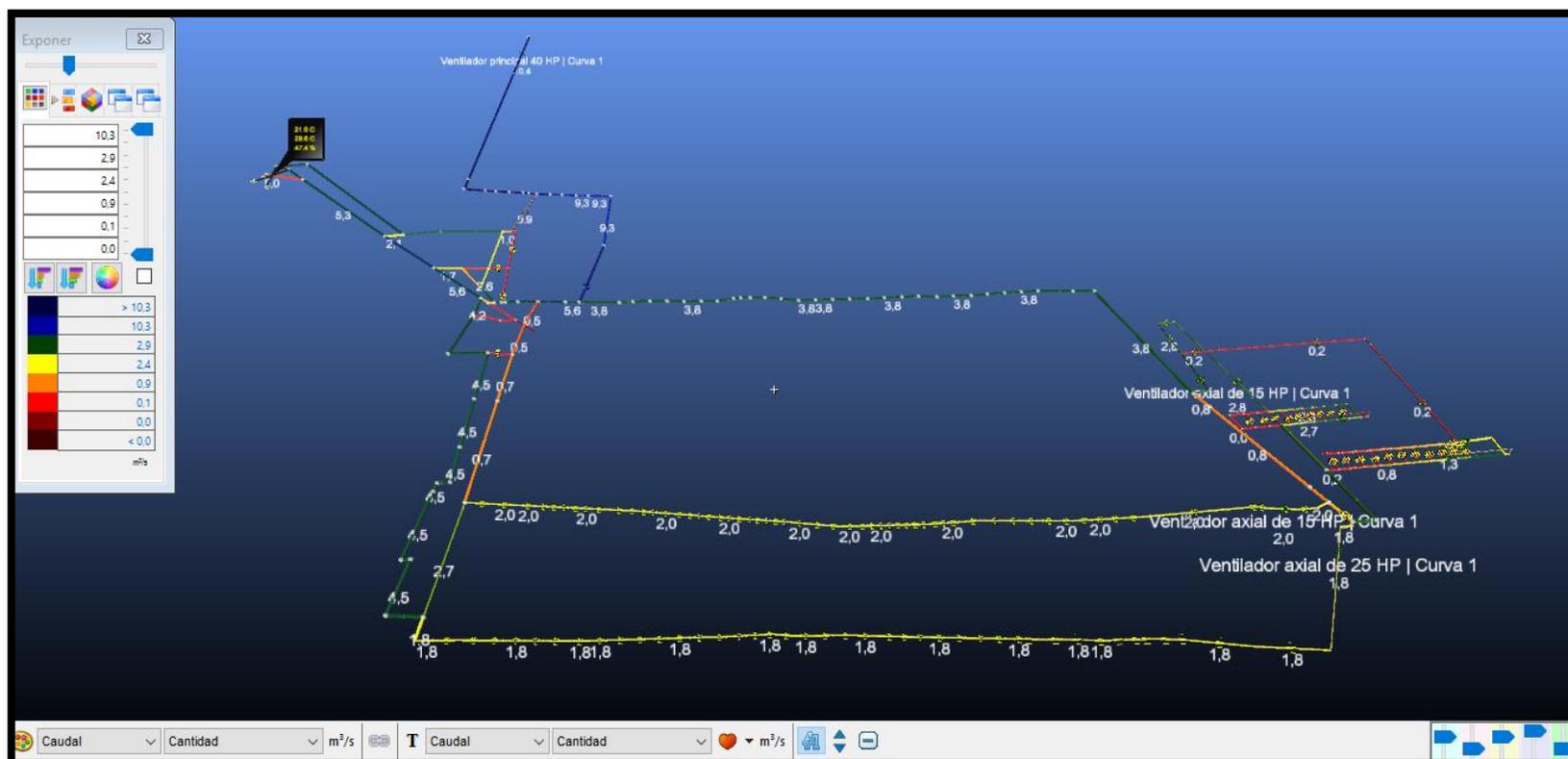


Figura 2.20. Caudales de aire simulación 4 en m<sup>3</sup>/s.

Para esta simulación se realizará una ampliación en las galerías principales de la manera de manera que nos permita verificar lo mencionado en la teoría, pudiendo demostrar que una mina con galerías amplias es más fácil de ventilar que una de galerías reducidas sin embargo disminuye la velocidad del aire que fluye a través de la misma.

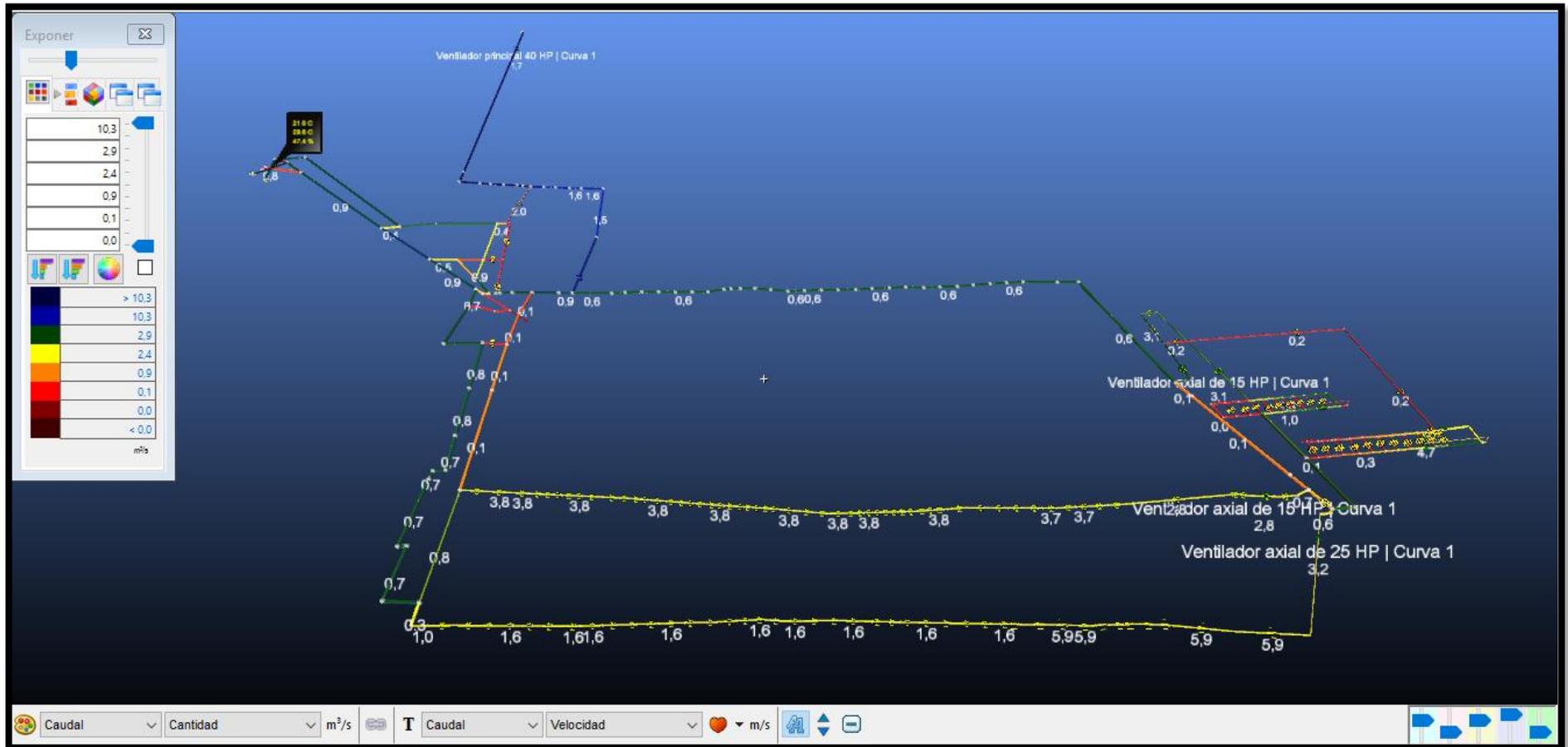


Figura 2.21. Velocidad de flujos de aire simulación 4 en m/s.



RESUMEN DE LA RED DEL SISTEMA	
Conductos de ventilación	312
Longitud total	6.768,2 m
Caudal de aire total de admisión	10,9 m <sup>3</sup> /s
Caudal de aire total de escape	10,4 m <sup>3</sup> /s
Flujo de masa total	11,65 Kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	4,85552 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (incluyendo conductos)	4,88301 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
RESUMEN DE POTENCIA	
Potencia de aire (pérdida por fricción)	5,9 KW Total
	0.0 KW Chimenea
	5,9 KW Conducir
	0.0 KW Conducto de ventilación
Refrigeración potencia de entrada	0,0 KW
Potencia eléctrica de entrada	8,6 KW
Costo de energía anual de la red	\$ 7.516
Eficiencia de la red	69,0 %
Que consta de:	
9 Ventiladores	8,6 KW
0 Presiones fijadas	0.0 KW
0 Flujos fijados	0.0 KW
0 Refrigeración	0.0 KW

Figura 2.23. Resumen del sistema de ventilación simulación 4

### 2.5.5. Análisis de simulaciones alternativas

Una vez establecidas las simulaciones bajo diferentes condiciones se puede determinar que:

- Mediante la reubicación de aquellos ventiladores que se encontraban trabajando por debajo de la capacidad con la que fueron diseñados se logró obtener un incremento muy bueno en cuanto a la ventilación en los frentes de trabajo, garantizando de esta manera un ambiente bajo el cual el personal labore adecuadamente, contribuyendo de esta manera a la productividad de la mina
- La colocación de nuevos sellamientos en puntos estratégicos dentro de la red de ventilación contribuyen a una mejor distribución en los flujos de aire a lo largo de todos los accesos y galerías que tiene la mina, dándole prioridad a los frentes de trabajo y galería principal por la cual hay constante tránsito de personal lo cual es beneficioso ya que la implementación de los mismos no representa una elevada inversión para la empresa y se obtiene buenos resultados
- Durante el desarrollo del trabajo se logró observar que la mejor alternativa es un sistema combinado de reubicación de ventiladores y colocación de nuevos sellamientos en diferentes niveles de la mina ya que se logra obtener buenos flujos de aire a lo largo de casi toda la mina, mas no, solamente en los frentes de trabajo y accesos principales lo cual beneficia a la empresa ya que en caso de una obstrucción en el acceso principal tienen estos accesos secundarios como alternativa de evacuación bajo condiciones de ventilación adecuadas
- Se realizó una simulación ampliando la sección de las galerías principales de la mina y se pudo observar que la velocidad del aire disminuía y los caudales no varían considerablemente sin embargo la resistencia de la mina a ser ventilada se redujo casi a la mitad lo cual incrementa el valor del orificio equivalente facilitando de esta manera la ventilación
- Se tuvo en consideración también el de eliminar las obstrucciones y rellenos presentes en algunos niveles y accesos de la mina de forma que facilite el paso del aire pero la remoción de este material y agua sería muy costoso y laborioso por lo cual se descartó esta opción

Tabla 2.3. Comparación de resultados entre simulaciones.

Simulaciones	Caudal de admisión (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Resistencia equivalente (Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup> )	Orificio equivalente (m <sup>2</sup> )	Costos anuales de energía (\$)
Ventilación natural	3.4	(0.1-0.2)	-	5,21	0,17	0
Situación actual de la mina	10.4	(0.9 -2.4)	(14 - 17)	9,87	0,12	13116.00
Reubicación de ventiladores	10.4	(0.9-2.5)	(13 - 17)	9,79	0,12	12958.00
Colocación de nuevos sellamientos	10.3	(1 - 3)	(14 - 18)	11,06	0,11	13998.00
Sistema combinado	10.3	(1 - 2.7)	(13 - 17)	10,47	0,12	13481.00
Ampliación de galerías	10.9	(0.9- 1.5)	(14 - 19)	4,85	0,17	7516.00

## 2.6. Cálculo de orificio equivalente

A continuación se procederá a calcular el orificio equivalente para cada una de nuestras simulaciones de tal manera que se logre observar con cuál de ellas se logra obtener un orificio equivalente adecuado y de esta manera determinar bajo que categoría se encuentra ubicada nuestra mina según el grado de dificultad a ser ventilada como se muestra en la tabla 4.

$$\Omega = \frac{0.38}{\sqrt{R_e}}$$

Dónde:

- $\Omega$  = Orificio equivalente en m<sup>2</sup>
- $R_e$  = Resistencia equivalente de la mina en (Ns<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>)

Mediante la aplicación de esta fórmula utilizando el valor de resistencia equivalente de la mina que se obtiene mediante el software VentSim® se podrá determinar el valor del orificio equivalente.

Tabla 2.4. Orificio equivalente de cada simulación

<b>Simulaciones</b>	<b>Resistencia equivalente (Ns<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>)</b>	<b>Orificio equivalente (m<sup>2</sup>)</b>
Ventilación natural	5,21	0,17
Situación actual de la mina	9,87	0,12
Reubicación de ventiladores	9,79	0,12
Colocación de nuevos sellamientos	11,06	0,11
Sistema combinado	10,47	0,12
Ampliación de galerías	4,85	0,17

$$1 \text{ Kilomurgue (KM)} = 1 \text{ Weis bach (Wb)}$$

Con estos resultados se puede observar que la mina se encuentra ubicada dentro de la categoría de minas de sección reducida difíciles de ventilar como se muestra en la tabla 1.4.

Como se puede apreciar en la tabla 2.3. Los valores de resistencia más bajos son los de la simulación por ventilación natural y la simulación de ampliación de galerías, sin embargo cabe resaltar que en la ventilación natural no se contempla sellamientos ni equipos mecánicos de ventilación que contribuyen a la resistencia de la mina a diferencia de la ampliación de galerías que se realizó teniendo en cuenta todos los factores que afectan dicha resistencia y que por la variación en las secciones se vio reducida lo cual facilita el tránsito de aire a niveles más profundos mejorando la red de ventilación de la mina.

## 2.7. Conclusiones.

- Como se pudo observar a lo largo de las varias simulaciones realizadas en la mina bajo diferentes condiciones es muy importante realizar un estudio bien detallado antes de colocar un equipo de ventilación mecánica ya que puede estar sobredimensionado y en lugar de contribuir a la ventilación de la mina solo obstruye los flujos de aire y no trabaja en sus capacidades ideales lo cual solo representa un gasto innecesario de energía para la empresa.
- Al tratarse de una mina de carbón se debe tener cuidado especial en cuanto a la ventilación por su alto contenido de gases explosivos, grisú, y nocivos, además del material particulado que se encuentra presente en la atmosfera de la mina es por esto que la mina cuenta con ventilación asistida las 24 horas durante todos los días laborables en el año.
- Mediante la simulación que se realizó de ampliación de secciones en las labores principales de la mina se logró observar claramente una reducción en la resistencia de la mina lo cual demuestra la importancia que tiene la forma y el tamaño de las galerías en una red de ventilación.
- Como se puede apreciar en las diferentes simulaciones que se realizaron el en trabajo los costos de energía son similares en las 3 primeras simulaciones ya que se realizaron pequeñas variaciones en el sistema con lo que se contribuyó a que los ventiladores trabajen dentro de su rango óptimo evitando de esta manera un desperdicio de energía lo cual repercute en pérdidas para la empresa y en la última simulación el costo de energía anual disminuye considerablemente ya que los accesos de la mina son ampliados lo cual facilita más la ventilación de la mina dejando de ser necesario el uso de algunos ventiladores con los que cuenta actualmente la empresa.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

- A lo largo del trabajo se pudo observar que la influencia del área y la forma de una sección en labores subterráneas mineras afectan significativamente el flujo de la red de ventilación con la que cuenta la mina ya que mientras más grande sea el área el aire va a fluir con mayor facilidad sin embargo su velocidad va a disminuir es por esto que se debe encontrar un punto de equilibrio que permita optimizar el sistema de ventilación.
- Durante el desarrollo de las simulaciones de ventilación se logró determinar que la aplicación de los cambios propuestos en las diferentes simulaciones es muy factible ya que se emplearía equipos con los que ya cuenta la empresa lo cual no representaría una gran inversión para ellos y que la aplicación de estos cambios les contribuiría en la ventilación mejorando el ambiente de trabajo y las condiciones de seguridad en la mina.
- El estudio de ventilación en minería subterránea de carbón es de suma importancia ya que mediante estos sistemas se logran controlar y prevenir muchos accidentes como: incendios, muerte por gases, enfermedades pulmonares, etc. Es por esto que el uso de herramientas como las que nos ofrece VentSim® nos ayuda a verificar diferentes situaciones a las que podemos estar expuestos o se nos puedan presentar y tomar medidas preventivas a tiempo evitando de esta manera cualquier tipo de inconvenientes.
- Mediante la reubicación de equipos de ventilación mecánicos que se encuentran ubicados en diferentes niveles al interior de la mina, más la colocación de sellamientos en diferentes puntos de la mina se logró generar una red de ventilación que cumple con los parámetros establecidos en el decreto 1886 nombrados anteriormente, evitando de esta manera la adquisición de nuevos equipos que solo incrementarían de forma innecesaria los costos operativos de la empresa.
- Es de suma importancia durante los estudios y evaluaciones de ventilación de una mina tener siempre en cuenta el orificio equivalente ya que es el que nos va indicar el grado de dificultad de la mina a ser ventilada teniendo siempre presente todos los factores que afecten la resistencia de la mina a ser ventilada para poder tener una representación más realista en los flujos de ventilación.

**Recomendaciones:**

- La presencia de obstrucciones, rellenos y demás accesorios con los que cuente la mina como fortificaciones contribuyen a la resistencia de la mina a ser ventilada por lo cual es de suma importancia tener siempre en cuenta este tipo de factores que intervienen dentro del diseño de una red de ventilación.
- En minería subterránea se debe realizar un constante seguimiento en las redes de ventilación con el fin de determinar en qué secciones de la mina existe la presencia de fugas o el ingreso de flujos de aire a zonas cerradas para la correspondiente colocación de sellamientos y de esta manera lograr aprovechar al máximo los flujos de aire que obtenemos mediante el sistema de ventilación implementado.
- Durante el levantamiento de información en el campo se debe tener siempre en cuenta que los equipos se encuentren debidamente calibrados de manera que no se incurra en el levantamiento de información erróneo lo cual solo nos generaría problemas al momento de generar las simulaciones en el software, además de eso se debe tratar de describir la mayor cantidad de detalles posibles de manera que podamos obtener una red de ventilación más apegada a la realidad.
- Al momento de ingresar la información obtenida del campo al programa se debe tener en consideración ser lo más detallista posible ya que VentSim® nos ofrece una gran variedad de opciones que ayudaran a generar una red de ventilación bien realista tales como:
  - ✓ Tipo de roca
  - ✓ % de relleno
  - ✓ Gases presentes
  - ✓ Obstrucciones
  - ✓ Fuentes de calor, etc

## BIBLIOGRAFÍA

- Acerías Paz Del Río. (2006). *Ventilación Subterránea*. Medellín: Publicación.
- Álvarez, C., Arias, C., Builes, J., Ordoñez, O., & Zapata, G. (2014). Evaluación de las pérdidas de carga en el circuito de ventilación por el uso de sostenimiento en minas de carbón: caso de estudio: Mina. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 31-41.
- CHICAGO BLOWER ARGENTINA S.A. (2006). *CHICAGO BLOWER ARGENTINA S.A.* Obtenido de CHICAGO BLOWER ARGENTINA S.A.: [http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria\\_de\\_los\\_ventiladores.htm](http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm)
- Consortio Sinifaná. (2011). *ACTUALIZACIÓN DE RECURSOS CARBONÍFEROS MINA EL BLOQUE*. Medellín.
- Cristian, C., & Jorge, M. (2011). Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 73-85.
- Gallardo, I. S. (2008). *GUÍA METODOLÓGICA DE SEGURIDAD PARA VENTILACIÓN DE MINAS*. Santiago de Chile: Publicación.
- Grupo ITSA. (16 de Enero de 2011). *ITSA*. Obtenido de ITSA: <http://www.itsa.com.pe/ITSA/ventiladores.html>
- Kerguelen, J., González, V., & Jiménez, J. (2013). Calculo de parámetros determinantes en la preparación de un circuito de ventilación en minería subterránea de carbón usando programación estructurada. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 156-160.
- McPHERSON, M. J. (s.f.). *Introduction to Fluid Mechanics*.
- Minería Chilena. (4 de Diciembre de 2014). *Minería Chilena*. Obtenido de Minería Chilena: <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/ventilacion-subterranea-adequandose-grandes-proyectos-mineros/>
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. (2015). *Decreto Número 1886*. Bogota: Publicación.
- Prieto, A. C. (Febrero de 2015). Optimización y modelación del circuito de ventilación de una mina subterránea. *Optimización y modelación del circuito de ventilación de una mina subterránea*.
- Revista Mundo HVACR. (s.f.). Ventilación Subterránea. *Revista Mundo HVACR*.
- Universidad Nacional De Colombia. (2016). Medellín.

## ANEXOS



**Anexo 1. Boca mina**  
Fuente: Ing. Alan Daza.



**Anexo 2. Ventilador secundario a succión de tipo axial de 7 [HP]**  
Fuente: Ing. Alan Daza.



**Anexo 3. Punto de monitoreo de CH4 en el nivel 15.**  
Fuente: Ing. Alan Daza.



**Anexo 4. Trampa de material calcáreo utilizado en la mina.**  
Fuente: Ing. Alan Daza.



**Anexo 5. Tapón en frentes ya explotados, estableciendo el circuito de ventilación**  
Fuente: Ing. Alan Daza.



**Anexo 6. Cortinas de banda clavada del 34 mina El Bloque**  
Fuente: Ing. Alan Daza.