

ARL



GUÍA TÉCNICA

DISEÑO Y GESTIÓN DE LA VENTILACION EN MINERÍA SUBTERRÁNEA



Autor: Gloria Catalina Gheorghe

INFORMACIÓN DE PROPIEDAD INTELECTUAL

- *Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial de ninguna parte de esta obra, ni su comercialización ni su publicación en cualquier medio, sin el permiso previo y escrito de Propiedad Intelectual de SURA S.A., 2023.*

ELABORADO POR: **GLORIA CATALINA GHEORGHE**

- Ingeniera de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia.
- Magister en Salud Ocupacional y Ambiental de la Universidad del Rosario.
- Especialista en Ingeniería Contra Incendios y Explosiones de la Universidad Nacional de Colombia.
- Especialista en Seguridad Minera. Escuela de Minas de Alés, Francia.
- Especialista en Gerencia en Salud Ocupacional. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Más de 16 años de experiencia en el sector minero.

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

- La guía técnica de diseño y gestión de la ventilación en minería subterránea es un instrumento que le permite entender a los actores involucrados en la gestión del riesgo minero, los principios fundamentales para el diseño de un plan de ventilación y los elementos claves en su gestión. Conocer estos principios aporta a tomar mejores decisiones con respecto al control de los peligros en la atmósfera minera. La guía no pretende ser un manual de ventilación. El diseño y supervisión de la ventilación en labores subterráneas debe estar a cargo de personas competentes en la materia.

Prólogo	10
1 Objetivos del capítulo	12
1.1 Lo esencial en la gestión de seguridad y salud en minería	12
1.2 Objetivos de la ventilación	15
1.3 Limitantes de la ventilación	16
1.3.1 Cambios en el circuito de ventilación debido a incendios	17
1.3.2 Ventilación en minas muy profundas	17
1.3.3 Diluir grandes cantidades de polvo	17
1.3.4 Explosiones físicas (outburst)	18
1.4 Síntesis de las disposiciones reglamentarias	19
1.4.1 Marco legal de la ventilación en minería subterránea en Colombia	19
1.4.2 Ventilación en minas muy profundas	19
2 Conocimiento de la atmósfera minera	25
2.1 Gases	25
2.1.1 Entendiendo los VLP	25
2.1.2 Aire	26
2.1.3 Oxígeno	27
2.1.4 Metano	29
2.1.5 Dióxido de carbono	30
2.1.6 Monóxido de carbono	31
2.1.7 Óxidos de nitrógeno	33
2.1.8 Ácido sulfhídrico	34
2.1.9 Anhídrido sulfuroso	35
2.2 Polvo	36
2.2.1 Polvo inhalable, respirable y de sílice cristalina	36
2.2.2 Efectos para la salud	37
2.2.3 VLP	38
2.1.4 Medidas de control	38

2.3	Ambiente térmico	39
2.3.1	<i>Termorregulación del cuerpo</i>	40
2.3.2	<i>Efectos para la salud</i>	40
2.3.3	<i>VLP</i>	41
2.3.4	<i>Medidas de control</i>	42
2.4	Ajustes en los VLP	43
2.4.1	<i>VLP para sustancias individuales y para mezclas</i>	43
2.4.2	<i>Factor de corrección para jornadas mayores a ocho horas</i>	44
3	Conceptos de la ventilación	45
3.1	Principios básicos	45
3.1.1	<i>¿Qué es un fluido?</i>	45
3.1.2	<i>Ecuación de continuidad</i>	45
3.2	Presión de un fluido	47
3.2.1	<i>¿Qué es la presión y la presión de cabeza?</i>	47
3.2.2	<i>Presión atmosférica y manométrica</i>	48
3.2	Fluidos en movimiento	49
3.3.1	<i>Ecuación de Bernoulli</i>	49
3.3.2	<i>Presión estática, total y dinámica</i>	50
3.3.3	<i>Régimen de flujo</i>	50
3.3.4	<i>Pérdidas de presión por rozamiento (Caída de presión)</i>	51
3.2	Ventilación por tiro natural	52
3.3.1	<i>Principios</i>	52
3.3.2	<i>Cálculo del tiro natural</i>	53

4 Cálculos de la ventilación	54
4.1 Elementos en el cálculo de la red de ventilación	55
4.2 Cálculo de resistencias	55
4.2.1 <i>Expresión general de la resistencia de una galería</i>	56
4.2.2 <i>Determinación del coeficiente de rozamiento</i>	56
4.2.3 <i>Resistencia debida a obstáculos</i>	56
4.2.4 <i>Resistencia por modificaciones de forma</i>	57
4.3 Cálculo de caudales	57
4.3.1 <i>Identificar necesidades</i>	57
4.3.2 <i>Caudal por número de personas</i>	58
4.3.3 <i>Caudal para dilución del metano</i>	59
4.3.4 <i>Caudal para dilución de gases tóxicos</i>	62
4.3.5 <i>Estándar de eficiencia de ventilación volumétrica</i>	63
4.3.6 <i>Curva característica de la mina</i>	63
4.3.7 <i>Cálculo de la potencia de un ventilador</i>	64
5 Diseño de los esquemas y circuitos de ventilación	65
5.2 Principios generales	65
5.2.1 <i>Términos en la ingeniería de la ventilación</i>	65
5.2.2 <i>Normas inexorables en el diseño del esquema de ventilación</i>	67
5.3 Criterios en el diseño de las vías principales de ventilación	68
5.3.1 <i>Resistencia de la mina</i>	68
5.3.2 <i>Distancia para ingreso y salida del aire</i>	68
5.3.3 <i>Control de fugas</i>	68
5.3.4 <i>Dirección del flujo del aire</i>	69
5.4 ¿Ventilación soplante o aspirante?	69
5.5 Medidas especiales para la ventilación en minas de carbón de acuerdo con el contenido de metano	71

5.6	Circuito de ventilación	71
5.6.1	<i>Leyes en la distribución de los caudales y la diferencia de presión</i>	71
5.6.2	<i>Redes de ventilación en paralelo</i>	72
5.6.3	<i>Redes de ventilación en serie</i>	73
6	Ventilación mecánica	73
6.1	Introducción	73
6.1.1	<i>Definición</i>	73
6.1.2	<i>Criterios de clasificación</i>	74
6.2	Fundamentos de los ventiladores	74
6.2.1	<i>Ventiladores centrífugos</i>	75
6.2.2	<i>Ventiladores axiales</i>	76
6.2.3	<i>Diferencias entre los ventiladores centrífugos y axiales</i>	77
6.3	Curvas características y combinación de los ventiladores	77
6.3.1	<i>Curvas de un ventilador</i>	77
6.3.2	<i>Trabajo en serie de dos ventiladores</i>	78
6.3.3	<i>Trabajo en paralelo de dos ventiladores</i>	79
6.4	Leyes de los ventiladores	80
6.4	Ventilación auxiliar	81
6.5.1	<i>Ventiladores y ductos</i>	81
6.5.2	<i>Sistemas de ventilación auxiliar, soplante y aspirante</i>	82
7	Gestión de la ventilación	84
7.1	Elementos en la gestión de la ventilación	84
7.2	Mediciones	84
7.2.1	<i>Propósito de las mediciones</i>	84
7.2.2	<i>Aforos o medidas del caudal de aire</i>	85
7.2.3	<i>Mediciones de presión diferencial en el ventilador</i>	88
7.3	Capacitación y responsabilidades	90
8	Reglas de oro de la ventilación	91
9	Bibliografía	94

L I S T A D E G R Á F I C A S		PG.
Gráfica 1.	Frecuencia de emergencias y muertes por evento en minería en Colombia. 2005 a mayo de 2023. Fuente: Agencia Nacional de Minería (ANM).	12
Gráfica 2.	Síntesis del modelo jerárquico de causalidad de eventos.	12
Gráfica 3.	Jerarquía en el control de los riesgos mineros.	13
Gráfica 4.	Frecuencia de emergencias y muertes por evento en minería en Colombia. 2005 a mayo de 2023. Fuente: Agencia Nacional de Minería (ANM).	18
Gráfica 5.	Índices utilizados para determinar los VLP.	22
Gráfica 6.	Efectos fisiológicos del monóxido de carbono.	29
Gráfica 7.	Clasificación del polvo.	33
Gráfica 8.	VLP para el polvo respirable.	35
Gráfica 9.	Medidas de control del polvo inhalable y respirable en los sitios de trabajo.	35
Gráfica 10.	Medidas de control de estrés térmico.	39
Gráfica 11.	Flujo a través de un fluido.	43
Gráfica 12.	Trabajo de presión que realiza un fluido.	47
Gráfica 13.	Sentido del tiro natural cuando la temperatura exterior es menor.	52
Gráfica 14.	Capas de metano: a) Un nivel de la vía aérea, b) Una vía aérea con ventilación descendente.	60
Gráfica 15.	Ejemplo de la curva característica de una mina.	65
Gráfica 16.	Principales elementos en un sistema de ventilación subterránea. Fuente: McPherson M. J. (2012).	67
Gráfica 17.	Cierre de labores con troncos de madera y arcilla.	69
Gráfica 18.	Tipo de presión en los ventiladores principales. a) Sistema aspirante. b) Sistema soplante.	72
Gráfica 19.	Cambios en la parada de un ventilador soplante y aspirante.	73
Gráfica 20.	Redes de ventilación en paralelo	75
Gráfica 21.	Redes de ventilación en serie	76
Gráfica 22.	Componentes principales de un ventilador (por ejemplo, axial).	78
Gráfica 23.	Curva característica de ventiladores combinados en serie.	83
Gráfica 24.	Curva característica de ventiladores combinados en paralelo.	84
Gráfica 25.	Ventilación auxiliar soplante.	87
Gráfica 26.	Frente de explotación con ventilación soplante.	87
Gráfica 27.	Ventilación auxiliar aspirante.	88

L I S T A D E E C U A C I O N E S		PG.
Ecuación 1.	Densidad del aire en función de la altitud y la temperatura.	23
Ecuación 2.	Temperatura efectiva.	38
Ecuación 3.	Índice de concentración individual de una sustancia.	40
Ecuación 4.	Índice de concentración para una mezcla.	40
Ecuación 5.	Factor de corrección de VLP para el día	41
Ecuación 6.	VLP para una jornada laboral diferente a ocho horas.	41
Ecuación 7.	Ecuación de continuidad.	43
Ecuación 8.	Expresión para la presión.	44
Ecuación 9.	Presión de cabeza.	45
Ecuación 10.	Presión atmosférica en función de la altura y la temperatura.	46
Ecuación 11.	Ecuación de Bernoulli.	47
Ecuación 12.	Expresión para las presiones total, dinámica y estática.	48
Ecuación 13.	Cálculo del número de Reynolds.	49
Ecuación 14.	Caída de presión de un fluido en régimen turbulento.	50
Ecuación 15.	Expresión para la resistencia de una galería.	50
Ecuación 16.	Relación cuadrática entre el caudal y la presión	50
Ecuación 17.	Presión ejercida por el tiro natural.	53
Ecuación 18.	Coeficiente de rozamiento de una galería.	56
Ecuación 19.	Coeficiente de rozamiento para longitudes con diferentes revestimientos.	57
Ecuación 20.	Resistencia por modificaciones de forma.	58
Ecuación 21.	Caudal por número de personas.	59
Ecuación 22.	Flujo de gas metano.	61
Ecuación 23.	Relación de dilución de los gases.	61
Ecuación 24.	Número de capa L.	62
Ecuación 25.	Caudal para dilución del metano para toda la mina.	62
Ecuación 26.	Caudal requerido por HP de equipos diésel en operación.	63
Ecuación 27.	Caudal requerido para diluir gases producidos por voladuras.	64
Ecuación 28.	Potencia del ventilador.	65

L I S T A D E E C U A C I O N E S		PG.
Ecuación 29.	Primera ley de Kirchhoff.	75
Ecuación 30.	Segunda ley de Kirchhoff.	75
Ecuación 31.	Expresión para las resistencias y caudales en un circuito en paralelo	75
Ecuación 32.	Expresión para las resistencias en un circuito en serie	76
Ecuación 33.	Leyes de los ventiladores.	85

L I S T A D E T A B L A S		PG.
Tabla 1.	Síntesis de las disposiciones reglamentarias en ventilación de minería subterránea en Colombia	18
Tabla 2.	Información del aire	23
Tabla 3.	Información del oxígeno	24
Tabla 4.	Tasas de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono.	24
Tabla 5.	Información del metano	26
Tabla 6.	Información del dióxido de carbono	27
Tabla 7.	Información del monóxido de carbono	29
Tabla 8.	Información de dióxido de nitrógeno	30
Tabla 9.	Información de ácido sulfhídrico	31
Tabla 10.	Información del anhídrido sulfuroso	32
Tabla 11.	Efectos adversos para la salud del polvo Inhalable y el polvo respirable	33
Tabla 12.	Enfermedades por el ambiente térmico	37
Tabla 13.	Tiempo de permanencia bajo tierra en función de la temperatura efectiva	39
Tabla 14.	Volumen de gases generados por 1 kg de ANFO	64
Tabla 15.	Medidas especiales en la ventilación de minas de carbón de acuerdo con el contenido de metano.	74
Tabla 16.	Características de diferentes tipos de ventiladores centrífugos	78
Tabla 17.	Características de diferentes tipos de ventiladores centrífugos	80
Tabla 18.	Diferencias entre los ventiladores centrífugos y axiales	81
Tabla 19.	Mediciones de calidad del aire	94

PRÓLOGO

La ventilación forzada junto con el plan de sostenimiento son los dos controles de ingeniería más importantes en todas las operaciones de minería subterránea. El oxígeno contenido en el aire es un gas indispensable para la vida, por tanto, garantizarlo en cantidad y calidad adecuadas es vital para los trabajadores bajo tierra; además la ventilación en minería tiene la importante función de diluir gases tóxicos y explosivos; y, no menos importante, la ventilación busca generar un clima térmico apropiado para las personas.

Los manuales de ventilación suelen tener un promedio de 600 páginas, esta guía técnica no pretende ser un manual de ventilación; es un instrumento que le proporcionará a los actores involucrados en el proceso minero, comprender los principios fundamentales para el diseño de un plan de ventilación y los elementos claves en su gestión, dado que el éxito de este control de ingeniería no radica solo en el diseño del circuito de ventilación y los equipos, sino en los procedimientos de trabajo seguro, el seguimiento, la toma de decisiones y la capacitación de los trabajadores involucrados en el proceso. La ventilación tiene, también, algunos limitantes que veremos en esta guía. En síntesis, la ventilación tiene que estar integrada con otros controles.

A continuación, se describen brevemente los temas que se abordarán en esta guía. En el capítulo 1, "Introducción", se presentan los aspectos esenciales en la gestión del riesgo minero, entre ellos la ventilación, se identifican sus limitantes, se plantea un resumen de las obligaciones en minería subterránea en Colombia establecidas en el reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas y los requerimientos agrupados en cinco categorías para entender mejor su naturaleza y propósito.

El capítulo 2, "Conocimiento de la atmósfera minera", presenta los peligros de los gases, el polvo respirable y el ambiente térmico en la atmósfera minera. En el 3, "Conceptos de la ventilación", se abarcan las definiciones y conceptos básicos de dinámica de fluidos, los elementos necesarios para entender el flujo de aire en las labores mineras; se presenta también los conceptos de ventilación natural y cómo calcular el "tiro natural". Los fundamentos en el cálculo de resistencias y caudales, se relacionan en el capítulo 4, "Cálculos de la ventilación".

En el capítulo 5, "Diseño de los esquemas y circuitos de ventilación", se brindan elementos para decidir sobre ventilación soplante y aspirante. En el 6, "Ventilación mecánica", se establecen los principios de funcionamiento de los ventiladores. Y en el 7, "Gestión de la ventilación", se relacionan las estrategias como el monitoreo de gases y caudales, los procedimientos de trabajo seguro y la capacitación de los diferentes niveles. En el último capítulo, "Reglas de oro de la ventilación", se presenta una síntesis con diez recomendaciones para garantizar que la ventilación cumpla su propósito. Finalmente, se presenta la bibliografía consultada en el desarrollo de esta guía.

Además, se incluyen algunos ejemplos y ciertos ejercicios. Cada capítulo inicia presentando sus objetivos. El sistema de unidades utilizado es el del Sistema Internacional (SI) y se utiliza la coma para separar la fracción decimal en el número.

Esta guía técnica hace parte de un set de guías enfocadas a la gestión de la seguridad y salud en minería; se recomienda que sea consultada la guía número 1 "Lo esencial en la seguridad de seguridad y salud en la minería" y, posteriormente, se consulten las guías relacionadas con la prevención de explosiones subterráneas, control geomecánico y planes de emergencia.

1. INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar los aspectos esenciales en la gestión del riesgo minero, entre ellos, la ventilación.
- Comprender la finalidad de la ventilación para determinar si esta es adecuada o inadecuada en una mina.
- Discutir los limitantes de la ventilación y otros controles que deben considerarse.
- Sintetizar las obligaciones reglamentarias de ventilación en Colombia, las cuales se agruparon en cinco categorías para entender mejor la naturaleza y propósito de la disposición legal.



1.1 LO ESENCIAL EN LA GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD EN MINERÍA

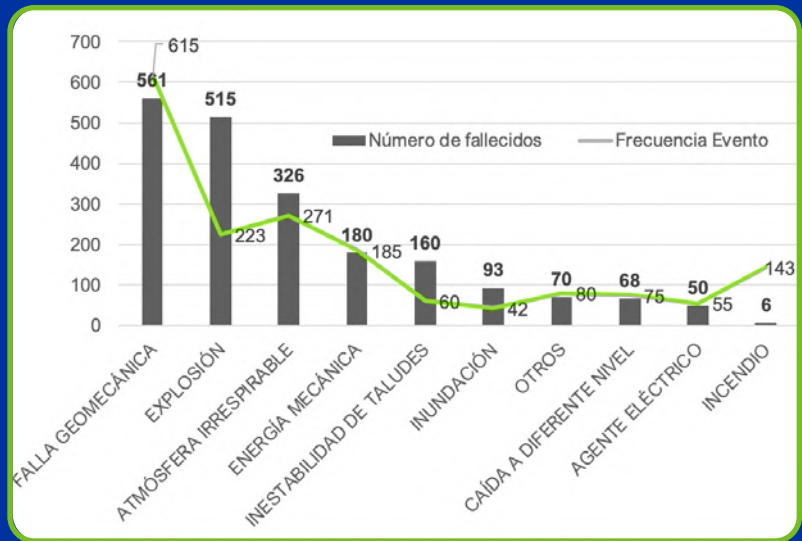
El objetivo de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) es tener bajo control todos los peligros que puede contener la organización, para así minimizar los riesgos a los cuales pueden verse expuestos los trabajadores. Sin embargo, la gestión de la STT, en muchas ocasiones, se ha concentrado en la documentación, la implementación de controles administrativos y el uso de Elementos de Protección Personal (EPP), acciones que no priorizan abordar la intervención de los riesgos más significativos mediante controles de ingeniería, aislamiento o eliminación.

El resultado del anterior abordaje deja un número muy significativo de vidas perdidas en el sector minero; de acuerdo con los registros de emergencias mineras de la Agencia Nacional de Minería (ANM), entre el 2005 y mayo de 2023 murieron 2.029 trabajadores mineros, y solo en lo corrido de los cinco primeros meses de 2023, se habían registrado 80 víctimas mortales, período de mayor siniestralidad en la minería del País. El 90.2 % de las muertes se han registrado en explotaciones subterráneas y el 9.8 % en aquellas a cielo abierto. Del total de las 2029 muertes, 1.460 han tenido lugar en minas subterráneas de carbón.

La Gráfica 1 nos presenta el registro de emergencias y muertes por tipo de evento. En esta se puede identificar que el evento más frecuente y la primera causa de mortalidad es debido a fallas geomecánicas, con un total de 561 muertes. La segunda causa son las explosiones, con 515 víctimas mortales en 223 explosiones; de las cuales 175 han sido de metano o polvo de carbón (la inmensa mayoría solo de metano). Estas representan una alta severidad, pues en solo 20 explosiones subterráneas han perdido la vida 299 colaboradores. El tercer evento más frecuente es el relacionado con el contacto de atmósferas irrespirables, con un total de 326 muertes.

Las muertes, debido a explosiones y atmósferas irrespirables, suman 841, lo que representa el 41,4 % de las pérdidas registradas en el sector minero. Una explosión subterránea está precedida de la formación de una atmósfera explosiva y los eventos relacionados por atmósferas irrespirables se han dado por el contacto de trabajadores en lugares con deficiencia de oxígeno o presencia de gases tóxicos. Por tanto, el mejor método para controlar las condiciones

atmosféricas bajo tierra es el flujo de aire suficiente, por ello se puede afirmar que la ventilación forzada es el control de ingeniería más importante para garantizar sitios de trabajo seguros bajo tierra. Exploraremos ahora algunos hallazgos con respecto a la causalidad de las emergencias registradas:



Gráfica 1. Frecuencia de emergencias y muertes por evento en minería en Colombia. 2005 a mayo de 2023. Fuente: Agencia Nacional de Minería (ANM).

A partir de los resultados de 100 investigaciones de eventos mortales en minería en Colombia, Gloria Catalina Gheorghe construyó un modelo jerárquico de causalidad, mediante la aplicación del enfoque Interpretative Structural Modeling (ISM), el cual consta de 8 niveles jerárquicos, 2 factores de riesgo en la raíz de causalidad, 25 causas indirectas y 4 inmediatas.



Gráfica 2. Síntesis del modelo jerárquico de causalidad de eventos.

Es claro que la ventilación es un control de ingeniería esencial para minimizar los riesgos de explosión o atmósferas contaminantes, pero en ocasiones se ha vuelto un cliché la recomendación en la gestión del riesgo de “implementar una adecuada ventilación”. Para empezar, ¿cómo definimos si una ventilación es adecuada o no?, entendiendo la importancia de la ventilación en el control de los peligros mineros, por tanto esta guía se propone presentar los fundamentos de la ventilación en minería subterránea.

Además, se debe resaltar que, si bien los controles de ingeniería como la ventilación están en un nivel importante en la pirámide de la jerarquía de controles (ver Gráfica 3), dado que es un tipo de control que es efectivo prevenir, los otros también son importantes.

La ventilación puede fallar, por lo que la competencia de los colaboradores en identificar situaciones de peligro y tomar decisiones apropiadas, es fundamental.

Las condiciones cambiantes en una mina pueden dar lugar a que la ventilación ya no esté cumpliendo su objetivo de diluir los gases tóxicos, por lo cual es de gran relevancia monitorear y hacer los cambios necesarios. Es por ello que en las causas básicas de la Gráfica 2 también se encuentran la capacitación y la supervisión.

Se pueden salvar muchas vidas y tener operaciones mineras más productivas, si mejoramos la ventilación y la gestión.



Gráfica 3. Jerarquía en el control de los riesgos mineros.



1.2 OBJETIVOS DE LA VENTILACIÓN

El objetivo de la ventilación es claro y simple: proveer flujo de aire en cantidad y calidad suficiente para diluir los contaminantes a concentraciones seguras en todos los lugares de la mina, donde las personas deban trabajar, circular o se localice maquinaria. (McPherson, 2012).

Las siguientes son las condiciones ambientales que se pretenden mejorar con la ventilación:

1

Asegurar el contenido de oxígeno mínimo para que los trabajadores en la mina puedan respirar.

2

Mantener las concentraciones de gases tóxicos por debajo de los límites permisibles, tanto de concentraciones que presenten riesgo inminente para la vida como de aquellas seguras durante una jornada laboral, para prevenir los efectos agudos o crónicos sobre la salud de las personas.

3

Diluir las concentraciones de gases explosivos para prevenir la formación de atmósferas potencialmente explosivas.

4

Regular las condiciones de temperatura y humedad con el objetivo de generar un clima de confort térmico adecuado para el desempeño de los colaboradores y la seguridad de los equipos.

5

Diluir las concentraciones de polvo a valores seguros.

6

Controlar los fenómenos de oxidación y combustión.

La ventilación, al generar mejores condiciones de trabajo, contribuye también a incrementar significativamente la productividad.

En conclusión, la mejor forma de definir si una ventilación es adecuada sería midiendo si esta cumple con sus objetivos, y la forma de verificar eso es definiendo el estándar del objetivo y monitoreándolo. Tal como se ilustra en este ejemplo:

Ejemplo: objetivo tres de ventilación

Diluir las concentraciones de metano para prevenir la formación de atmósferas explosivas.

Estándares:

- ✓ Cumplir con el caudal de aire necesario y previamente calculado, para diluir el metano en los sitios de trabajo.
- ✓ Garantizar que en los retornos de la ventilación las concentraciones de metano sean inferiores a 1,5 %.
- ✓ Garantizar en todos los sitios de trabajo y circulación de personas concentraciones de metano inferiores a 0,5 %.
- ✓ Trabajos no ventilados, cerrados herméticamente.

1.3 LIMITANTES DE LA VENTILACIÓN

La ventilación es un control fundamental en la minería, dado que el mejor método para controlar las condiciones atmosféricas bajo tierra es mediante el flujo de aire. No obstante, esta tiene limitantes en el control de la atmosfera minera, las cuales es importante conocer para identificar otros controles que deben integrarse. Las situaciones en las que la ventilación tendría limitantes son las siguientes:



1.3.1 CAMBIOS EN EL CIRCUITO DE VENTILACIÓN DEBIDO A INCENDIOS

Un incendio en una mina genera una fuerza aeromotriz o efecto de empuje, debido al aumento del volumen de aire y, por consiguiente, una disminución de densidad; el empuje del incendio se puede sumar u oponer a la ventilación principal, haciendo que se invierta el circuito de aire y se llene de humo la ruta de evacuación que se tuviera previamente establecida, siendo este uno de los mayores peligros. Por tanto, un incendio es un fenómeno que puede producir una modificación significativa en el circuito de ventilación.

OPCIONES DE CONTROL: en el diseño de la ventilación es necesario calcular la fuerza aeromotriz que puede producir un incendio e instalar sensores en los ventiladores que permitan regular el caudal, si se produce algún cambio térmico significativo; esto con el objetivo de que la ventilación logre mantener las vías de evacuación libres de humo.

Además, se debe buscar predecir cuál sería el movimiento del humo y su magnitud en función del sitio donde se presente. Por regla general se debe parar el ventilador lo más rápido posible e invertir la

ventilación si el incendio nace en el inclinado de entrada de aire o en las galerías principales de entrada próximas; no debe invertirse la ventilación si el incendio nace en la salida del aire o en cualquier otro lugar de la mina. Sin embargo, en una mina muy grande, con muchos niveles, modelar las condiciones que podría generar un incendio en el circuito es muy complejo; una alternativa en este caso es combinar modelos utilizados para el cálculo de los circuitos de ventilación como el 3D Mine Ventilation Simulation Software (VENTSIM) con modelos como Computational Dynamic Fluid (CFD).

1.3.2 VENTILACIÓN EN MINAS MUY PROFUNDAS

Los incrementos en la temperatura causados por la compresión del aire en las minas muy profundas, pueden resultar en altas temperaturas para el personal. En estos casos, las cantidades prácticas de flujo de aire no resolverían el problema.

OPCIONES DE CONTROL: en este caso es necesario la instalación de sistemas locales de refrigeración o utilizar métodos para controlar el flujo de calor del macizo rocoso.

1.3.3 DILUIR GRANDES CANTIDADES DE POLVO

Si bien la ventilación puede ayudar a diluir el polvo, se requerirían grandes caudales y, en consecuencia, velocidades muy altas que representan riesgos para los trabajadores. Tal como se ilustra en este ejemplo:

El aire que ingresa a una mina tiene una concentración de polvo de $0,5 \text{ mg/m}^3$. En un frente de trabajo de 3 m^3 de sección se producen 900 toneladas de carbón en un turno de ocho horas y se agregan partículas de carbón respirables al flujo de aire a una tasa de 1.400 mg/ton de carbón extraído. Si la concentración de polvo respirable en el aire de retorno no debe exceder los 2 mg/m^3 , calcule el caudal de aire requerido y la velocidad del flujo del aire.

Solución:

Tasa de emisión del polvo respirable = $(1.400 \text{ mg/ton}) \times (900 \text{ ton/ 8h}) \times (1 \text{ h/3600s}) = 43,75 \text{ mg/s}$

$Q_{(\text{requerido})} = (43,75 \text{ mg/s}) / (1,5 \text{ mg/m}^3) = 29,17 \text{ m}^3/\text{s}$

$V = (29,17 \text{ m}^3/\text{s}) / (3 \text{ m}^2) = 9,7 \text{ m/s}$

Respuesta: el caudal requerido es $29,17 \text{ m}^3/\text{s}$ y la velocidad de $9,7 \text{ m/s}$.

OPCIONES DE CONTROL: combinar la ventilación con medidas de humectación y de supresión del polvo.

1.3.4 EXPLOSIONES FÍSICAS (OUTBURST)

Un outburst se define como una expulsión súbita de grandes volúmenes de gas, metano, dióxido de carbono o los tres gases en el orden de 1.000 m^3 a 26.000 m^3 , acompañados por una gran masa de carbón fino del frente de trabajo de 50 a 250 toneladas. El gas tiene el efecto de transportar el polvo de carbón a grandes distancias, las presiones de este y los volúmenes asociados son a veces suficientes para penetrar las vías de ventilación en distancias considerables (Hargraves A. J., 2002).

Este fenómeno pueda dar lugar a peligros de asfixia debido a la deficiencia de oxígeno y la formación de atmósferas explosivas, además puede generar lesiones en los colaboradores debido a la explosión violenta de gas y carbón. Los outbursts son especialmente frecuentes en minas muy profundas y con altos contenidos de gas, $12,0 \text{ m}^3/\text{t}$ de CH_4 o $10 \text{ m}^3/\text{t}$ de CO_2 ; por lo cual es posible que no sean tan frecuente en nuestra minería, dado que, según estudios realizados, se ha encontrado que los contenidos de gas metano en los mantos de Colombia están en el orden de $0,5$ a $5 \text{ m}^3/\text{ton}$.

En conclusión, se tendría que un caudal regular de ventilación sería absolutamente insuficiente para contrarrestar las altas irrupciones de gas.

OPCIONES DE CONTROL: dado que los altos contenidos de gas en los mantos se han relacionado con una mayor probabilidad de outburst, una opción es drenar el gas para reducir su contenido. También, se debe realizar el análisis de riesgo establecido en el Decreto 1886 de 2015 para evaluar las zonas propensas a desprendimientos de gas.

1.4 SÍNTESIS DE LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS

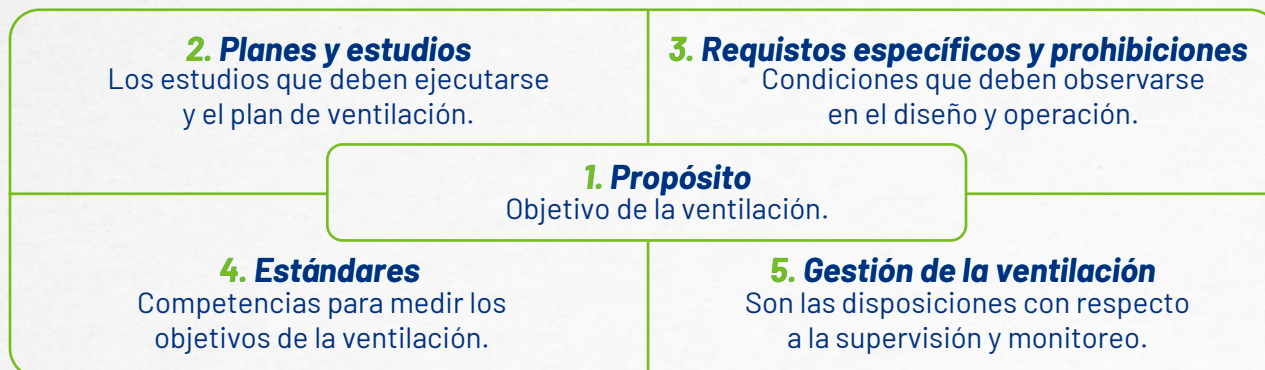
1.4.1 MARCO LEGAL DE LA VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA EN COLOMBIA

En Colombia el marco de referencia normativo con respecto a la ventilación en minería subterránea está contenido en:

- ✓ El título II “Ventilación” del Reglamento de Seguridad en las labores mineras subterráneas (artículos 35 al 65), Decreto 1886 de 21 de junio de 2015.
- ✓ Los artículos 8 al 13 del Decreto 944 del 1 de junio de 2022, el cual modifica los artículos 46, 47, 48, 49, 51 y 65 del Decreto 1886 de 2015, referidos a la ventilación.
- ✓ Los artículos 217 y 218 del título X “Higiene y condiciones de trabajo” del Decreto 1886 de 2015; los cuales establecen el tiempo de permanencia de los trabajadores de acuerdo con la temperatura efectiva.

1.4.2 CATEGORÍAS DE LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA

En la Gráfica 4 se presentan cinco categorías en las cuales se han agrupado las disposiciones reglamentarias, división que facilita entender la naturaleza y el propósito del requerimiento.



Gráfica 4. Categorías de las disposiciones reglamentarias de ventilación en minería subterránea en Colombia.

En la Tabla 1 se sintetizan las disposiciones reglamentarias de ventilación en minería subterránea en Colombia, las cuales se presentan en las cinco categorías previamente descritas.

1. PROPÓSITO

TEMA Y ARTÍCULOS	SÍNTESIS DE LAS ESPECIFICACIONES
Objetivo de la ventilación Dec. 1886 de 2015 (art. 36 y 37)	El objetivo de la ventilación es proveer flujo de aire suficiente en cantidad y calidad para diluir los contaminantes a concentraciones seguras en todos los lugares de la mina donde las personas deban trabajar o circular o se localice maquinaria.

2. PLANES Y ESTUDIOS

TEMA Y ARTÍCULOS	SÍNTESIS DE LAS ESPECIFICACIONES
Plan de ventilación y circuito de ventilación Dec. 1886 de 2015 (art. 35). Dec. 944 de 2022 (art. 8).	- El Plan de ventilación es el programa que contiene el diseño, la implementación, los procedimientos y el monitoreo de la ventilación. Este debe estar diseñado por una persona competente. - El circuito de ventilación forzada debe tener todos sus elementos enmarcados en los planos de ventilación. En total son catorce elementos, entre ellos: distribución de la corriente de aire, equipos y accesorios de ventilación, caudales, velocidades, sistemas de control, puntos de medición, sistemas, entre otros.
Estudio geológico forzada Dec. 1886 de 2015 (art. 62).	Concentraciones de gas metano en los mantos de carbón del proyecto minero. Este es un elemento esencial para determinar el flujo de gas metano y calcular el caudal de aire para diluirlo.
Análisis de riesgos Dec. 1886 de 2015 (art. 63 y 64).	Identificación de zonas propensas a desprendimientos de gas metano. Debe contener el estudio geológico y otros elementos como posibles tipos de desprendimientos y antecedentes, los planos geológicos estructurales, la profundidad y el rumbo del fracturamiento del manto.
Plan de prevención Dec. 944 de 2022 (art. 13).	Plan de gestión del riesgo asociado a desprendimientos instantáneos de gas metano.

3. REQUISITOS ESPECÍFICOS Y PROHIBICIONES

TEMA Y ARTÍCULOS	SÍNTESIS DE LAS ESPECIFICACIONES	
Entrada y salida de aire Dec. 1886 de 2015 (art. 42).	Entrada y salida de aire independiente, distancia mayor a 50 m.	
Áreas de trabajo abandonadas Dec. 1886 de 2005 (art. 44)	Deben estar ventilados o aislados herméticamente del circuito de ventilación y señalizadas para evitar el tránsito de personal.	
Cálculo del caudal de aire Dec. 1886 de 2015 (art. 54).	Criterios para el cálculo del caudal: - En función del turno de mayor personal. - Alturas < 1.500 msnm se requiere 3 m³/min por trabajador. - Alturas > 1.500 msnm se requiere 6 m³/min por trabajador. - Caudal necesario para dilución del metano. - Caudal para dilución de gases tóxicos.	
Prohibición de la ventilación por difusión Dec 1886 de 2015 (art. 55)	Prohibición de la ventilación por difusión para avances mayores a 10 m a partir de la corriente principal de ventilación.	
Clasificación de las labores mineras de carbón Dec. 1886 de 2015 (art. 58)	Categoría	Concentración en toda la mina
	I. No grisutuosas	CH ₄ = 0%
	II. Débilmente grisutuosas	CH ₄ ≤ 0,3%
	III. Fuertemente grisutuosas	CH ₄ > 0,3%
Ventilación en minas grisutuosas Dec. 1886 de 2015 (art. 61).	- No suspender ventilación principal, ni auxiliar. Si es necesario, se deben suspender trabajos, evacuar y tomar medidas. - Ventilación principal: evacuar personal de la mina. - Ventilación auxiliar: evacuar personal de los frentes. - Disponer de planta auxiliar de energía en superficie. - Ventilación debe ser horizontal o ascendente. - Ventilación auxiliar en frentes ciegos con avance mayor a 10 m.	

4. ESTÁNDARES

TEMA Y ARTÍCULOS	SÍNTESIS DE LAS ESPECIFICACIONES			
Valores Límites Permisibles (VLP) de gases y contenido mínimo de O₂ forzada Dec. 1886 de 2015 (art. 38, 39 y 53)	GAS	Media ponderada en el tiempo (TLV-TWA)		Límites de exposición para cortos periodos de tiempo (TLV-STEL)
	CO ₂ : Dióxido de carbono	0,5%		
	CO: Monóxido de carbono	25 ppm		200 ppm
	H ₂ S: Ácido sulfhídrico	1 ppm		5
	SO ₂ : Anhídrido sulfuroso			0,25
	NO: Óxido nítrico	25 ppm		5
	NO ₂ : Dióxido de nitrógeno	0,2 ppm		5
	O ₂ : Oxígeno	Mínimo valor		Máximo valor
		19,5%		23,5%
Temperatura efectiva (te) Dec. 1886 de 2015 (art. 217 y 218)	CH ₄ : Metano 1. En labores de avance y retornos principales del aire. 2. En retorno de aire de los tajos y frentes de preparación y desarrollo.	VLP1		VLP2
		1,0%		1,5%
	$te = 0,7 th + 0,3 ts - V$ Donde, th = temperatura húmeda en oC. ts = temperatura seca en oC. V = velocidad de la corriente de aire en m/s.	te (oC)		Tiempo bajo tierra
		28		Sin limitación
		29		6 horas
		30		4 horas
		31		2 horas
		32		0 horas
		El tiempo de permanencia es menor cuando se usa un equipo de circuito cerrado de respiración autónoma, no se debe superar dos horas de trabajo con el equipo por parte de los socorredores mineros.		
Velocidad media de las corrientes de aire en minas de carbón Dec. 1886 de 2015 (art. 56).	Velocidad mínima en excavaciones con ventilación principal	Vías con locomotora		Vías de explotación
		1 m/s		0,5 m/s
	Velocidad mínima en excavaciones con ventilación auxiliar	Avance hacia arriba	Avance hacia abajo	Vías en carbón
		0,5 m/s	0,2 m/s	Vías en roca
		Velocidad mínima a 30 m detrás de donde estén trabajando en un frente ciego		10 m/min
		Velocidad máxima en sitios de tránsito de personal		6 m/s
		Velocidad máxima en tajos de carbón		4,5 m/s

5. GESTIÓN DE LA VENTILACIÓN

TEMA Y ARTÍCULOS	SÍNTESIS DE LAS ESPECIFICACIONES
Responsable técnico de la labor minera Dec. 944 de 2022 (art. 2).	• Designa en cada turno el responsable de la supervisión de la ventilación. • Responsable de los casos en los que debe suspenderse la ventilación. • Determina otros gases que deben monitorearse.
Monitoreo de gases Dec. 944 de 2022 (art. 9-12) Dec. 1886 de 2015 (art. 52).	• Debe realizarse con equipos intrínsecamente seguros y calibrados. • Se mide de manera permanente como mínimo: O₂, CO, CO₂, CH₄, NO_x, H₂S, resultados que deben estar disponibles y ser comunicados.
Mantenimiento Dec. 1886 de 2015 (art. 43)	• De las vías para evitar obstrucciones al flujo del aire. • De los equipos de ventilación.
Aforos de ventilación Dec. 1886 de 2015 (art. 57)	• Se deben realizar semanalmente las mediciones de caudales.
Procedimientos y capacitaciones Dec. 1886 de 2015 (art. 9)	• Procedimientos de monitoreo ambiental y otros. • Registros de las capacitaciones en ventilación al personal minero.

Tabla 1. Síntesis de las disposiciones reglamentarias de ventilación en minería subterránea en Colombia.

EJERCICIO

Discuta ¿Cuál es el principal objetivo del estudio para determinar concentraciones de gas metano en los mantos de carbón en m³/ton?



2. CONOCIMIENTO DE LA ATMÓSFERA MINERA

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

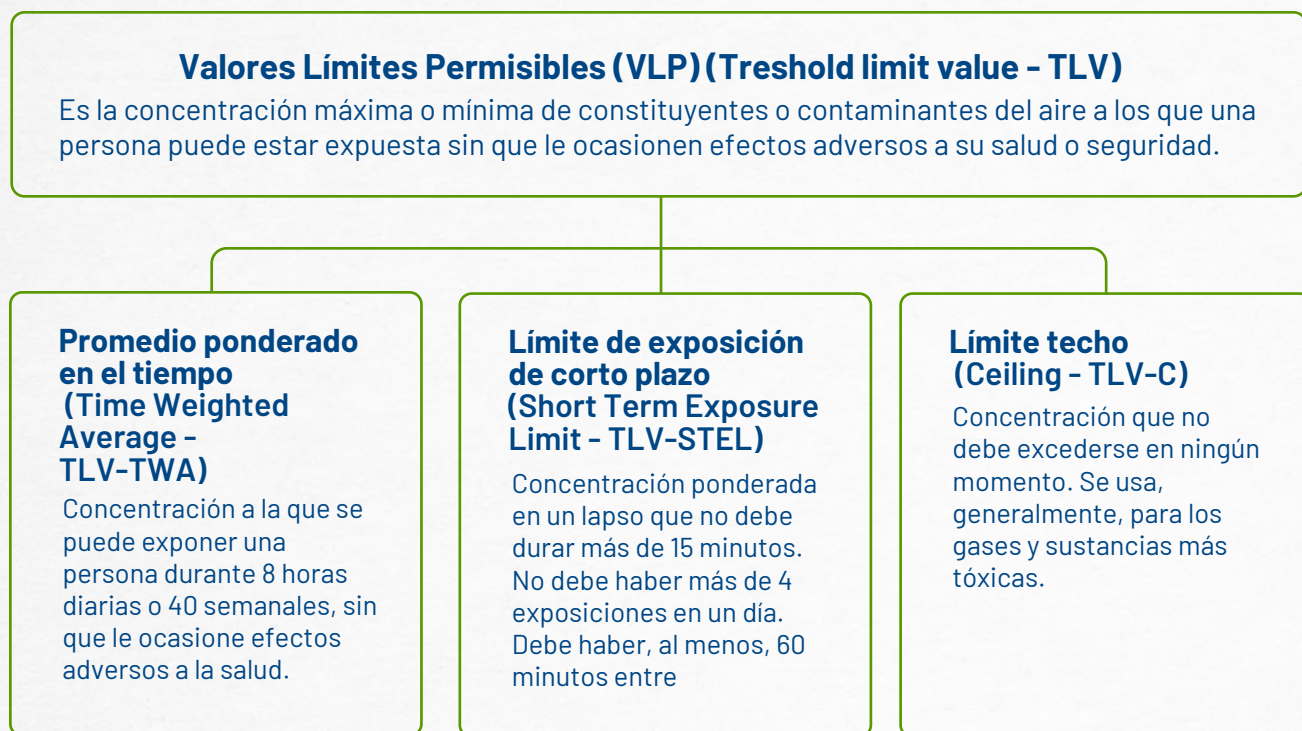
- Conocer los peligros de la atmósfera minera asociados a gases, polvo explosivo y respirable, ambiente térmico y los Valores Límites Permisibles (VLP) que aplican.
- Identificar los ajustes que deben realizarse a los VLP en función del tiempo de exposición y la exposición a mezclas.

2.1 GASES

El control de los gases en minas subterráneas es indispensable debido a los riesgos físicos, la explosión e inflamabilidad, los riesgos higiénicos, la asfixia, la toxicidad, la irritación. Por su buena relación costo - beneficio, es el control más efectivo para tener una atmósfera adecuada para el trabajo. En esta sección, se presenta un contexto sobre los índices utilizados para establecer los valores de exposiciones y se realiza una descripción de los gases comúnmente presentes en el ambiente minero.

2.1.1 ENTENDIENDO VLP

La American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) es una organización científica que publica cada año los VLP de exposición a sustancias presentes en la industria. Los valores publicados por esta organización son el marco de referencia para Colombia, de acuerdo con lo establecido en el artículo 74 del Decreto 1886 de 2015. En la Gráfica 5 se explican los índices utilizados.



Gráfica 5. Índices utilizados para determinar los VLP.

- Los límites publicados en el Decreto 1886 de 2015, aún están vigentes dado que la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) no los ha cambiado con respecto a los publicados en agosto de 2023.
- Los VLP son una referencia, pero debe considerarse, también, la sensibilidad particular de las personas a determinadas sustancias; para gases muy tóxicos estos se indican en partes por millón (ppm) y para otros gases en porcentaje de volumen del aire.

2.1.2 AIRE

La composición del aire seco es la que se indica en la Tabla 2. Se busca que el intercambio entre el interior y el exterior se produzca de manera adecuada para lograr que la atmósfera en las minas sea lo más parecida a la interior.

Densidad (20 oC y 100 kPa)	1,1884 kg/m ³	Densidad (20 oC y 100 kPa)	28,966 g/mol
Olor, color y sabor	Ninguno		
Composición	N ₂ : 78,08%, O ₂ : 20,95%, CO ₂ : 0,03%, Ar: 0,93%, Otros: 0,01%		

Tabla 2. Información del aire.

Efectos de la altura en la densidad del aire

$$\frac{W_2}{W_1} = e^{-\frac{Z}{RT}}$$

Ecuación 1. Densidad del aire en función de la altitud y la

En el que, W_2 densidad a la altura Z (kg/m³) temperatura.

W_1 densidad a la altura del nivel del mar. (kg/m³)

Z altura sobre el nivel del mar del lugar donde se desea conocer la densidad (pies).

T temperatura en grados Rankin (460 + °F) del lugar donde se desea conocer la densidad.

R constante de los gases = 53,3.



Ejercicio propuesto: Calcular la densidad del aire del lugar donde se encuentre.

2.1.3 OXÍGENO

El objetivo de la ventilación es claro y simple: proveer flujo de aire en cantidad y calidad suficiente para diluir los contaminantes a concentraciones seguras en todos los lugares de la mina, donde las personas deban trabajar, circular o se localice maquinaria. (McPherson, 2012).

Las siguientes son las condiciones ambientales que se pretenden mejorar con la ventilación:

2.1.3 OXÍGENO

El oxígeno se difunde a través de las paredes de los alvéolos de los pulmones para formar la oxihemoglobina en la sangre.

Símbolo	O ₂	Peso molecular	31,999 g/mol
Densidad (20oC y 100kPa)	1,3129 kg/m ³	Densidad relativa (aire seco)	1,1047
VLP	>19,5%, <23,5%		
Olor, color y sabor	Ninguno		
Peligros	Su deficiencia causa la muerte. Puede causar mezclas explosivas con gases reactivos.		
Origen	Aire de las minas		
Efectos fisiológicos por las personas expuestas a déficit	% de O₂	Síntomas	
	21-18	Ningún efecto sobre el proceso de respiración.	
	18-14	Aumento del volumen de respiración, elevación del pulso, efecto sobre los músculos.	
	14-10	Marcada elevación del pulso, respiración acelerada, vómitos, desmayos y cianosis.	
	10-15	Conmoción con cianosis intensiva, ataques de pérdida de conocimiento hasta el coma, respiración rápida y superficial que conduce a la convulsión y muerte rápida.	

Tabla 3. Información del oxígeno.

- En la Tabla 4 se presentan las tasas de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono. Esta tabla sirve de ayuda para estimar los efectos de la respiración en las concentraciones de un área confinada.

Símbolo	Respiraciones /min	Tasa de inhalación (l/s)	Consumo de O₂ (l/s)	CO₂ producido
En descanso	12-18	0,08-0,2	0,005	0,004
Trabajo moderado	30	0,8- 1,0	0,03	0,027
Trabajo vigoroso	40	1,6	0,05	0,05

Tabla 4. Tasas de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono.
Fuente: Forbes and Grove, 1954.

A photograph of several miners working in a dark tunnel. They are wearing blue work clothes, yellow hard hats with headlamps, and white gloves. One miner in the foreground is using a pickaxe to break rock. A large green speech bubble with the word 'EJEMPLO' is overlaid on the left side of the image.

EJEMPLO

- Se suministra un caudal de aire de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ a 10 personas que se encuentran trabajando en una tasa moderada en una mina. El aire ingresa con una concentración de 20,6% de O_2 y 0,1% de CO_2 . Determine los cambios causados por la respiración en las concentraciones de estos gases.

- Solución:**

para una tasa moderada de actividad, la Tabla 4 indica una tasa de consumo individual de 0,03 l/s para el O_2 y una tasa de producción de 0,027 l/s para CO_2 . Tenemos entonces para diez personas lo siguiente:

Agotamiento de O_2	=	$10 \times 0,03 \times 10^{-3}$	=	$0,003 \text{ m}^3/\text{s}$
Adición de CO_2	=	$10 \times 0,027 \times 10^{-3}$	=	$0,00027 \text{ m}^3/\text{s}$
En el aire de ingreso:				
Flujo de O_2	=	$5 \times 0,206$	=	$1,03 \text{ m}^3/\text{s}$
Flujo de CO_2	=	$5 \times 0,001$	=	$0,005 \text{ m}^3/\text{s}$
En el aire de ingreso:				
Flujo de O_2	=	$1,03 - 0,0003$	=	$1,0297 \text{ m}^3/\text{s}$
Flujo de CO_2	=	$0,055 + 0,00027$	=	$0,000527 \text{ m}^3/\text{s}$

- Respuesta:**

Concentración de O_2	=	$(1,0297/5) \times 100$	=	20,594 %
Concentración de CO_2	=	$(0,000527/5) \times 100$	=	0,1054 %

Del ejercicio anterior puede deducirse que las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono prácticamente no variaron, la pregunta es entonces, si el efecto de la respiración es limitado con respecto a las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, ¿por qué el contenido de oxígeno decrece a medida que circula el aire en la mina? Estas son las razones:

La mayor cantidad de oxígeno en una mina subterránea se consume en los siguientes procesos:



2.1.4 Metano

El metano junto con el aire forma el grisú, la energía mínima de ignición es de 0,3 mJ, por lo tanto, con una simple chispa sería suficiente para iniciar una explosión. Es casi dos veces más ligero que el aire, por lo que tiende a acumularse en las partes altas. En la Tabla 5 se presenta información sobre este GAS:

Símbolo	CH₄	Peso molecular	16,04 g/mol
Densidad (20oC, 100kPa)	0,6581 kg/m³	Densidad relativa (aire seco)	0,554
VLP	1% evacuar del frente, 1,5% evacuar de la mina.		
Límites de explosividad	5 – 15 % (no son absolutos y disminuyen en función del incremento de temperatura y la presencia de polvo de carbón en suspensión).		
Olor, color, sabor	Ninguno.		
Peligros	Explosivo y asfixiante.		
Origen	El metano existe en los mantos de carbón en dos formas: 1) Gas libre: moléculas que se pueden mover entre los poros y la red de fracturas. 2) Gas absorbido: moléculas que son retenidas en la estructura del carbón; aproximadamente el 95 % del gas se presenta de esta forma.		

Tabla 5. Información del metano.

2.1.5 DIÓXIDO DE CARBONO

En la Tabla 6 se presentan las características del dióxido de carbono, los efectos fisiológicos son tomados del trabajo realizado por Strang y Mackenzie Wood en 1985.

Símbolo	CO ₂	Peso molecular	44 g/mol
Densidad (20°C, 100kPa)	0,6581 kg/m ³	Densidad relativa (aire seco)	1,519
VLP	TWA: 0,5%, STEL: 3,0%		
Olor, color, sabor	Sabor y olor ligeramente ácido, perceptible solo a partir del 10%.		
*Peligros	Asfixiante al reducir la presión parcial de oxígeno (O ₂). Promueve el incremento de la tasa de respiración.		
Origen	Combustión de motores diésel, incendios y explosiones, combustión u oxidación del carbón y emanaciones del macizo rocoso.		
Efectos fisiológicos del CO ₂	% de CO ₂	Síntomas	
	0,037-0,038	Ningún efecto.	
	0,5	Incremento de la ventilación pulmonar en un 5 %.	
	2	Incremento de la ventilación pulmonar en un 50 %.	
	3	Incremento de la ventilación pulmonar se duplica. Jadeo fuerte.	
	5 a 10	Jadeo fuerte que fatiga hasta el agotamiento y deolor de cabeza.	
	10 a 15	Jadeo intolerante, dolor de cabeza severo, rápido agotamiento y colapso.	
Primeros auxilios	Administrar oxígeno, acompañar de calor y evitar el esfuerzo.		

Tabla 6. Información del dióxido de carbono.

*Aunque no es un gas explosivo, sí se puede acumular a altas presiones y generar explosiones físicas muy violentas (ourburst).



2.1.6 MONÓXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono es uno de los gases más peligrosos y comunes en la atmósfera minera. La inmensa mayoría de muertes posterior a una explosión subterránea, ocurrieron debido a la intoxicación por monóxido de carbono (ver Tabla 7). Este ingresa rápidamente por los pulmones y se combina con la sangre, mucho más fácilmente que el oxígeno (hasta 300 veces), formando carboxihemoglobina, que impide que la hemoglobina transporte el oxígeno a las células y, por tanto, que el organismo no obtenga la energía necesaria para vivir. No es un gas irritante, por lo que no se detecta en las vías respiratorias al ser inhalado.

Símbolo	CO	Peso molecular	28,01 g/mol
Densidad (20 °C, 100 kPa)	1,3129 kg/m ³	Densidad relativa (aire seco)	0,967
VLP	TWA: 25 ppm, STEL: 200 ppm.		
Límites de explosividad	12,5 - 74,2%		
Olor, color y sabor	Ninguno		
Peligros	Tóxico, asfixiante, inflamable y explosivo.		
Origen	Tóxico, asfixiante, inflamable y explosivo.		
Efectos fisiológicos del CO	ppm de CO	Síntomas	
	25	Ningún efecto.	
	200	Posible dolor leve en la parte frontal de la cabeza en dos a tres horas.	
	400	Dolor de cabeza y náuseas en una a dos horas. Dolor occipital después de dos horas y media a tres horas y media.	
	800	Dolor de cabeza, mareo y náuseas en 45 minutos. Colapso y posibilidad de muerte en dos horas.	
	1.600	Dolor de cabeza, mareo y náuseas en 20 minutos. Colapso y posibilidad de muerte en una hora.	
	3.200	Dolor de cabeza, mareo y náuseas en cinco a diez minutos. Inconsciencia y posibilidad de muerte en 30 minutos.	
	6.400	Dolor de cabeza, mareo y náuseas en uno a dos minutos. Inconsciencia y posibilidad de muerte en diez a quince minutos.	
	12.800	Inconsciencia inmediata y posibilidad de muerte en uno a tres minutos.	

Primeros auxilios

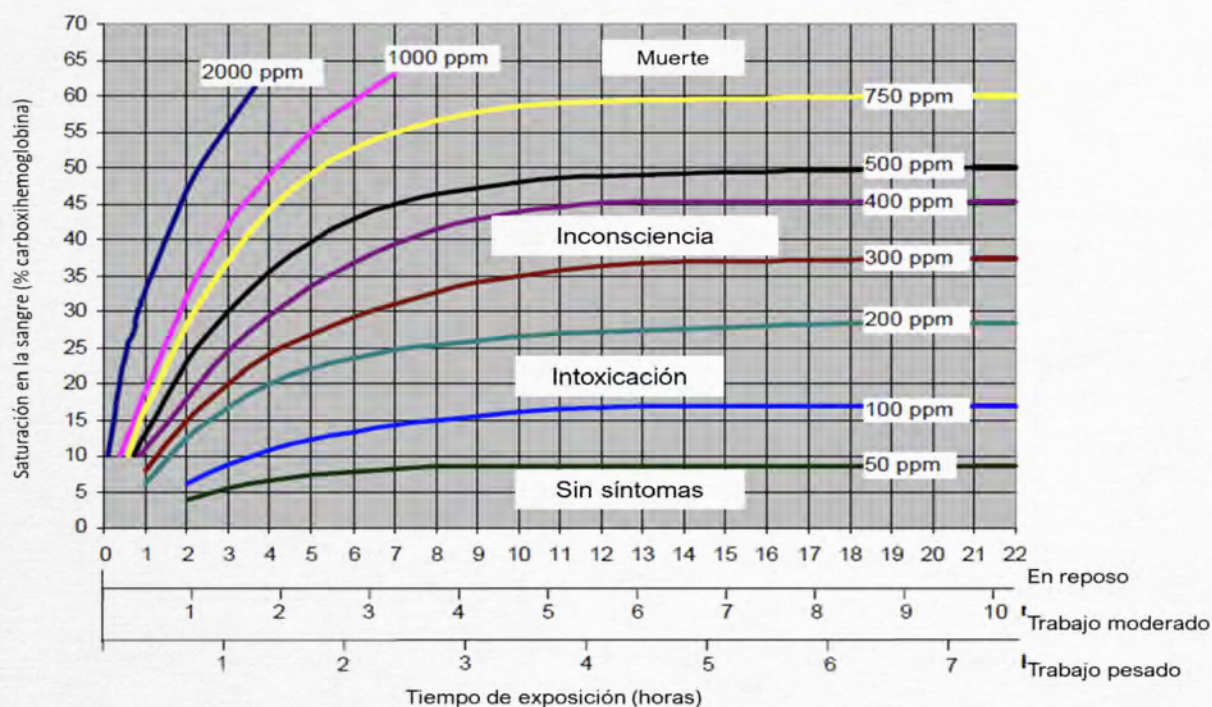


1. Retirar a la víctima del sitio con exposición.
2. Realizarle reanimación cardiopulmonar (RCP) si no tiene pulso, ni respiración.
3. Transportarla en camilla.
4. Suministrarle oxígeno (en cuatro horas se eliminaría alrededor del 50 % con respiración normal, al suministrar oxígeno el tiempo puede reducirse a 40 minutos).
5. Mantenerla caliente.

Tabla 7. Información del monóxido de carbono.

Los efectos fisiológicos del CO están en función de:

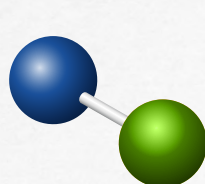
- 1 La concentración del gas.
- 2 El tiempo de exposición.
- 3 La tasa de ventilación pulmonar (que depende de la actividad física).



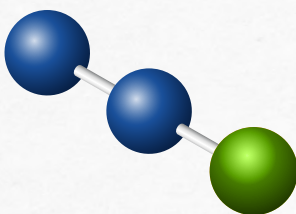
Gráfica 6: Efectos fisiológicos del monóxido de carbono.
Fuente: Strang y Wood, 1985.

2.1.7 ÓXIDOS DE NITRÓGENO

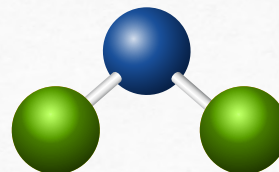
El óxido nítrico (NO), el óxido nitroso (N₂O) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son formados por la combustión de los motores y las voladuras. El NO se convierte rápidamente en NO₂ con la presencia de agua, este último es el más tóxico de los tres, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 8.



NO



N₂O



NO₂

Símbolo	NO ₂	Peso molecular	46,01 g/mol
Densidad (20 °C, 100 kPa)	1,888 kg/m ³	Densidad relativa (aire seco)	1,177
VLP	NO (TWA): 25 ppm, NO ₂ (TWA): 0,2 ppm		
Límites de explosividad	12,5 - 74,2%		
Olor, color y sabor	Sabor y olor ácido. Color café rojizo.		
Peligros	Muy tóxico. Provoca irritación en las vías respiratorias y pulmones.		
Origen	Voladuras, gases de soldadura y gases de combustión de maquinaria.		
Efectos fisiológicos del NO²	ppm de NO²	Efectos	
	25	Nivel de exposición admisible.	
	50	Exposición máxima por 30 minutos.	
	100	Inicio de tos.	
	150	Fuerte incomodidad, podría ocasionar neumonía.	
	200	Opresión en el pecho, alta probabilidad de muerte.	
 Primeros auxilios	Igual que para el monóxido de carbono.		

Tabla 8. Información de dióxido de nitrógeno.

2.1.8 ÁCIDO SULFÚDRICO

Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico es un gas altamente tóxico que reacciona con las enzimas en el torrente sanguíneo, inhibiendo la respiración celular, de manera que puede llegar a colapsar los pulmones (ver Tabla 9).

Símbolo	H ₂ S	Peso molecular	34,08 g/mol
Densidad (20°C, 100kPa)	1,398 kg/m ³	Densidad relativa (aire seco)	1,177
VLP	TWA: 1 ppm, STEL: 5 ppm		
Límites de explosividad	4,3 - 45,5%		
Olor, color y sabor	Olor a huevos podridos.		
Peligros	Altamente tóxico, irritante a los ojos y al tacto respiratorio. Explosivo.		
Origen	- En minas metálicas se produce por acción del agua ácida sobre la pirita y por el efecto de la voladura en sulfuros ricos. - En aguas mineras estancadas.		
Efectos fisiológicos del H ₂ S	ppm de H ₂ S	Efectos	
	0,13	Olor perceptible.	
	5	TLV- STEL. Fácil de detectar por un olor moderado.	
	10	Comienzo de la irritación ocular.	
	100	Tos, irritación ocular, pérdida del sentido del olfato después de dos a cinco minutos.	
	200 - 300	Conjuntivitis e irritación del tracto respiratorio tras una hora de exposición.	
	500 - 700	Posible pérdida de consciencia, edema pulmonar y depresión respiratoria.	
	1.800 -5.000	Muerte inmediata.	
Primeros auxilios	Igual que para el monóxido de carbono.		

Tabla 9. Información de ácido sulfhídrico.

2.1.9 ANHÍDRIDO SULFUROSO

También se denomina dióxido de azufre, se trata de una sustancia reductora que con el tiempo y el contacto con el aire y la humedad se convierte en trióxido de azufre (ver la Tabla 10).

Símbolo	SO ₂	Peso molecular	64,06 g/mol
Densidad (20°C y 100kPa)	2,628 kg/m ³	Densidad relativa (aire seco)	2,212
VLP	STEL: 0,25 ppm		
Olor, color y sabor	Sabor ácido y olor sofocante.		
Peligros	Es tóxico e irritante. Al combinarse con oxígeno forma óxido de azufre (SO ₃) que en presencia de humedad forma ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄).		
Origen	Se presenta en los incendios de sulfuros y en voladuras en zonas ricas en sulfuros. También, en la combustión de equipos diésel.		
Efectos fisiológicos del SO₂	ppm de SO₂	Efectos	
	0,3 – 1	Detección del gas por su sabor	
	3	Detección por su olor.	
	6 – 12	Irritación de nariz y garganta.	
	20	Irritación de los ojos.	
	100	Inmediatamente peligroso para la vida y la salud a los 30 minutos.	
	400	Inmediatamente peligroso para la vida y la salud a los 30 minutos.	
Primeros auxilios	Igual que para el monóxido de carbono.		

Tabla 10. Información del anhídrido sulfuroso.

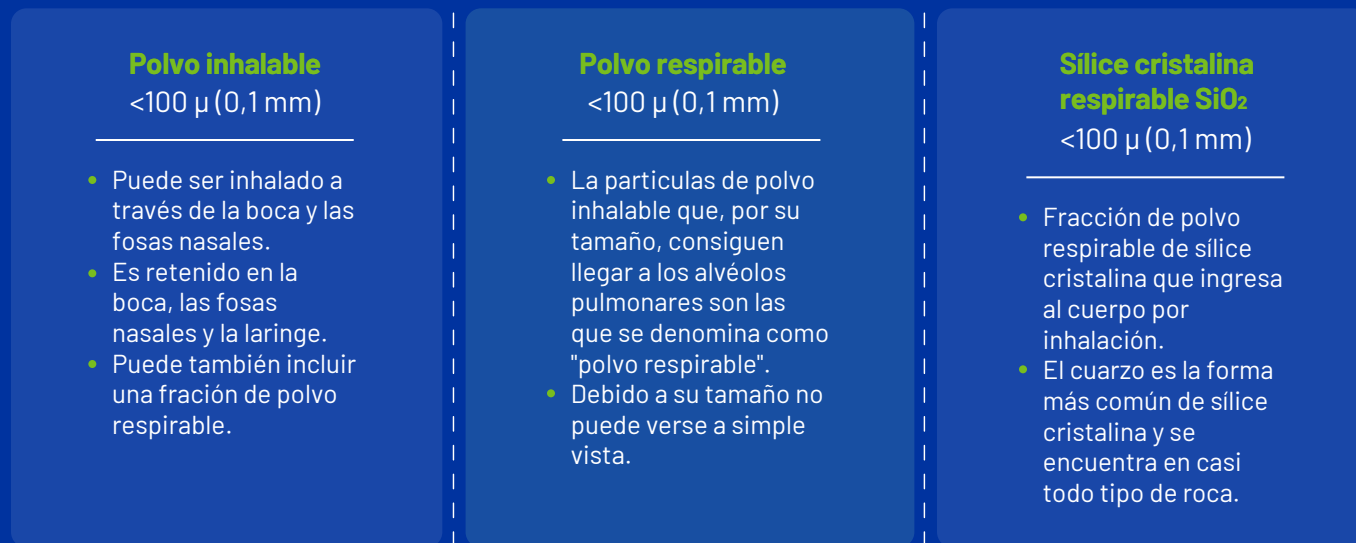
2.2 POLVO

Las principales operaciones en las que se puede generar polvo son: perforación y voladuras, trituración y molienda, cargue y transporte de minerales y velocidad excesiva de la ventilación.

El polvo de carbón puede suponer riesgos de seguridad o de salud. Con respecto a los físicos o de seguridad, puede llegar a participar en explosiones cuando tiene una granulometría menor de 200 micras y está presente en concentraciones que oscilan los 20 a 500 g/m³. Su estudio y medidas de control, como la inertización, se abordarán en otra guía técnica; esta sección se centrará en sus efectos para la salud.

2.2.1 POLVO INHALABLE, RESPIRABLE Y DE SÍLICE CRISTALINA RESPIRABLE

La nocividad del polvo, al ser inhalado, depende de sus características químicas y del tamaño de sus partículas, el cual es expresado como "diámetro equivalente" de una esfera que tiene la misma área proyectada de la partícula. Se distinguen dos categorías de polvo con respecto a su tamaño: inhalable y respirable, y existe, además, un tipo muy peligroso de polvo respirable constituido por sílice cristalina (ver Gráfica 7).



Gráfica 7. Clasificación del polvo.

2.2.2 EFECTOS PARA LA SALUD

Cuando la concentración del polvo inhalado excede la capacidad del sistema respiratorio para eliminarlo, pueden presentarse enfermedades pulmonares. En la Tabla 11 se relacionan los principales efectos adversos para la salud del polvo inhalable y respirable.

Efectos adversos del polvo inhalable	Efectos adversos del polvo respirable
1. Reducción de la visibilidad en el sitio de trabajo. 2. Irritación de los ojos y la nariz. 3. Condiciones preexistentes como asma pueden agravarse y causar bronquitis.	1. Fibrosis y cicatrices en los pulmones (neumoconiosis). 2. Tos, esputo y dificultad para respirar. 3. Falla respiratoria.

Tabla 11. Efectos adversos para la salud del polvo inhalable y el polvo respirable.

NEUMOCONIOSIS:

enfermedad pulmonar causada por la reacción fibrótica de los tejidos pulmonares ante la inhalación de algunos polvos.

Se puede prevenir, pero no curar y se presenta de dos tipos:



Neumoconiosis de los mineros del carbón:

es causada por la exposición prolongada al polvo de carbón a través de las vías respiratorias y los alvéolos. Esta enfermedad genera inflamación persistente y cicatrices en los tejidos pulmonares, y pueden pasar hasta quince años antes de que comience a manifestar sus síntomas, por ello es tan importante la prevención.

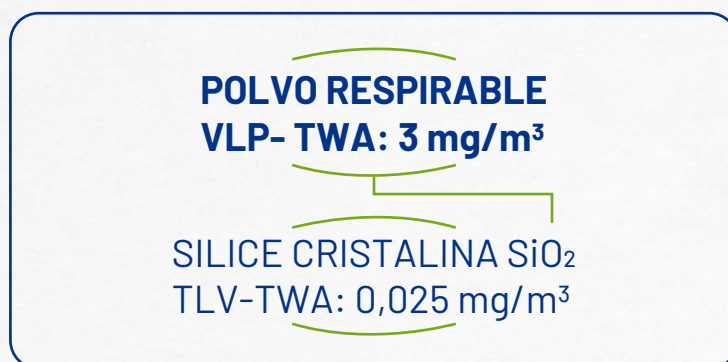


Silicosis:

es causada por la exposición a sílice cristalina respirable o polvo de cuarzo. Causa una respuesta inflamatoria peor que la del polvo de carbón. Se producen cicatrices alrededor de las partículas de sílice que se acumulan y daños alrededor del tejido pulmonar, lo cual puede reducir la capacidad de extraer oxígeno del aire. Los mineros de carbón también pueden desarrollar silicosis, por ejemplo, por la exposición a trabajos en labores en roca.

2.2.3 VLP

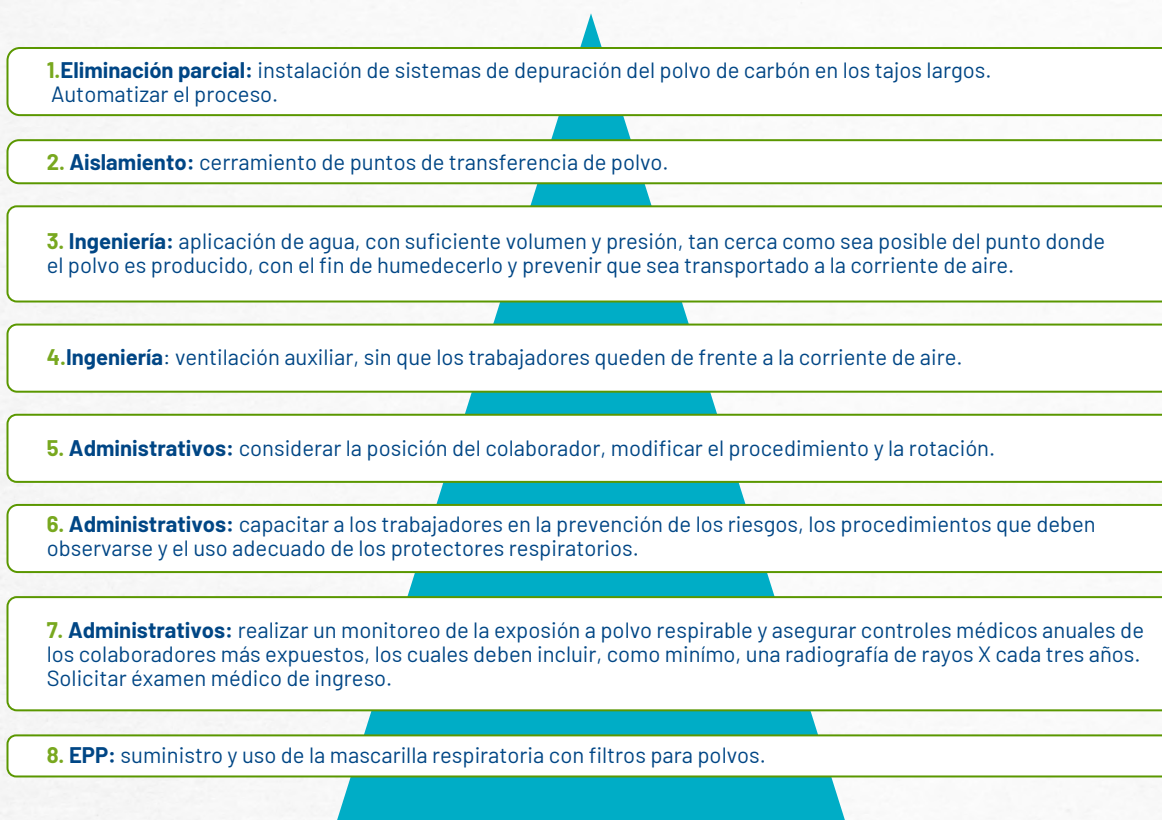
La ACGIG, de acuerdo con los índices de referencia para Colombia, establece los siguientes VLP (ver Gráfica 8).



Gráfica 8. VLP para el polvo respirable.

2.2.4 MEDIDAS DE CONTROL

Lo primero que debe hacerse es identificar las zonas fuentes de polvo y las personas expuestas. En la Gráfica 9 se presentan las medidas recomendadas de acuerdo con la jerarquía de controles, la cual está en línea con lo establecido en la Resolución 2467 de 2022 “Reglamento de Higiene y Seguridad para la Prevención y Control del Riesgo por Exposición a Sílice Cristalina Respirable”.



Gráfica 9. Medidas de control del polvo inhalable y respirable en los sitios de trabajo.



2.3 AMBIENTE TÉRMICO

El ambiente térmico está controlado, especialmente, por tres variables: temperatura, humedad y velocidad del aire. Para generar un ambiente adecuado, la ventilación es uno de los controles más importantes. En esta sección se revisará los mecanismos de autorregulación del cuerpo, los efectos para la salud de exposición ante ambientes térmicos agresivos, el índice para evaluar el ambiente térmico y las medidas de control.

2.3.1 TERMORREGULACIÓN DEL CUERPO

El cuerpo humano, por medio de procesos biológicos y químicos, consume los nutrientes de los alimentos y se combina con el oxígeno para generar energía metabólica. La mayor parte de esta energía se transforma en calor metabólico, aproximadamente un 20 % en trabajo mecánico y una cantidad insignificante en cambios de la masa corporal. A su vez, el calor metabólico es transferido a través de la respiración, la evaporación (sudoración), la convección y la radiación. Estos procesos son controlados por el hipotálamo que envía señales a la piel, las glándulas, los músculos y los órganos. El objetivo es lograr mantener estable la temperatura interna central (37°C) y los problemas aparecen cuando se rompe ese equilibrio, ya que los mecanismos de defensa del organismo no alcanzan a controlar las alteraciones térmicas inducidas.



2.3.2 EFECTOS PARA LA SALUD

En la Tabla 12 se relacionan algunos de los riesgos más habituales asociados a condiciones térmicas adversas:

Riesgos	Enfermedades	Síntomas
Por exceso de calor	Síntomas iniciales	• Pérdida de interés en las tareas y dificultad para mantenerse alerta. • Pérdida de coordinación y destreza. • Disminución en la productividad mental y manual en el trabajo. • Disminución de la moral y el cumplimiento de protocolos de seguridad.
	Agotamiento por calor: se da por el decrecimiento en el volumen de sangre que se genera de la deshidratación.	• Cansancio, mareo, hormigueo en los dedos de los pies y manos, dificultad para respirar, palpitaciones, baja tensión arterial, visión borrosa, dolor de cabeza, náuseas, fatiga y piel húmeda.
	Golpe de calor: se da cuando la temperatura central alcanza valores de 41°C o más, en este caso las señales que envía el hipotálamo a los órganos y los músculos son confusas.	• Pérdida de conciencia. • Finaliza la transpiración. • Desorientación severa: pupilas dilatadas, mirada vidriosa y comportamiento agresivo. • Pérdida de las funciones corporales. • Lesiones en el cerebro, los riñones y el hígado
Por frío	Hipotermia	• Enfriamiento general del cuerpo.
	Congelación de extremidades	• Debido a la vasoconstricción que presenta el organismo para retardar la pérdida de calor.

Tabla 12. Enfermedades por el ambiente térmico.



Cuando una persona ha sufrido un golpe de calor, se recomienda el siguiente protocolo de primeros auxilios:

1



Evitar mover inmediatamente a la víctima hasta que la temperatura central esté bajo control.

2



Enfriar mediante el movimiento de aire y realizar masajes en la piel con agua que no tenga una temperatura inferior a 15 °C, esto ayuda a promover el flujo sanguíneo.

3



Realizar RCP si no tiene pulso ni respiración.

4



Si la víctima está consciente, suministrar frecuentes sorbos de agua.

5



Una vez la temperatura interna haya bajado a 38,5 °C, la persona debe ser cubierta con una sábana ligera y llevada en camilla a un servicio médico.

Otros de los efectos muy importantes del estrés térmico es la significativa disminución de la productividad.

2.3.3 VLP

El Decreto 1886 de 2015 (título X, capítulo II) establece la temperatura efectiva como el índice para evaluar el ambiente térmico. Este es un método empírico, pero muy práctico y sencillo de usar, que mide de manera indirecta el estrés térmico.

La temperatura efectiva es un índice que relaciona la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, este valor indica la sensación térmica que el cuerpo percibe. A medida que esta aumenta, el cuerpo siente menor confort, generando un estrés térmico, en el que a partir de los 31 a los 39 °C, pueden generarse trastornos fisiológicos. La temperatura efectiva se puede calcular usando la Ecuación 2.

$$T_e = 0,3T_s + 0,7T_h - V$$

Ecuación 2. Temperatura efectiva.

Donde,

T_e : temperatura efectiva (°C).

T_s : temperatura seca (°C).

T_h : temperatura húmeda (°C).

V : velocidad del flujo de aire (m/s).

te (°C)	28	29	30	31	32
t (horas)	Sin limitaciones	6	4	2	0

Tabla 13. Tiempo de permanencia bajo tierra en función de la temperatura efectiva.

2.3.4 MEDIDAS DE CONTROL

En la Gráfica 10 se proponen algunas medidas preventivas y de mitigación del estrés térmico.



Gráfica 10. Medidas de control de estrés térmico.

2.3 AJUSTES EN LOS VLP

2.4.1 VLP PARA SUSTANCIAS INDIVIDUALES Y PARA MEZCLAS

Si hay dos o más contaminantes gaseosos o particulados en el aire, que tengan efectos adversos en diferentes partes del cuerpo u órganos, entonces el VLP debe evaluarse en función de su efecto individual.

$$IC_i = C_i / VLP_i$$

Ecuación 3. Índice de concentración individual de una sustancia.

Si hay dos o más que tengan efectos adversos en la misma parte del cuerpo u órgano, entonces el VLP debe calcularse basado en su efecto combinado.

$$IC_M = \sum C_i / VLP_i$$

Ecuación 4. Índice de concentración para una mezcla.

Donde,

IC_i : índice de concentración individual de una sustancia.

IC_M : índice de concentración para la mezcla.

C_i : concentración del contaminante i.

VLP_i : VLP del contaminante i.

Si $IC_i > 1$, el límite de exposición está excedido para esa sustancia.

Si $IC_M > 1$, el límite de exposición está excedido y se debe reducir la concentración de todas o algunas de las sustancias.

Ejemplo

Un análisis de muestras de aire indica las siguientes concentraciones: dióxido de carbono 0,2%, anhídrido sulfuroso 1 ppm y monóxido de carbono 20 ppm. Determine el promedio ponderado en el tiempo (TWA), el límite de exposición a corto plazo (STEL) para la mezcla y presente conclusiones de los resultados.

Solución

El anhídrido sulfuroso es irritante en los ojos y el sistema respiratorio. El dióxido de carbono es un estimulante de la respiración, que incrementa la tasa de ventilación de los pulmones. El monóxido de carbono, sin embargo, afecta la capacidad de transporte de oxígeno de los glóbulos rojos y no necesita ser combinado con los otros gases para determinar los VLP de la mezcla.

¹TWA: su sigla en inglés significa Time Weighted Average.

²STEL: su sigla en inglés significa Short-Term Exposure Limit

En la siguiente tabla se resumen los VLP, TWA y STEL para los gases dados:

Gas	TLV-TWA	TLV-STEL
CO ₂	0,5 %	3 %
H ₂ S	1 ppm	5 ppm
CO	25 ppm	200 ppm

Donde,

$$\text{TWA-mezcla: } 0,2/0,5 + 1/1 = 1,4$$

$$\text{STEL- mezcla: } 0,2/3 + 1/5 = 0,27$$

Conclusiones:

- La concentración de CO medida de 20 ppm y tratada separadamente, muestra que está dentro del VLP de 25 ppm.
- El TWA de la mezcla es mayor a 1, por lo tanto, el tiempo límite de exposición para ocho horas está excedido.
- El STEL de la mezcla es menor que 1, por lo tanto, está en el rango permisible.

2.4.2 FACTOR DE CORRECCIÓN PARA JORNADAS MAYORES A OCHO HORAS

Si en el día la jornada laboral excede las ocho horas, en función de ello debe realizarse un ajuste en los VLP.

$$F_{c_{\text{día}}} = \left(\frac{8}{hd} \right) \left(\frac{24-hd}{16} \right)$$

Ecuación 5.
Factor de corrección de VLP para el día

$$VLP_{\text{día}} = F_{c_{\text{día}}} \times VLP$$

Ecuación 6. VLP para una jornada laboral diferente a ocho horas.

Donde,

F_{c_{día}}: factor de corrección del VLP para el día.
VLP_{día}: valor límite permisible corregido.
hd: horas de trabajo al día.
VLP: valor límite permisible para ocho horas



3. CONCEPTOS DE LA VENTILACIÓN

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Revisar y plantear los principios básicos de mecánica de fluidos en los que se fundamenta la ventilación subterránea.
- Realizar el cálculo del “ tiro natural”.

3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS

3.1.1 ¿QUÉ ES UN FLUIDO?

Un fluido es una sustancia que cambia su forma con relativa facilidad, debido a que las moléculas constituyentes son libres para moverse entre sí. Los fluidos incluyen tanto a los líquidos, que cambian de forma, pero no de volumen, como a los gases que cambian fácilmente de forma y de volumen. El espaciado molecular da lugar a estas diferencias:

- El volumen de un gas, con su gran espaciado intermolecular, será mucho más grande que la misma masa de un líquido del cual se evaporó. Por lo tanto, la densidad (masa/volumen) de los gases es mucho menor que la de los líquidos.

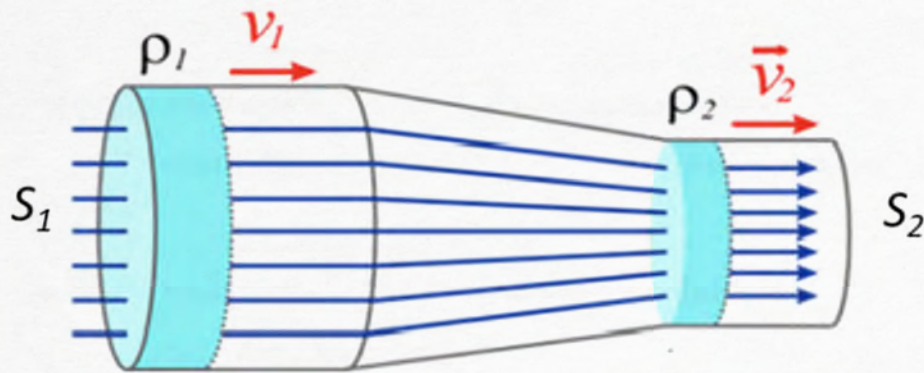
- Si se aplica presión a un líquido, las fuertes fuerzas de repulsión en distancias intermoleculares pequeñas ofrecerán una alta resistencia, por lo cual el volumen del líquido cambia muy poco; esto hace que se consideren fluidos incompresibles. Por otro lado, las distancias mucho mayores entre las moléculas de un gas, permiten que sean fácilmente empujadas cuando son sujetas a compresión; lo que quiere decir que son, entonces, fluidos compresibles.

3.1.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad es un caso particular del principio de conservación de la masa. Se basa en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción. Esta se conforma con los siguientes conceptos:

Flujo volumétrico (caudal): $Q = \text{Volumen/tiempo}$

Flujo másico: $M = \text{Caudal} \times \text{densidad (constante)} = Q\rho$



Gráfica 11. Flujo a través de un fluido.

$$Q_1 = Q_2, S_1 V_1 = S_2 V_2, V_2 = V_1 \frac{S_1}{S_2}$$

Ecuación 7. Ecuación de continuidad.

Donde,

S: superficie de las secciones transversales de los puntos 1 y 2 del conducto (m^2).

V: velocidad del flujo en los puntos 1 y 2 de la tubería (m/s).

Puesto que el caudal debe mantenerse constante a lo largo de todo el conducto, cuando la sección disminuye, la velocidad del flujo aumenta en la misma proporción y viceversa.

La chimenea CH-200 se construye a lo largo de 20 m con una sección de 2 m x 3 m, con fines de reducir el costo de su ejecución, se reduce la sección a 1,5 m x 2 m. Calcule el caudal de aire que circula por la chimenea y la velocidad en el tramo reducido, sabiendo que la velocidad en el tramo más ancho es de 20 m/s.

Solución:

La ecuación de continuidad es un caso particular del principio de conservación de la masa. Se basa en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción. Esta se conforma con los siguientes conceptos:

$$A_1 = 2\text{m} \times 3\text{m} = 6 \text{ m}^2, A_2 = 1,5 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 3 \text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{20 \text{ m}}{\text{s}} \quad V_2 = ?$$

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad Q = 6 \text{ m}^2 \times 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 120 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{120}{3} = 40 \text{ m/s}$$

Respuesta:

el caudal que circula por la chimenea es de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ y la velocidad en el tramo reducido es de 40 m/s .

3.2 PRESIÓN DE UN FLUIDO

3.2.1 ¿QUÉ ES LA PRESIÓN Y LA PRESIÓN DE CABEZA?

- La presión es la fuerza que actúa sobre una unidad de área y se expresa matemáticamente así:

$$P = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} = \frac{F}{A}$$

Ecuación 8. Expresión para la presión.

- En el SI se mide en Pascales (Pa), donde un $\text{Pa} = \text{N/m}^2$

$$\text{Newton (N)} = \frac{\text{kg.m}}{\text{s}^2}$$

- Ejercicio propuesto: Dimensione la presión de un Pascal y la fuerza que representa un newton.

PRESIÓN DE CABEZA

Si un líquido de una densidad (ρ) es puesto en un tubo vertical con un área de sección transversal A , hasta que el nivel alcance una altura (h), el volumen del líquido se puede calcular así:

$$\text{Volumen} = hA \text{ (m}^3\text{)}$$

- Además de la definición de densidad (masa/volumen), la masa de un líquido es:

$$\text{Masa} = hA\rho \text{ (kg)}$$

- El peso del líquido va a ejercer una fuerza (F) en la base del tubo igual a la masa por la aceleración de la gravedad (g):

$$\text{Fuerza} = hA\rho g \text{ (N)}$$

- Pero, presión es igual a fuerza/área, por tanto la presión en la base del tubo es:

$$p = F/A = \rho gh \text{ (Pa)}$$

Ecuación 9. Presión de cabeza.

- Por lo tanto, si la densidad del líquido es conocida y se asume un valor constante para g , entonces la presión puede ser expresada en términos de la cabeza del líquido (h).

Ejercicio:

En un ventilador se midió con un tubo de Pitot las siguientes presiones en milímetros de columna de agua (mmca). Expréselas en pascles, asumiendo como valor de densidad del agua 1000 kg/m^3 :

$$\begin{aligned} H_s \text{ (carga estática)} &= 23 \\ H_d \text{ (carga dinámica)} &= 13 \end{aligned}$$

3.2.2 PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y MANOMÉTRICA

Presión atmosférica:

Es la fuerza, por unidad de superficie, que ejerce el aire de la atmósfera sobre la superficie terrestre y que disminuye con el aumento de la altura.

Presión atmosférica al nivel del mar y 15 °C = 760 mm Hg = 101,3 kPa

$$p_h = p_0 - 0,03415 \frac{h}{T_h}$$

Ecuación 10. Presión atmosférica en función de la altura y la temperatura.

Donde,

- p_h : presión a la altura h (kPa).
- p_0 : presión al nivel del mar y 15°C (kPa).
- h : altura sobre el nivel del mar (m).
- T_h : temperatura en grados kelvin (K) a la altura h .

Presión manométrica:

Es la que se mide con respecto a la presión atmosférica, dado que es necesario medir las diferencias entre la presión por medio de un ducto y la presión atmosférica exterior.

Presión absoluta = presión atmosférica + presión manométrica

La presión manométrica puede ser positiva o negativa. La presión absoluta siempre es positiva.
¿Qué significa una presión manométrica negativa?

3.3 FLUIDOS EN MOVIMIENTO

3.3.1 ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli o de conservación de energía mecánica, parte del principio de que la energía mecánica aportada al sistema se convierte en trabajo de rozamiento, incrementando la energía interna, la energía potencial y la energía cinética. Esta se aplica para un flujo permanente, incompresible y sin viscosidad (sin fricción), y en ella se ignoran los efectos térmicos y se considera únicamente la energía mecánica.

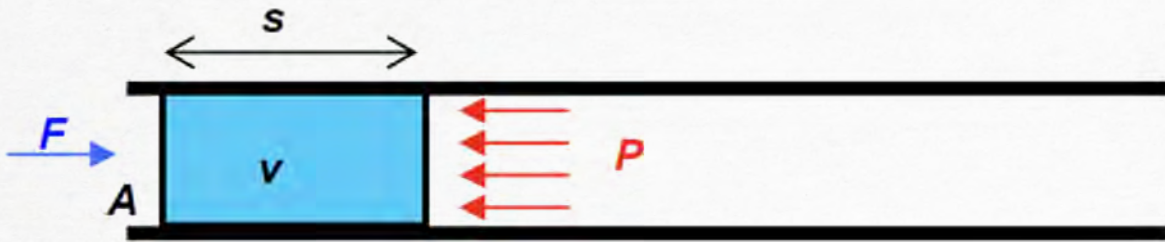
Por lo tanto, en el flujo del aire, como ocurre en un sistema de ventilación en el que el cambio de la presión es solo una pequeña fracción de la presión absoluta, se puede considerar el gas como incompresible. Cada término de la ecuación es una forma de energía disponible:

$$\frac{V_2^2}{2} + Zg + \frac{p}{\rho} = \text{constante (J/kg)}$$

$$0 \quad \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + (Z_1 - Z_2)g + \frac{P_1 - P_2}{\rho} = 0$$

Ecuación 11. Ecuación de Bernoulli.

- **Primer término:** energía cinética, mover el flujo a una velocidad determinada.
- **Segundo término:** energía potencial, llevar el flujo a una elevación Z.
- **Tercer término:** energía de presión, vencer la resistencia de la presión del aire.



Gráfica 12. Trabajo de presión que realiza un fluido.

- Si cada término se multiplica por la densidad, se tendrán los términos de la ecuación expresados en presión (cinemática, hidrostática y estática).

$$\frac{\rho v^2}{2} + Z\rho g + p = \text{constante Pa}$$

- Esta expresión tiene el siguiente sentido físico aplicado al área de la ventilación: la presión generada por un ventilador o por el tiro natural, se utiliza para vencer la presión de rozamiento causada por la circulación y las variaciones de la presión cinemática, hidrostática y estática del aire.

3.3.2 PRESIÓN ESTÁTICA, TOTAL Y DINÁMICA



PRESIÓN ESTÁTICA (P_s):

es la que tiene un fluido y que, independientemente de la velocidad de este, se puede medir mediante la utilización de tubos piezométricos; es decir, es cualquier presión ejercida por un fluido que no es ejercida por el movimiento de este.



PRESIÓN DINÁMICA (P_v):

es la ejercida por la velocidad del fluido, actúa únicamente en la dirección del flujo, mientras que la presión estática actúa por igual en todas las direcciones y siempre en ángulo recto con todas las superficies que lo contengan. Para fluidos en reposo (estáticos) la presión dinámica es nula.

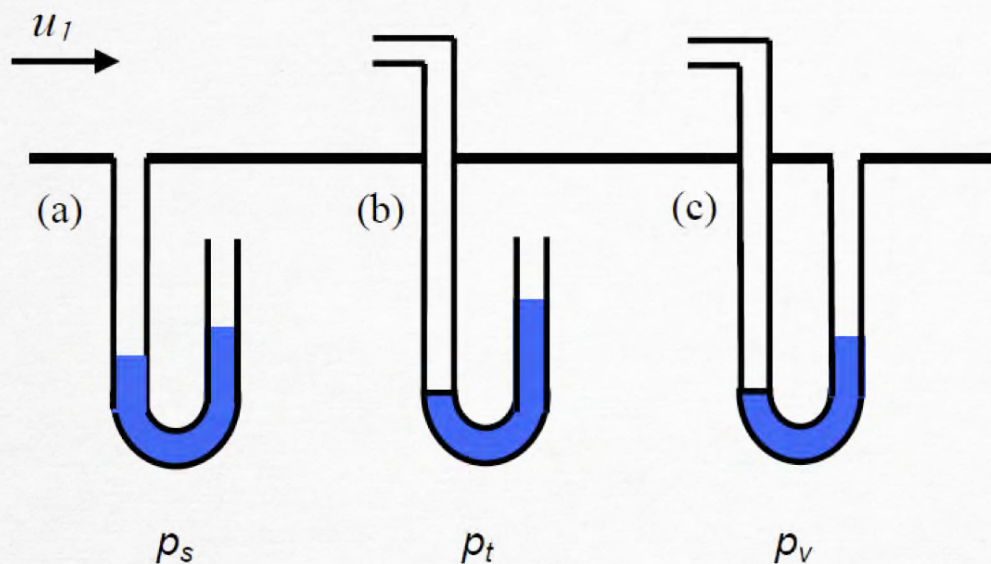


PRESIÓN TOTAL (P_T):

se define como la suma de la presión estática y la presión dinámica que ejerce un fluido.

$$p_T = p_s + p_v$$

Ecuación 12. Expresión para las presiones total, dinámica y estática.



3.3.3 RÉGIMEN DE FLUJO

El movimiento de un flujo depende del tipo de fluido, la velocidad y el diámetro del dispositivo por el que se desplaza. Se diferencian dos tipos: laminar y turbulento. El movimiento del aire en una mina subterránea se considera como un flujo turbulento, dado que el valor del número de Reynolds se representa así:

$$R_E = \frac{vD\rho}{\mu}$$

Ecuación 13. Cálculo del número de Reynolds.

Donde, v : velocidad del aire $\left(\frac{m}{s}\right)$
 D : diámetro equivalente de la labor.
 ρ : densidad del aire $\left(1,2 \frac{kg}{m^3}\right)$
 μ : viscosidad del aire $\left(1,8 \times 10^{-5} \text{ Nsm}^{-2}\right)$

- El número de Reynolds aplicado a cualquier labor subterránea sobrepasa el valor de 2.000, límite de flujo laminar, que solo existe con velocidades muy bajas y secciones muy pequeñas, imposibles de cumplir en minería.

Ejemplo:

En un tambor de ventilación de 5 m de diámetro pasa un flujo de aire de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ a una densidad media de $1,2 \text{ kg/m}^3$ y una temperatura promedio de 18°C . Determine el número de Reynolds para el tambor.

Solución:

$$\frac{Q}{A} = \frac{200 \text{ m}^3/\text{s}}{(2,5\text{m})^2 \times \pi} = 10,2 \text{ m/s}$$

$$R_E = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{\left(\frac{10,2 \text{ m}}{\text{s}}\right) \times (5\text{m}) \times \left(\frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right)}{1,8 \times 10^{-5} \text{ Nsm}^{-2}}$$

Respuesta: $3,4 \times 10^6$, es un flujo turbulento (> 2000).

3.3.4 PÉRDIDAS DE PRESIÓN POR ROZAMIENTO (CAÍDA DE PRESIÓN)

- En un circuito real la ecuación de Bernoulli debe reformularse para agregar las pérdidas por rozamiento:

$$\text{Pérdida por rozamiento} = P_r = (P_1 - P_2) + \gamma (Z_1 - Z_2) + \frac{\gamma}{2g} (V_1^2 - V_2^2)$$

- La caída de presión en régimen turbulento en un conducto se define con la fórmula:

$$p = \lambda \gamma \frac{v^2}{2g} \frac{PL}{4S}$$

Ecuación 14. Caída de presión de un fluido en régimen turbulento.

Donde,	p:	presión (N/m ²).
	γ:	peso específico del aire (N/m ³).
	λ:	coeficiente de rozamiento.
	V:	velocidad del aire (m/s).
	P:	perímetro de la labor (m).
	L:	longitud de la labor (m).
	S:	sección transversal de la labor (m ²).

- Si se divide por el peso específico del aire, se pueden expresar las pérdidas en presión de cabeza:

$$h = \lambda \frac{v^2}{2g} \frac{PL}{4S}$$

- Si se define como resistencia de una galería:

$$R = \lambda \gamma \frac{PL}{8gs^3} \left(\frac{Ns^2}{4S} \right)$$

Ecuación 15. Expresión para la resistencia de una galería.

$$1 \text{ kilomurgue (1K}\mu\text{)} = 1 \text{ Weis bach (Wb)}, 1\mu \text{ (murgues)} = 9,8 \times 10^{-3} \frac{Ns^2}{m^8}$$

- La caída de presión se puede determinar en términos de resistencia y caudal con la siguiente ecuación:

$$p = R \times Q^2$$

Ecuación 16. Relación cuadrática entre el caudal y la presión.

Donde,

- p:** presión (Pa).
- R:** resistencia equivalente de la mina (Ns^2/m^8).
- Q:** caudal de la mina (m^3/s).

La relación cuadrática **$p = RQ^2$** es la más importante en ventilación, **p** es, por lo tanto, la presión que necesita ejercer el ventilador para que el aire recorra toda la mina (circuito de ventilación), la cual depende de: el caudal (**Q**), que es la que requiere la operación minera para tener condiciones adecuadas para la operación, y de la resistencia (**R**), que es la encargada de hacer que el circuito mueva el aire por las galerías o infraestructura subterránea.

3.4 VENTILACIÓN POR TIRO NATURAL

3.4.1 PRINCIPIOS

La ventilación natural o el “tiro natural” se debe a la diferencia de peso específico entre el aire entrante y el saliente; esta se produce cuando existe una energía capaz de lograr la creación de una corriente natural de aire. Dicha fuente de energía es el gradiente térmico que existe entre distintos puntos del circuito de ventilación, el cual se puede comprobar midiendo la temperatura en diferentes lugares de la mina y observando que el aire fluya de las áreas donde la temperatura es mayor (donde hay mayor energía térmica) hacia las de menor temperatura. Este fenómeno es igual al que ocurre en una chimenea, en la que el aire caliente desplaza al aire frío que se encuentra por encima de este.

La ventilación natural depende de:



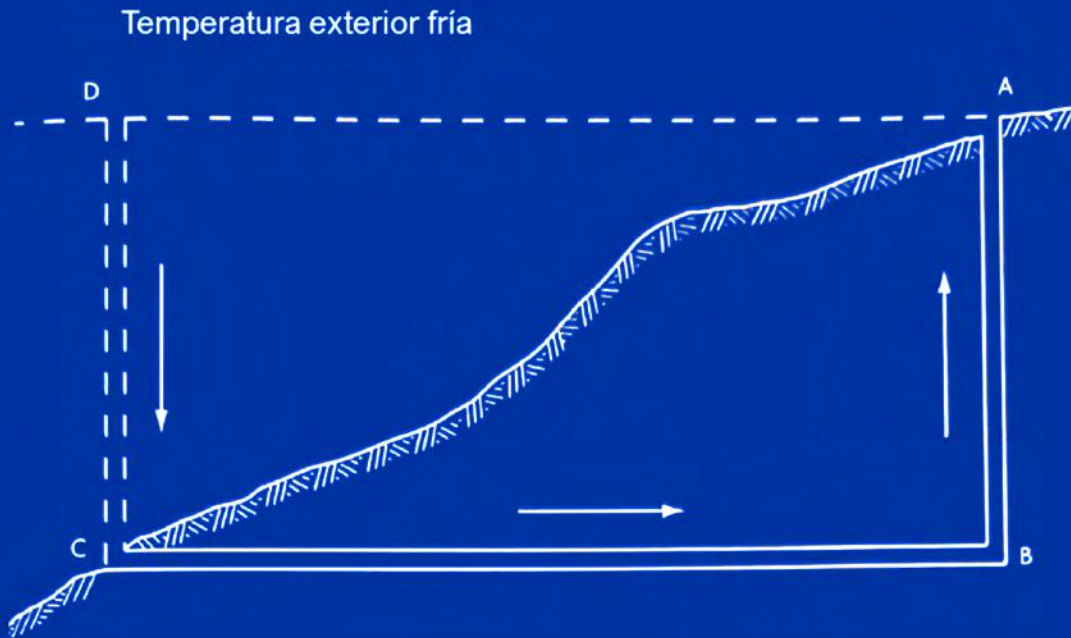
Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la labor.



En menor grado, la diferencia de presión.



En menor grado aún la variación de humedad y de composición del aire.



Gráfica 13. Sentido del tiro natural cuando la temperatura exterior es menor. [AITEMIN, 2011]

Por ejemplo, en una mina en la cual el aire exterior es más frío (en la madrugada o en invierno en países con estaciones), la columna de aire en el pozo AB se calienta debido al calor del depósito minero y los procesos de oxidación, y se hace más ligera que la columna de aire frío CD de la bocamina en C; es decir, se produce tiro natural de sentido CBA. Por el contrario, en verano o en países tropicales en horas del día en el que la temperatura exterior es más caliente, el sentido de la corriente es inverso.



3.4.2 CÁLCULO DEL TIRO NATURAL

- La siguiente es una ecuación que se usa para el cálculo de la “fuerza automotriz natural” o el “ tiro natural”, el cual viene dado por la diferencia de peso de las columnas de aire entrante y saliente.

$$h_n = \frac{13,6p\Delta h}{29,27} = \left[\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_s} \right]$$

Ecuación 17. Presión ejercida por el tiro natural.

Donde,

h_n : tiro natural (mmca).
 T_e : temperatura de entrada (K).
 T_s : temperatura de salida (K)
 Δh : diferencia de altura de entrada y salida de aire en la mina (m).
 P : presión barométrica (mmHg).

- Cuando $h > 100$ m, hay que multiplicar h_n por un coeficiente de corrección $(1 + h/10.0000)$.
- La depresión total de la mina es $h_t = h_v \pm h_n$
Donde h_v es la caída de presión de la mina hallada con la relación cuadrática y expresada en presión de cabeza.

Ejercicio:

Calcule la presión por tiro natural para los puntos C y A de la Gráfica 13, para lo cual se tiene la siguiente información: $h_A = 1.250$ msnm, $h_C = 1.150$ msnm, $T_A = 230^\circ\text{C}$, $T_C = 270^\circ\text{C}$.

Solución:

utilizamos la Ecuación 16

$$p_n = \frac{13,6 \times 652,8 \times 100}{29,27} = \left[\frac{1}{296} - \frac{1}{300} \right] = 1,37 \text{ mmca}$$

- Dado que la mina se encuentra a una altitud mayor a 100 se debe utilizar el factor de corrección, h es la media de la altura de los puntos A y C.

$$p_n (\text{ajustado}) = 1,37 \text{ mmca} \times \left[1 + \frac{1.200}{10.000} \right] = 1,53 \text{ mmca}$$

Respuesta:

el tiro natural producido es de 1,53 mmca, como es positivo quiere decir que la dirección del flujo va en el sentido CBA, esta presión equivale a 15 Pa. Este resultado nos muestra que, si bien la presión ejercida por el tiro natural puede aportar a suministrar el caudal requerido para la mina, su contribución no es suficiente para los requerimientos de esta, ya que se requieren usualmente presiones entre 300 a 10.000 Pa; por lo cual es indispensable la ventilación forzada. Además, el tiro natural es cambiante.



4. CÁLCULOS DE LA VENTILACIÓN

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar los elementos para el cálculo de la red de ventilación de la mina.
- Conocer los factores que influyen en el cálculo de la resistencia de una galería y cómo ello tiene una relación directa con el cálculo de la potencia del ventilador y los costos.
- Estudiar las variables y la metodología para el cálculo de caudales.



4.1 ELEMENTOS EN EL CÁLCULO DE LA RED DE VENTILACIÓN

Para calcular una red de ventilación, es decir, el reparto de caudales en todas sus labores de tal forma que garanticen el cumplimiento de los objetivos de esta, se deben considerar los siguientes elementos claves:

1

Las resistencias de las diferentes labores.

2

Los caudales necesarios en las labores más importantes: frentes de explotación, tambores, labores recorridas por equipos, entre otras. Estos caudales parciales son necesarios para comprobar que, una vez efectuado el reparto, los valores calculados superan los necesarios para el trabajo en esas labores.

3

El caudal de aire total necesario en la mina.

4

Plano de la red de ventilación.

En las siguientes secciones se presentarán los elementos más importantes para el cálculo de las resistencias y la determinación de caudales requeridos.

4.2 CÁLCULO DE RESISTENCIAS

El costo de pasar cualquier flujo de aire a través de una galería depende de la resistencia de esta. Entonces, como el costo de operación total de un circuito es la suma de los costos de las vías individuales, es importante identificar los factores que influyen en la resistencia, los cuales serán examinados en esta sección. Además, en la sección 5.5 se explicará el cálculo de resistencias y caudales para circuitos en serie y en paralelo.

4.2.1 EXPRESIÓN GENERAL DE LA RESISTENCIA DE UNA GALERÍA

La resistencia de ventilación de una galería se compone de la suma de: la resistencia general de la labor, debida al **rozamiento** del aire con las paredes y el suelo; las resistencias adicionales, debidas a los **obstáculos** ubicados en su interior; y las resistencias locales, debidas a la **variación de su forma**. La fórmula general de la resistencia general de ventilación de una galería es:

$$R = \lambda \gamma \frac{PL}{8gS^3} = 0,153\lambda \frac{PL}{S^3}$$

Donde,

R:	resistencia $\left(\frac{NS^2}{m^8}\right)$
γ:	peso específico del aire (12,015 N/m ³).
λ:	coeficiente de rozamiento.
V:	velocidad del aire (m/s).
P:	perímetro de la labor (m).
L:	longitud de la labor (m).
S:	sección transversal de la labor (m ²).

De esta expresión puede evidenciarse que una de las variables que más pesa en la resistencia es la sección transversal de la vía de ventilación o del ducto, por lo cual si el objetivo es reducir la resistencia a la cual fluye el aire, se debe considerar la sección de la vía y del ducto de ventilación lo más amplio posible.

El manual de ventilación de la Asociación para La Investigación y Desarrollo Industrial de Los Recursos Naturales (AITEMIN) y otros manuales, contienen tablas con valores para el λ tanto de las paredes con diferentes tipos de sostenimiento, revestimiento y características, como para diferentes tipos de piso. También, incluyen fórmulas detalladas y coeficientes para calcular la resistencia debida a obstáculos y cambios de forma.

Sin embargo, en esta guía solo se presentarán los elementos principales en el cálculo de las resistencias y se invita a consultar las tablas de referencia.

4.2.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

El coeficiente de rozamiento de una galería se obtiene por la expresión:

$$\lambda = 0,7\lambda_p + 0,3\lambda_s$$

Ecuación 18. Coeficiente de rozamiento de una galería.

Donde,

λ_p:	coeficiente de rozamiento del aire con las paredes.
λ_s:	coeficiente de rozamiento del aire con el suelo.

Si una galería, manteniendo la misma sección recta, tiene distintos revestimientos en distintas longitudes, el valor de rozamiento con las paredes vendría dado por la expresión:

$$\lambda_p = (\lambda_{p1} l_1 + \lambda_{p2} l_2 + \lambda_{p3} l_3) / (l_1 + l_2 + l_3)$$

Ecuación 19. Coeficiente de rozamiento para longitudes con diferentes revestimientos

4.2.3 RESISTENCIA DEBIDA A OBSTÁCULOS

En una galería de resistencia R_g , existen diversos materiales, tales como tuberías, transportadoras y trenes, estos elementos introducen resistencias suplementarias R_1, R_2, R_n . Por lo tanto, la resistencia total será la suma de estas:

$$R = R_g + R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n$$

Estos obstáculos tienen resistencias características, que se pueden agrupar en tres tipos para un tratamiento diferenciado:

Obstáculos lineales:

son instalaciones fijas que se ubican a lo largo de la labor y su resistencia tiene que integrarse a la resistencia general.

Obstáculos puntuales:

son aquellos fijos o móviles con un valor determinado que se suman individualmente a la resistencia general de la labor.

Obstáculos largos:

son aquellos fijos o móviles ubicados en el interior de la labor que obligan a calcular la resistencia en dos tramos, uno sin el obstáculo largo y el otro con la longitud de este. En este tramo dicho obstáculo se trata como un obstáculo lineal en su longitud más una resistencia como obstáculo puntual.

4.2.4 RESISTENCIA POR MODIFICACIONES DE FORMA

Existe una resistencia adicional al paso de aire que se debe a los puntos singulares, tales como estrechamiento, ensanchamiento brusco, cambios de dirección pronunciados, entre otros; la cual se calcula de la siguiente manera:

$$R = 0,61 \frac{\epsilon}{S^2}$$

Ecuación 20. Resistencia por modificaciones de forma.

Donde,

- R:** resistencia en $\left(\frac{NS^2}{m^8}\right)$
- ϵ :** coeficiente de pérdida de carga singular.
- S:** sección transversal de la galería (m^2).

4.3 CÁLCULO DE CAUDALES

4.3.1 IDENTIFICAR NECESIDADES

El objetivo de este cálculo es determinar los caudales necesarios que deben llegar a los diferentes lugares de la mina, como frentes de explotación, niveles de transporte, nichos de seguridad, entre otros; para lograr diluir los gases explosivos y tóxicos y garantizar el oxígeno a los trabajadores. Para esto, se debe considerar lo siguiente:

1

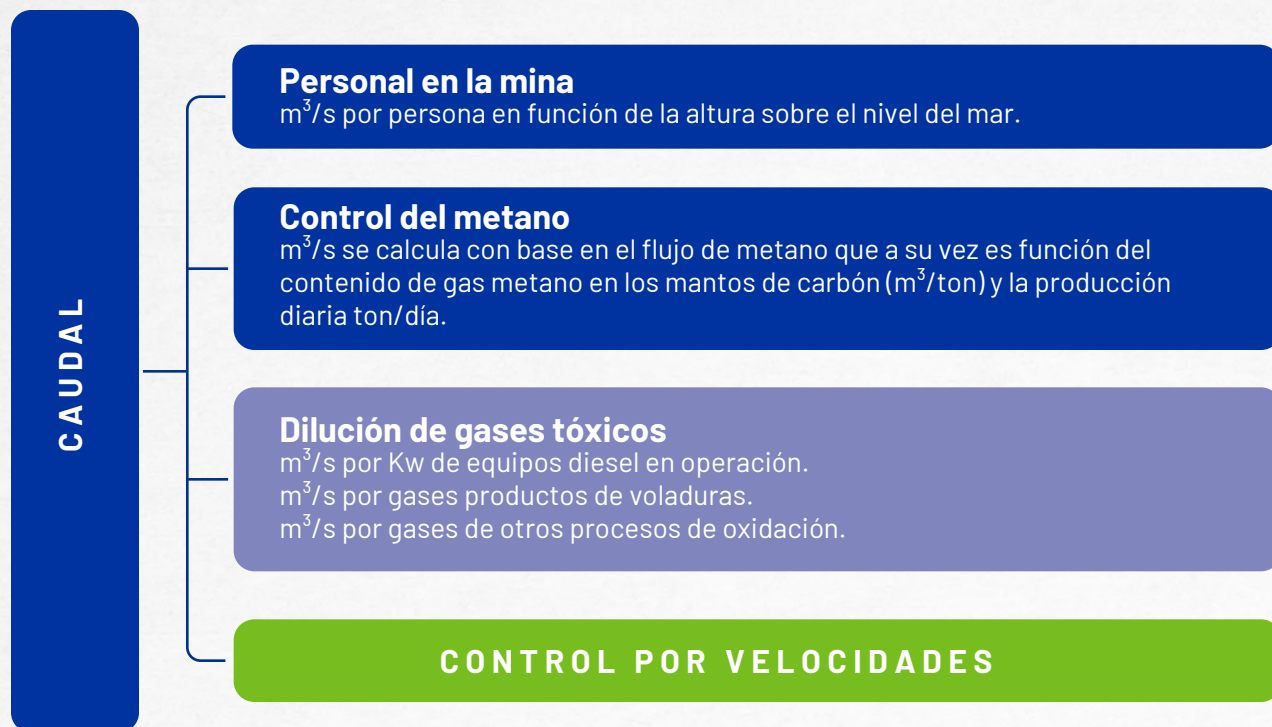
El cálculo del caudal debe comenzar por cuantificar las necesidades en los frentes de explotación y, posteriormente, en otras labores.

2

Se debe determinar el caudal necesario en base al número de personas, a las emisiones de metano, los gases producidos por los equipos diésel, la dilución de gases de otros procesos de oxidación y el consumo de explosivos.

3

El caudal final no es solo una suma algebraica, deben tenerse en cuenta los coeficientes de reparto y un factor recomendado del 30% debido a las fugas.



4.3.2 CAUDAL POR NÚMERO DE PERSONAS

Para dicho cálculo es necesario que estén incluidos no solo los colaboradores regulares en el turno de mayor personal, sino todas las personas que podrían ingresar bajo tierra, como: personal de los frentes de preparación y desarrollo, tajos, cocheros, supervisores, personal de topografía y geología, visitantes, entre otros.

$$Q_n = F \times N$$

Ecuación 21. Caudal por número de personas

Donde,

- Q_n:** caudal total para "N" personas (m³/s).
- N:** número de trabajadores del turno más numeroso.
- F:** caudal mínimo por colaborador.

El artículo 54 del Decreto 1886 de 2015, establece los siguientes valores para F:



- Para minas a menos de **1500 msnm 3 m³/min** (0,05 m³/s) por trabajador.
- Para minas a más de **1500 msnm 6 m³/min** (0,1 m³/s) por trabajador.

4.3.3 CAUDAL PARA DILUCIÓN DEL METANO

Para realizar el cálculo del caudal es importante tener claro los conceptos de liberación y de estratificación del gas y el flujo metano, los cuales se describe a continuación:

1

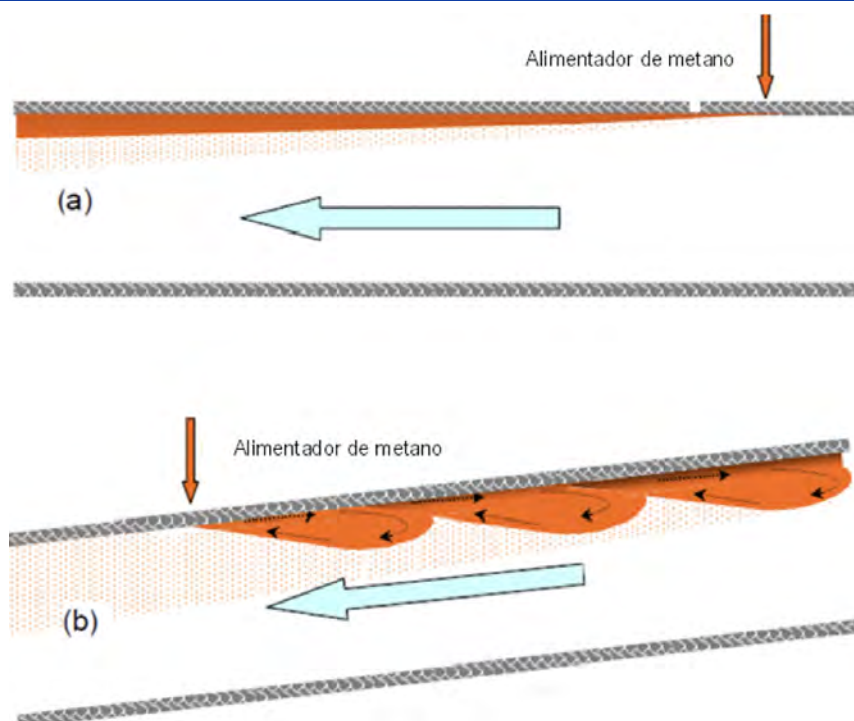
Liberación del gas metano en los mantos de carbón:

como se explicó previamente, el metano se presenta en el carbón de dos formas: gas libre y gas absorbido (95 %). Cuando el manto de carbón es interceptado o perturbado por los trabajos mineros, el gradiente de presión que se crea va a resultar en el flujo a través de fracturas naturales o inducidas. Es decir que, **así la mina no esté siendo explotada, el metano está continuamente liberándose**, y las emisiones más altas serán en el arranque, tanto en explotaciones por cámaras y pilares como en el tajo largo. Sin embargo, en los tajos las emisiones son mucho más altas debido a la rápida fragmentación cuando se usa rozadora.

2

Estratificación del gas:

el metano emitido desde el manto tiene concentraciones que van del 90 % al 99 %. El gas se estratificará en el techo debido a tener la mitad de la densidad del aire, sin embargo, aunque la velocidad de este sea cero, el gas terminará mezclándose con el aire de la mina debido a que por gradiente de concentraciones migrará de las más altas a las menores. En consecuencia, mientras el metano se diluye, pasará por concentraciones entre el 15 % y el 5 %, (rango de explosividad del gas) por lo que **la ventilación debe proveer velocidades turbulentas para reducir el tiempo en el cual el metano pasa por atmósferas explosivas.**



Gráfica 14. Capas de metano: a) Un nivel de la vía aérea, b) Una vía aérea con ventilación descendente
[McPherson M. J., 2012]

- Teniendo claro estos conceptos, se propone la siguiente metodología para determinar el caudal de aire necesario en la mina para la dilución del metano:

1

Determinar el flujo de gas metano Q_g

- Las emisiones de gas dependen básicamente de las siguientes cuatro variables:

1

Contenido de gas en el manto.

⋮

2

El grado de desgasificación.

⋮

3

La tasa de extracción del gas.

⋮

4

La difusividad del carbón.

- Para lo cual, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Q_g = Q_0 + w (A - B)$$

Ecuación 22. Flujo de gas metano.

Donde,

- Q_g : flujo total del gas metano en (m³/min).
 Q_0 : flujo de metano emitido cuando no se hace minería (m³/min).
 w : tasa promedio de producción (t/min).
 A : contenido de gas metano antes de la desgasificación, m³/t.
 B : contenido de gas metano después de la desgasificación, si la hubo m³/t.

- Método opcional para calcular el flujo de metano cuando no se hace minería: Q_0 a partir de las concentraciones medias de gas metano, medidas en días en los que no se explota carbón.

$$\text{Concentración de metano} = \frac{\text{Caudal metano}}{\text{Caudal metano} + \text{Caudal Aire}}$$

Ecuación 23. Relación de dilución de los gases.

2

Determinación de la velocidad mínima de ventilación para cada frente de explotación (v) para prevenir la estratificación del gas

- La estratificación del gas depende del flujo de metano, la velocidad de la ventilación y el ancho de la vía de aire. El número de capa L es un número adimensional que relaciona las anteriores tres variables mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{v}{1,64} \left(\frac{D}{Q_g} \right)^{1/3}$$

Ecuación 24. Número de capa L.

Donde,

Q_g : tasa de emisión del metano en m³/s.
 v : velocidad de la ventilación en m/s.
 D : ancho efectivo de la vía de ventilación (m).

- Un valor mínimo de **5** se considera necesario para prevenir la estratificación del gas. Por lo tanto, a partir del número de capa se puede encontrar la velocidad. Si se obtienen velocidades muy altas, puede considerarse aumentar el diámetro de la vía o la construcción de vías paralelas.

3

Cálculo del caudal para cada frente de explotación de la mina

Utilizando la relación de la ecuación de continuidad se obtiene que $Q = vA$ y se determina el caudal Q_i para cada frente de trabajo o tajo largo.

4

Caudal para dilución del metano para todos los frentes de trabajo

El caudal total es la suma de los caudales Q_i calculados para cada frente de trabajo o tajo, dado que el aire no se reparte en los frentes de explotación según sus necesidades, se sobredimensiona el caudal con un coeficiente de reparto de 1,25.

$$Q_{CH_4} = 1,25 \sum Q_i$$

Ecuación 25. Caudal para dilución del metano para toda la mina.

Donde,

Q_{CH_4} : caudal total para la dilución del metano en la mina (m³/s).
 Q_i : caudal para dilución del metano en cada frente i de explotación (m³/s).

5

Caudal de aire que atraviesa los ventiladores

Debe tenerse en cuenta las fugas de caudal en puertas y otros, por lo que el caudal que debe atravesar los ventiladores Q_v es:

$$Q_v = 1,3Q_{CH_4}$$

4.3.4 CAUDAL PARA DILUCIÓN DE GASES TÓXICOS

Las dos principales fuentes de gases tóxicos en una mina son los gases que pueden generarse en la combustión de equipos diésel en operación y los que se generan producto de una voladura. Para calcular el caudal en estos casos, es necesario tener en cuenta la situación de cada mina.

5.3.4.1 CAUDAL POR EQUIPOS

Se realiza con base a los caballos de fuerza (HP) de equipos en operación.

$$Q_{HP} = C \times HP \times D_m \times F_u$$

Ecuación 26. Caudal requerido por HP de equipos diésel en operación.

Donde,

- Q_{HP} : caudal de aire necesario por equipo diésel en operación (m³/min).
- C : caudal mínimo (m³/min) de aire por HP.
- HP : capacidad efectiva de potencia (HPs).
- D_m : disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%).
- F_u : factor de utilización promedio de los equipos (%).

*De acuerdo con el párrafo 2 del artículo 54 del Decreto 1886 de 2015, se considera:

- 6 m³/min por cada H.P de la máquina, cuando el contenido de CO en los gases del exosto no sea superior a 0,12%.
- 4 m³/min por cada H. P. de la máquina cuando el contenido de CO en los gases del exosto no sea superior de 0,08%.

5.3.4.2 CAUDAL POR EXPLOSIVOS

Se utiliza la expresión de la Ecuación 27:

$$Q_E = \frac{G \times E}{T \times F}$$

Ecuación 27. Caudal requerido para diluir gases producidos por voladuras.

Donde,

- G:** formación de gases (m³).
- E:** cantidad de explosivo a detonar (kg).
- T:** tiempo de dilución (min), generalmente no es mayor a 30 min.
- F:** % de dilución de los gases en la atmósfera (según VLP establecidos en el artículo 39 del Decreto 1886 de 2015).

Gas	CO ₂	N ₂	CO	NO _x	Vapor de H ₂ O	Volumen total
l	80	239,9	17	3	560	899,9
m³	0,08	0,40	0,24	0,003	0,56	0,90

Tabla 14. Volumen de gases generados por 1 kg de ANFO.

4.3.5 ESTÁNDAR DE EFICIENCIA DE VENTILACIÓN VOLUMÉTRICA

Un chequeo final de la estimación del caudal de aire se hace por medio del estándar de eficiencia en la ventilación volumétrica, el cual, para un buen sistema de ventilación en minería de carbón, debería estar entre el 45 % y el 50 %. Este se define mediante la siguiente formula:

$$\text{Eficiencia de ventilación volumetrica (EVV)} = \frac{\text{Caudal requerido (Qr)}}{\text{Caudal suministrado (Qs)}}$$

Ejemplo

Se definió como el caudal requerido para una mina un valor de 80 m³/s, si se asume una eficiencia en la ventilación del 50 %, la capacidad total de los ventiladores debería ser aproximadamente de 160 m³/s.

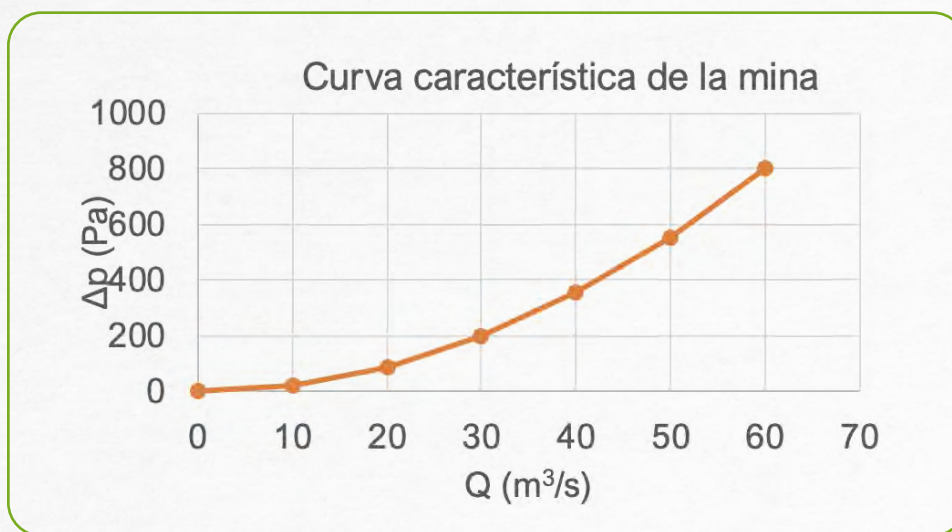
4.3.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA MINA

Para obtener el punto de operación que necesita la mina se construye la curva característica, la cual presenta en el eje "y" la presión requerida para cantidades de caudal diferentes. Esta curva se construye con la relación cuadrática $p = R \times Q^2$

Ejemplo

Una mina requiere ser ventilada con 30 m³/s y tiene una resistencia de 0,222 N s²/m⁸. Calcule y dibuje la curva característica de la mina.

Solución



Gráfica 15. Ejemplo de la curva característica de una mina

4.3.7 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE UN VENTILADOR

Para calcular las características del ventilador a utilizar en una operación minera subterránea, hay dos factores relevantes: la potencia para poder mover la corriente de aire y el caudal que necesita que el ventilador inyecte o succione dependiendo de los requerimientos de la mina. La potencia bien dada se expresa así:

$$\text{Pot} = \frac{p \times Q}{\eta}$$

Ecuación 28. Potencia del ventilador.

Donde,

Pot: potencia (W).
p: presión en pascales (Pa).
Q: caudal (m³/s).
"η": eficiencia del ventilador (0 a 1).

Dado que $p = R \times Q^2$ y a su vez resistencia: $R = \lambda \gamma \frac{PL}{8gS^3}$

Por lo tanto, la potencia disipada en una vía y, en consecuencia, el costo de la ventilación depende de:

1

La geometría y rugosidad de la vía.

.....

2

La densidad del aire prevalente.

.....

3

El caudal al cubo.

La potencia no es el único parámetro importante en la selección del ventilador, debe tenerse en cuenta también el diámetro del rotor, el número de polos, entre otros aspectos.

Ejemplo

Continuando con el ejemplo de la sección 5.3.6, se tenía $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ y $\Delta p = 200 \text{ Pa}$, entonces la potencia del ventilador con una eficiencia del 75 % sería:

$$\text{Pot} = \frac{30 \times 200}{0,75} = 8 \text{ kW}$$





5. DISEÑO DE LOS ESQUEMAS Y CIRCUITOS DE VENTILACIÓN

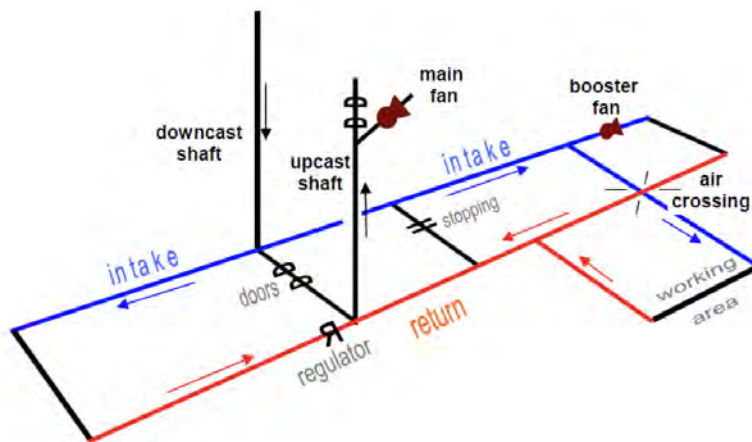
OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Presentar la introducción de algunos términos en la ingeniería de ventilación.
- Discutir los principios en el diseño de los esquemas de ventilación.
- Precisar los principios en el cálculo y abordar los elementos en el diseño del circuito de ventilación.

5.2 PRINCIPIOS GENERALES

5.2.1 TÉRMINOS EN LA INGENIERÍA DE LA VENTILACIÓN

En la Gráfica 15 se presentan los principales elementos de un sistema de ventilación en una mina subterránea, elementos con los cuales se debe estar familiarizado. Se proporcionan también algunas definiciones y en el capítulo 6 se explicará de manera más completa el tema de ventiladores.



- **Intake:** entrada de aire.
- **Return:** retorno de aire.
- **Downcast shaft:** inclinados.
- **Upcast shaft:** chimeneas o pozos de retorno.
- **Main fan:** ventilador principal.
- **Booster fan:** ventilador auxiliar.
- **Working area:** zona de trabajo.
- **Regulator:** regulador.
- **Stoppings:** sellos.
- **Doors:** puertas.

Gráfica 16. Principales elementos en un sistema de ventilación subterránea. Fuente: McPherson M. J. (2012).



VENTILADORES:

un ventilador es una máquina rotatoria que expulsa aire en forma continua y puede ser aspirante, como el de la Gráfica 15, o soplante. En minería de carbón se recomienda instalarlos en superficies para protegerlos en el evento de una explosión o un incendio.

PUERTAS:

son necesarias cuando debe mantenerse disponible el acceso y el retorno de la entrada del aire en zonas donde se ha redireccionado el flujo de este. Se diferencian por: su función, en paso de trenes, monorraíles y cintas transportadoras; su disposición, de una o doble batiente y corredera; su ubicación, en pozos de extracción, transversales, entre otros; y su accionamiento manual o automático.

REGULADORES:

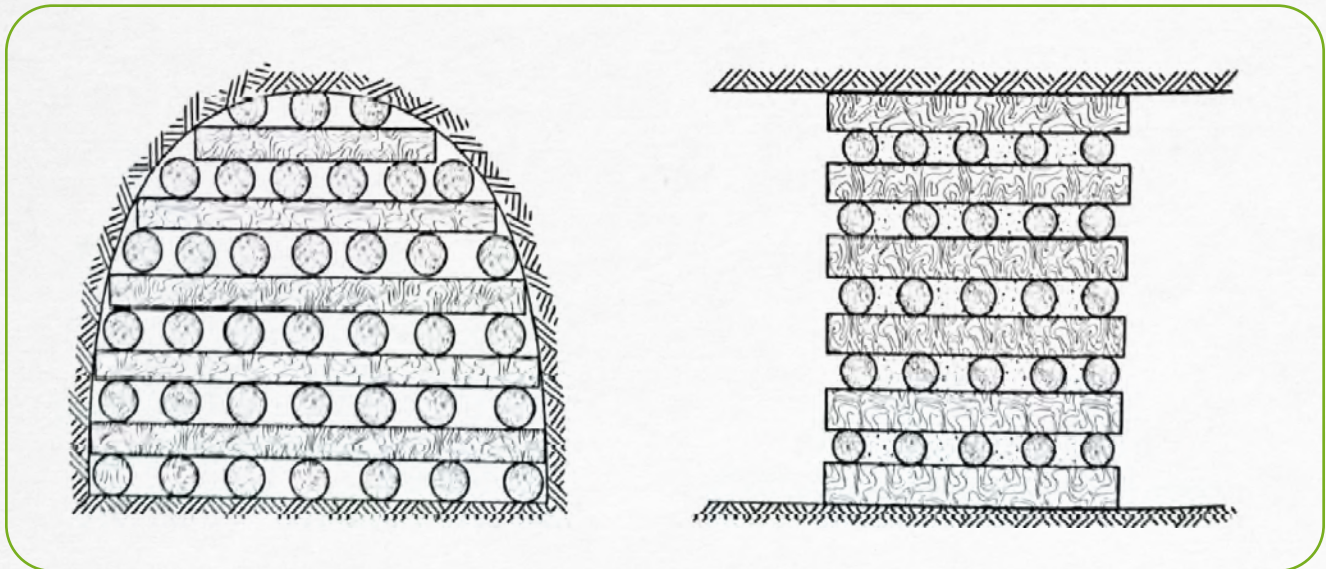
un regulador pasivo es simplemente una puerta fijada con uno o más orificios ajustables, su propósito es reducir el caudal a una vía de la mina. Un ejemplo son los orificios rectangulares cortados en las puertas y parcialmente cerrados por un panel corredizo.

TABIQUES Y SELLOS:

tienen la función de aislar el circuito de ventilación y evitar pérdidas o cortocircuitos de aire, para resistir la explosión de una atmósfera inflamable generada en la zona tabicada. Se pueden construir en mampostería, madera con arcilla o espuma, morteros de cemento o cenizas de central térmica.

Ejemplo

cierre de labores con tabique y sellos de madera con arcilla.



Gráfica 17. Cierre de labores con troncos de madera y arcilla.
Fuente, AITEMIN, 2011.



FUNCIÓN:

aislar el circuito de ventilación y evitar pérdidas de aire.
Bien ejecutado puede resistir fuegos y una explosión.



MATERIALES:

madera vieja y arcilla o espuma.



DESCRIPCIÓN:

los troncos de madera apilados se colocan por capas de piezas de 15 a 20 cm de diámetro y al menos un metro de largo. Entre cada capa se coloca un lecho de arcilla, con mínimo 30 % de arena para protección contra el agrietamiento, y cuñas de igual largo. Finalmente, se reviste el frente con arcilla o mortero.

5.2.2 NORMAS INEXORABLES EN EL DISEÑO DEL ESQUEMA DE VENTILACIÓN

1

Todas las labores subterráneas accesibles deben estar recorridas por una corriente regular de aire, la cual debe ser suficiente y estar en armonía con las condiciones de trabajo y de la mina.

2

El aire exterior de la mina estará exento de gases, vapores y polvos nocivos o peligrosos.

3

Toda mina deberá tener un ingreso y una salida de aire independientes. Solo en casos excepcionales y en labores de preparación, la entrada y la salida del aire podrán hacerse por la misma galería.

4

Toda mina subterránea tendrá, por lo menos, dos salidas o rutas de evacuación independientes a la superficie, que serán debidamente acondicionadas y accesibles en todo momento a las personas.

5

Ninguna mina puede depender solo de ventilación natural, es indispensable la instalación de un ventilador principal y de ventilación secundaria o auxiliar.

5.3 CRITERIOS EN EL DISEÑO DE LAS VÍAS PRINCIPALES DE VENTILACIÓN

5.3.1 RESISTENCIA DE LA MINA

El costo de la ventilación es directamente proporcional a la resistencia de la mina y al flujo del aire, a su vez, la resistencia depende de

- El tamaño de las vías, la resistencia disminuye significativamente con el aumento de la sección
- El número de obstáculos, los cuales añaden resistencias adicionales, por lo cual es apropiado mantener las vías despejadas
- El tamaño de las vías, la resistencia disminuye significativamente con el aumento de la sección

Por lo cual, estos principios deben ser tenidos en cuenta si se quiere reducir costos y, sobre todo, garantizar que a las diferentes labores mineras llegue el caudal de aire necesario.

5.3.2 DISTANCIA PARA INGRESO Y SALIDA DEL AIRE

Para disminuir costos, es conveniente reducir la distancia que debe recorrer el aire en el retorno. Para ello, se puede direccionar por trabajos viejos, sin embargo, deben tomarse las siguientes precauciones:

- Hacer siempre mantenimiento a las vías de ingreso y retorno del aire por seguridad, evitando cierres súbitos por caída de rocas.
- No direccionar el aire en sitios con tendencia a combustión espontánea.

5.3.3 CONTROL DE FUGAS

Para conseguir una correcta conducción del aire hacia los lugares de trabajo, es preciso evitar fugas y circuitos parásitos. Las labores inactivas temporalmente, que no se utilicen para la circulación de personal y no estén ventiladas, se señalizarán con dos postes cruzados en su entrada y un letrero visible que advierta al personal de la prohibición de acceso. Las labores abandonadas se aislarán herméticamente cuando puedan acumularse en ellas gases peligrosos o producirse atmósferas irrespirables. El tipo de cierre depende de lo que se busque: aislar la labor evitando el paso, evitar fugas de aire, controlar fuegos endógenos o resistir una posible explosión de gases acumulados tras el tabique.

Una forma de controlar las fugas es midiendo la eficiencia volumétrica en la ventilación, la cual viene determinada por la siguiente relación:

$$VE = \frac{\text{Caudal de aire empleado}}{\text{total de caudal a través del ventilador}} \times 100$$

El caudal de aire empleado corresponde a la suma de los caudales alcanzados en todos los sitios que requieren ser recorridos por una corriente de aire, por lo tanto, los valores más altos de VE significan menos fugas. Para disminuirlas es indispensable mantener las puertas, los sellos y los tabiques en buen estado.



5.3.4 DIRECCIÓN DEL FLUJO DEL AIRE

Las siguientes son las dos consideraciones que se deben tener presentes con respecto al flujo del aire:

1

Dirección con respecto al transporte del mineral explotado:

- **Antitropical:**

la dirección del aire y el mineral son opuestas. Se asocia con la ventilación aspirante. Lo que implica el transporte del mineral en la vía de ingreso del aire.

- **Homotropical:**

la dirección del aire y el mineral es la misma. Lo que implica el transporte del mineral en la vía de retorno del aire. Se asocia con la ventilación soplante y tiene una ventaja en cuanto al transportar el mineral, ya que la polución de este no pasa a la corriente de aire.

2

Dirección con respecto a la inclinación de la vía aérea:

- **Sistema de ventilación ascendente:**

la corriente de aire se mueve hacia arriba a través de planos inclinados. Esta favorece la ventilación natural y la difusión del grisú, ya que se desplaza en el mismo sentido.

- **Ventilación descendente:**

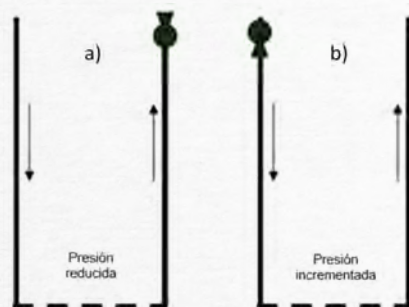
la corriente de aire se mueve hacia abajo. Esta tiene la ventaja de tener un efecto estabilizador en caso de fuego.

5.4 ¿VENTILACIÓN SOPLANTE O ASPIRANTE?

La primera decisión que se debe tener en cuenta en el diseño de la infraestructura de la ventilación, no es si los ventiladores principales se ubicarán bajo tierra o en superficie, sino el tipo de presión que ejercerán: aspirante o soplante. Por lo tanto, se indicarán cuatro criterios que deben considerarse en la decisión:

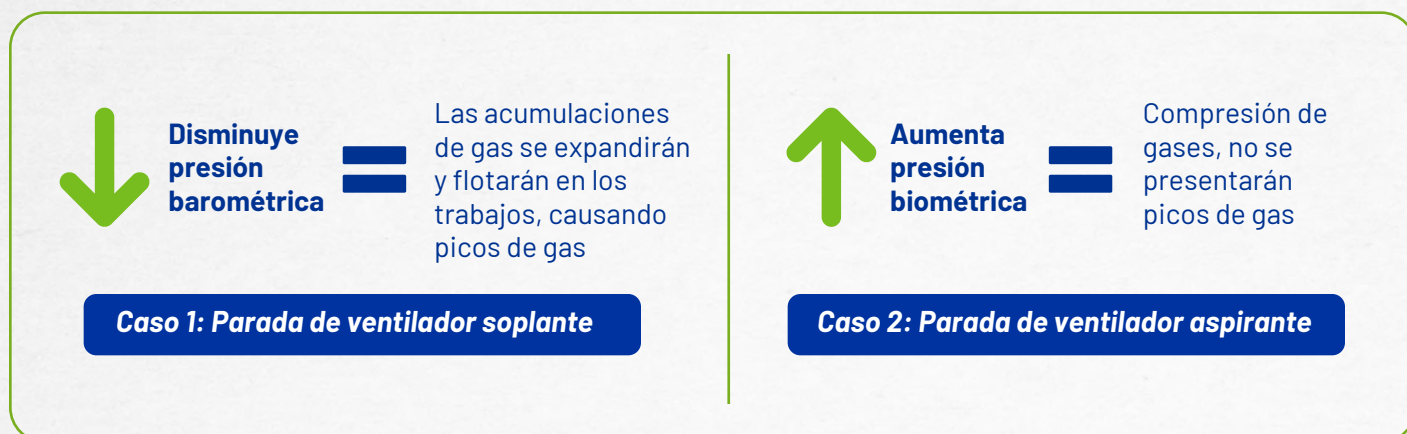
1

Control de gases: La operación de un ventilador aspirante crea una depresión en la mina y la operación de un sistema soplante crea un incremento de la presión, como se ilustra en la Gráfica 18. En la operación normal tanto del ventilador soplante como del aspirante, no se producen cambios significativos en la presión, sin embargo, en caso de llegar a pararse uno de estos, se presentarán situaciones diferentes que afectan el control de los gases; en la Gráfica 19 se ilustra lo que ocurre en cada caso.



Gráfica 18. Tipo de presión en los ventiladores principales.

a) Sistema aspirante.
b) Sistema soplante.



Gráfica 19. Cambios en la parada de un ventilador soplante y aspirante.

2



Transporte: considerar las rutas preferidas para el transporte de mineral, personal y materiales, es indispensable. Una mina en la cual se diseñan las rutas de transporte del mineral en el ingreso del aire, le conviene un sistema aspirante.

3



Mantenimiento del ventilador: los ventiladores aspirantes sufrirán mayor corrosión y daños que los soplantes, dado que en los primeros pasará aire a mayor temperatura que llevará polvo y vapor de agua.

4



Desempeño del ventilador: un ventilador soplante conduce aire más frío y denso que uno aspirante, por lo tanto, para una misma masa, el flujo volumétrico será menor y en consecuencia se tendrá menos potencia (ahorro de energía). Sin embargo, este efecto no es tan significativo.

- Cuál considera que es la alternativa más conveniente para la ventilación en minas de carbón, ¿ventilación soplante o aspirante?

5.5 MEDIDAS ESPECIALES PARA LA VENTILACIÓN EN MINAS DE CARBÓN DE ACUERDO CON EL CONTENIDO DE METANO

Para controlar adecuadamente los flujos de metano en una mina de carbón, es necesario implementar medidas especiales de acuerdo con el contenido de gas metano en los mantos explotados, como se describe en la Tabla 15.

Categoría con respecto a la gasificación del manto		Levemente gasificado	Moderadamente gasificado	Altamente gasificado
Profundidad (m)		150 o menos	150 a 450	450 a 900
Contenido de gas (m ³ /ton)		2,8 o menos	2,8 a 8,5	8,5 a 20
MEDIDAS	Ventilación principal forzada.	X	X	X
	Un ventilador auxiliar en el retorno.	X	X	X
	Una vía para el retorno de la ventilación.		X	X
	Recomendable desgasificar con perforaciones horizontales desde el frente de explotación.		X	
	Indispensable desgasificar antes de comenzar a explotar con verticales desde superficie.			X

Tabla 15. Medidas especiales en la ventilación en minas de carbón, de acuerdo con el contenido de metano.

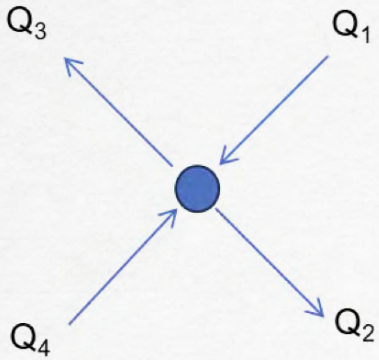
5.6 CIRCUITO DE VENTILACIÓN

Las formas como se encuentran interconectadas las galerías dentro de un circuito de ventilación, deciden la manera como se distribuye el caudal del aire dentro de ellas y cuál será la pérdida de presión del circuito. Es decir que por cada rama en el circuito de ventilación, es necesario conocer su **resistencia (R)**, su **caudal (Q)** y la **caída de presión (p)**.

La mayor o menor complicación en la resolución de un sistema de ventilación está estrechamente ligada a las conexiones de las galerías dentro de él, para ello existen softwares en el mercado que permiten, con gran facilidad, realizar dichos cálculos. Por eso, esta guía no se centrará en discutir los métodos de los cálculos, sino en los principios del reparto de caudales y cómo, a partir de estos, se calculan los caudales y las resistencias para circuitos en serie y en paralelo.

5.6.1 LEYES EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES Y LA DIFERENCIA DE PRESIÓN

Las leyes de Kirchhoff regulan la distribución de los caudales y la diferencia de presión en los circuitos:

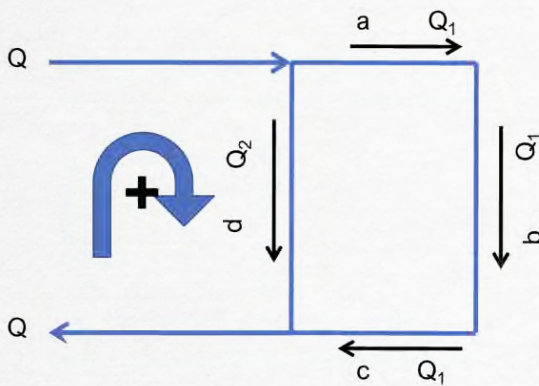


1) En cada punto de encuentro de conducciones o nodos, la suma de los caudales que salen es igual a la suma de los que afluyen.

$$Q_1 + Q_4 = Q_2 + Q_3$$

$$\sum Q_i = 0$$

Ecuación 29. Primera ley de Kirchhoff.



2) Si varios trayectos de ventilación constituyen un circuito cerrado, la suma de las diferencias de presión, medidas en cualquier trayecto, es igual a cero.

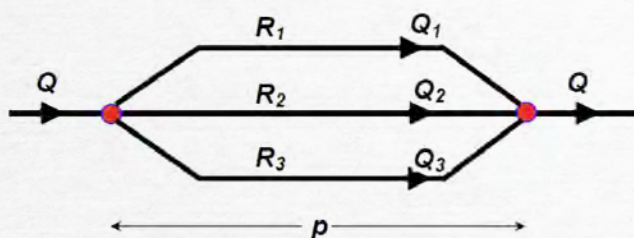
$$p_a + p_b + p_c + p_d = 0$$

$$\sum p_i = 0$$

Ecuación 30. Segunda ley de Kirchhoff.

5.6.2 REDES DE VENTILACIÓN EN PARALELO

De acuerdo con las dos leyes para circuitos con trayecto de ventilación en paralelo, el flujo de aire que se ramifica en un punto se une en otro.



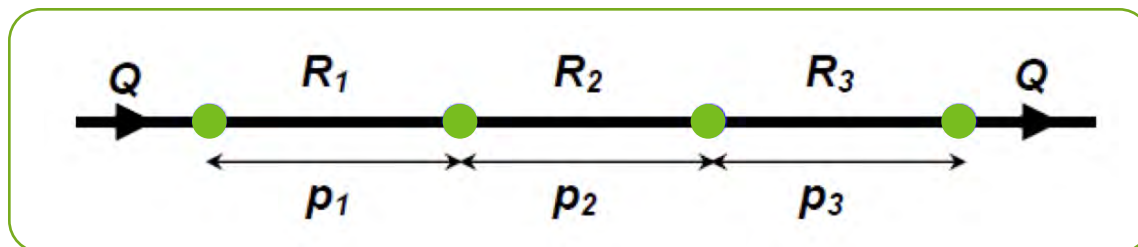
Gráfica 20. Redes de ventilación en paralelo

$$\sqrt{\frac{1}{2}} = \sum \sqrt{\frac{1}{R_i}} \quad Q_i = \sqrt{\frac{R}{R_i}} Q$$

Ecuación 31. Expresión para las resistencias y caudales en un circuito en paralelo

5.6.3 REDES DE VENTILACIÓN EN SERIE

Para circuitos de ventilación en serie, el flujo de aire que ingresa en un punto se mantiene a lo largo de una trayectoria única.



Gráfica 21. Redes de ventilación en serie

$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad R = \sum R_i$$

Ecuación 32. Expresión para las resistencias en un circuito en serie





6. VENTILACIÓN MECÁNICA

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Conocer los principios de funcionamiento de los ventiladores y sus componentes principales.
- Comprender el resultado de combinar configuraciones en serie o en paralelo.
- Revisar los fundamentos de la ventilación secundaria.

6.1 INTRODUCCIÓN

6.1.1 DEFINICIÓN

Un ventilador es un equipo que utiliza energía mecánica para que un impulsor giratorio produzca movimiento de aire y un incremento de su presión total. Es decir, es una máquina que transmite energía a un fluido (aire), produciendo el incremento de presión necesaria (presión total) para mantener un flujo continuo en este.

Preguntas de discusión

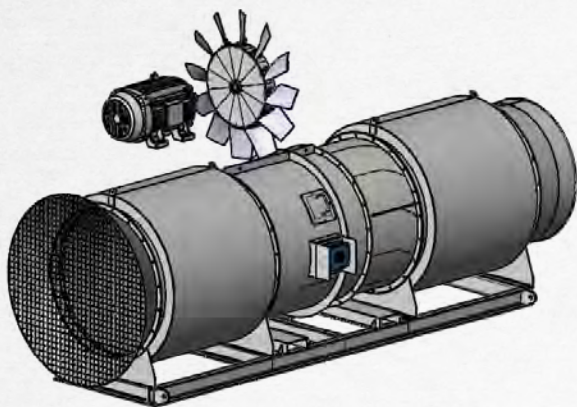
1

Identifique y compare los valores del caudal de ventilación y presión para alguna mina subterránea, con la cual tenga relación, y para el de alguna instalación industrial o centro comercial.

2

Compare las presiones de la mina con las que se puede obtener con ventilación por tiro natural.

En un ventilador el aire que pasa no varía su volumen, pero sí entrega energía en forma de presión, capaz de anular las pérdidas de presión de un circuito. Si se calcula un circuito donde pasa un caudal (**Q**) y tiene una caída de presión (**p**), se debe encontrar un ventilador capaz de mover este **caudal** a esa **presión**.



Gráfica 22. Componentes principales de un ventilador (por ejemplo, axial).

La parte activa de un ventilador está compuesta, esencialmente, por:

Carcasa:

envolvente que protege al rodete y al motor.

Rodete:

parte móvil del ventilador que se compone de álabes, cubo y soporte de estos.

Motor:

para minería de carbón se requiere que este esté encapsulado.

6.1.2 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

A continuación, se presentan cuatro criterios por los cuales se pueden clasificar los ventiladores:

Principio mecánico • Radiales o centrífugos. • Axiales. • De hélice.	Según su uso • Principales o de superficie. • Auxiliares o secundarios.	Fuente de energía • Eléctricos. • Neumáticos. • De motores de combustión interna.	Tipo de presión • Aspirante (succión). • Soplane (inyección).
--	--	---	--

6.2 FUNDAMENTOS DE LOS VENTILADORES

De acuerdo con la teoría y el diseño, los ventiladores más comunes son los axiales y los centrífugos, de los cuales se proporciona información básica sobre su diseño mecánico, criterios de selección y comparación.

6.2.1 VENTILADORES CENTRÍFUGOS

En los ventiladores radiales o centrífugos el aire abandona el impulsor en una dirección perpendicular respecto a su eje; el flujo de gas entra al centro del rotor o impulsor y es lanzado hacia afuera por las aspas giratorias, agregando energía cinética al flujo. El gas se recolecta en una voluta en la que esta energía se convierte en presión estática, que es suministrada al conjunto de ductos del sistema.

Los ventiladores centrífugos son los sistemas más utilizados en la ventilación industrial por sus características de generar altas caídas de presión con caudales bajos. En la Tabla 16 se explican algunas propiedades de tres tipos de ventiladores centrífugos:

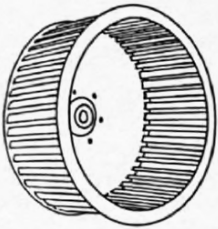
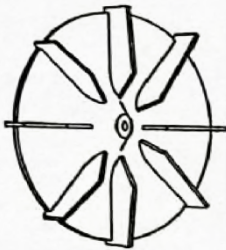
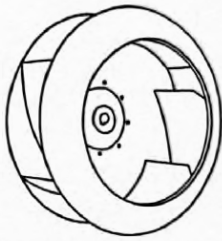
Tipo de ventilador	Rodete	Uso	Rendimiento	Imagen
1. Álabes curvados hacia adelante (de jaula o ardilla).	Tiene los álabes curvados en el mismo sentido que la dirección de giro.	Instalaciones donde la presión estática requerida es baja y en sistemas de calefacción. No es recomendable en aire polvoriento.	Rendimiento bajo y baja velocidad periférica.	
2. Radiales o de álabes rectos.	Tiene los álabes dispuestos en forma radial.	Instalaciones de extracción localizada, dado que la disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre los mismos.	Rendimiento medio y media velocidad periférica.	
3. Álabes inclinados o curvados hacia atrás.	Tiene los álabes inclinados en sentido contrario a la rotación.	Los de ala portante quedan limitados a aplicaciones en las que se manipule aire limpio. Los de álabes de espesor uniforme no deben emplearse en aire con sólidos.	Mayor rendimiento y mayor velocidad periférica.	

Tabla 16. Características de diferentes tipos de ventiladores centrífugos.

6.2.2 VENTILADORES AXIALES

En los ventiladores axiales la forma como el aire pasa se asemeja al principio de acción de un par tornillo/tuerca, es decir, el aire se mueve en paralelo al eje de rotación; se utilizan en aplicaciones en las que existe una baja resistencia (pérdida de presión), pero se requiere mover grandes caudales a bajas presiones, por tanto son los más frecuentes en minería. Estos están conformados por un rodete alojado en una envolvente cilíndrica o carcasa.

La parte activa de un ventilador es lo que se considera propiamente ventilador, en la Tabla 17 se describe el conjunto de esta parte y sus accesorios.

PARTE ACTIVA DEL VENTILADOR	
Carcasa	Pieza que envuelve, de manera independiente, al rodete y al motor del ventilador, la cual es construida normalmente con acero al carbono.
Rodete	Parte móvil del ventilador que se compone de álabes, cubo y soporte de esto; la cual tiene estos criterios: • Los álabes pueden ser regulables. • El incremento en el número de álabes aumenta la presión que genera el ventilador. • El aumento en el diámetro del rodete incrementa el caudal que entrega el ventilador.
Motor	• Para minería de carbón debe ser antideflagrante. • Tiene una vida útil mayor a 20.000 horas. • Debe ser resistente a temperaturas, mínimo entre -20 °C y 40 °C. • Debe estar instalado, preferiblemente, en la parte activa y no accionado por el eje de cardán, dado que ello requerirá más
ACCESORIOS PRINCIPALES DEL VENTILADOR	
Difusor	Elemento que se acopla a la descarga del ventilador para desacelerar el caudal de aire en la salida de la parte activa, con el fin de reducir la presión dinámica, que es una pérdida de energía.
Conexión al circuito	Puede ser mediante un codo o conexión a una pared.
Rejilla	Protege el rodete de la entrada de elementos no deseados.

Tabla 17. Parte activa y accesorios de un ventilador axial.

2.6.3 DIFERENCIAS ENTRE LOS VENTILADORES CENTRÍFUGOS Y AXIALES

En general, en minería subterránea se prefieren los ventiladores axiales con respecto a los centrífugos por dos razones puntuales. La primera, es que en una mina normalmente hay requerimientos altos de caudal para poder diluir los gases generados en la explotación, sin embargo, las resistencias al flujo del aire son relativamente bajas; caso contrario de una instalación industrial, en la que, generalmente, se tiene altas resistencias debido a que el aire es conducido por ductos metálicos.

La otra razón es que una mina es una entidad dinámica, en la cual a medida que se van desarrollando las labores, aumentan los requerimientos de caudal, por lo cual contar con un ventilador que pueda ajustarse a varios puntos de funcionamiento, es una ventaja; además, los ventiladores axiales son más flexibles. De cualquier modo, la decisión sobre adquirir un ventilador axial o centrífugo siempre debe responder al análisis de todas las variables, en la Tabla 18 se presentan diferencias entre ambos tipos de ventiladores.

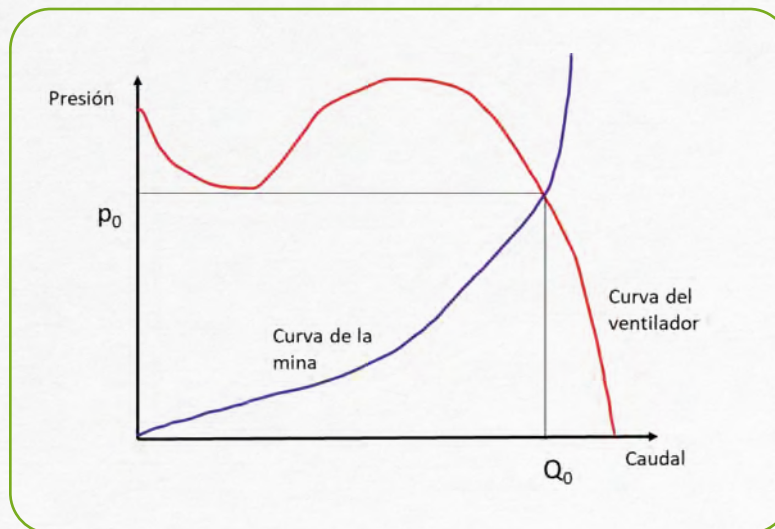
CRITERIO	AXIALES	CENTRÍFUGOS
Rendimiento	Tienen mejor eficiencia en un amplio rango de puntos de funcionamiento.	Son muy eficientes, pero solo en un rango reducido de puntos de funcionamiento.
Instalación en las mismas condiciones de Q y p	Requieren de menos espacio ya que pueden utilizar motores de mayor velocidad.	Requieren cimentaciones mayores.
Ruido	Son más ruidosos.	Son menos ruidosos.
Versatilidad en la regulación	Se puede modificar la velocidad de rotación con un variador de frecuencia y modificar el ángulo de posición de los álabes para obtener otros puntos de funcionamiento.	Se puede modificar la velocidad, pero para conseguir otro punto de funcionamiento se debe aumentar la resistencia del circuito.

Tabla 18. Diferencias entre los ventiladores centrífugos y axiales.

6.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS Y COMBINACIÓN DE LOS VENTILADORES

6.3.1 CURVAS DE UN VENTILADOR

Un ventilador se puede caracterizar por su curva que es el lugar geométrico de los puntos de funcionamiento del mismo. Para cada ángulo de regulación de los álabes, se tiene una curva distinta. El punto de corte de la curva con la resistencia del circuito (P_0 o Q_0), es el punto de funcionamiento del ventilador.



Un ventilador axial fijo, a una velocidad constante, tiene un uso limitado y mantendrá una buena eficiencia solamente cuando la resistencia del sistema sea constante; esto difícilmente puede garantizarse durante la vida útil del ventilador principal. En consecuencia, se pueden modificar los puntos de operación con las siguientes alternativas:

1

Cambiando el ángulo de los álabes o palas.

.....

2

Adicionando o removiendo los álabes.

.....

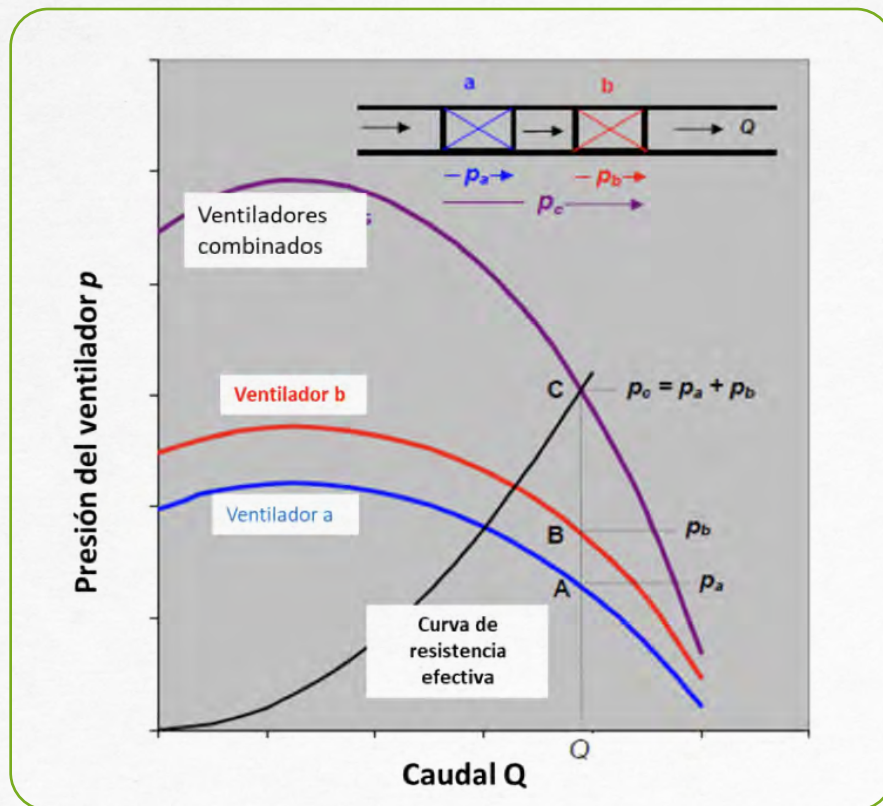
3

Modificando la velocidad del motor y las revoluciones.

6.3.2 TRABAJO EN SERIE DE DOS VENTILADORES

En las minas, cuando es necesario disponer de caudales o de presiones con grandes variaciones, se puede recurrir a un sistema de acoplamiento tanto en serie como en paralelo. Es recomendable combinar ventiladores en serie para pasar una determinada cantidad de caudal contra una resistencia en aumento.

Cuando se combinan dos ventiladores en serie, el resultado es el que se muestra en la Gráfica 23 y se describe a continuación:



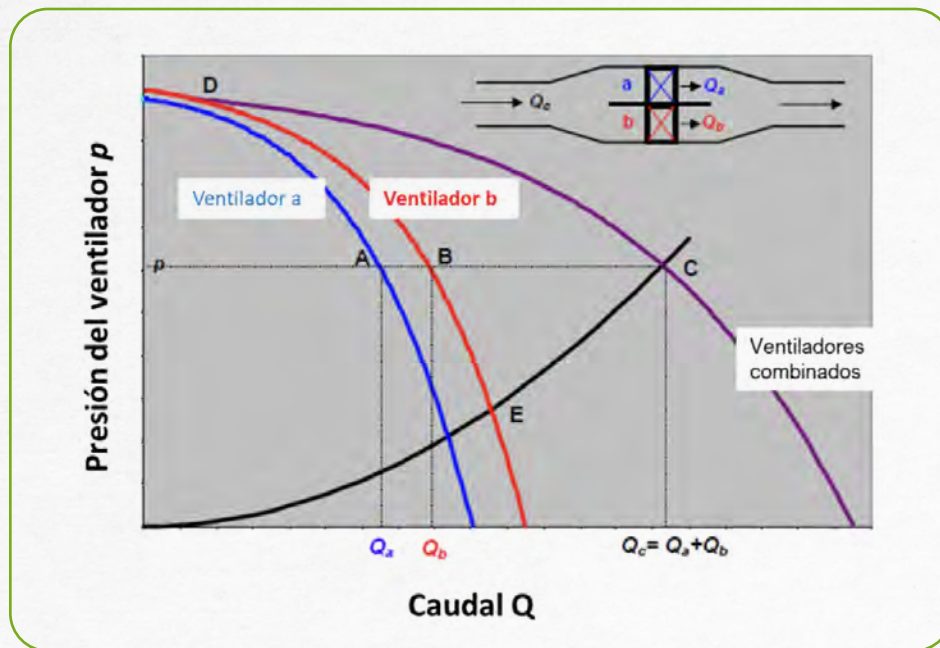
Gráfica 23. Curva característica de ventiladores combinados en serie.
[McPherson M. J., 2012].

- El caudal Q que pasa en los ventiladores a y b es el mismo y la caída de presión es la suma de las de cada uno: $p_a + p_b$.
- La curva característica total de ambos ventiladores se construye sumando las ordenadas de sus curvas características individuales. Para tres o más ventiladores el proceso es igual.
- El punto de operación efectivo es C.

6.3.3 TRABAJO EN PARALELO DE DOS VENTILADORES

Es recomendable combinar ventiladores en paralelo para conseguir que se incremente el caudal para una determinada resistencia. La ventaja adicional que tiene el combinar estos con respecto a los ventiladores en serie es que si uno de ellos falla, entonces el ventilador remanente continuará supliendo una proporción significativa del caudal original.

Cuando se combinan dos ventiladores en paralelo, el resultado es el que se muestra en la Gráfica 24 y se describe a continuación:



Gráfica 24. Curva característica de ventiladores combinados en paralelo.
[McPherson M. J., 2012].

- El caudal total es la suma de los caudales de cada ventilador, es decir, de Q_a y Q_b .
- La caída de presión es la misma.
- La curva total se construye mediante la adición de los caudales individuales (abscisas), conservando las mismas caídas de presión.
- El punto de operación para la unidad completa ocurre en C con los puntos de operación individual en A y B, respectivamente.

Tanto para las combinaciones en serie como para aquellas en paralelo, es aconsejable que los ventiladores sean idénticos o no tengan marcadas diferencias con respecto a su capacidad. ¿Cuál considera que es la razón para ello?

6.4 LEYES DE LOS VENTILADORES

Las leyes de ventilación son un conjunto de proporcionalidades establecidas a partir de la Ley de Euler y utilizadas para determinar las características de operación de un ventilador a otras velocidades, densidades del aire y diámetro del impulsor; por lo tanto, son útiles para calcular los cambios de un sistema, cuando se varían los parámetros de operación.

Si se tienen dos ventiladores similares geoméricamente con las letras a y b, se pueden expresar las leyes de ventilación con el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\frac{p_{ft,a}}{p_{ft,b}} = \frac{n_a^2}{n_b^2} \frac{d_a^2}{d_b^2} \frac{\rho_a}{\rho_b} \quad \frac{Q_a}{Q_b} = \frac{n_a}{n_b} \frac{d_a^3}{d_b^3} \quad \frac{p_{w,a}}{p_{w,b}} = \frac{n_a^3}{n_b^3} \frac{d_a^5}{d_b^5} \frac{\rho_a}{\rho_b}$$

Ecuación 33. Leyes de los ventiladores.

Donde,

- p_{ft} :** presión del ventilador (aplica para presiones totales y estáticas).
- Q :** caudal.
- P_w :** potencia.
- n :** velocidad de rotación.
- d :** diámetro del impulsor o rodete.
- ρ :** densidad del aire.

Ejemplo

Se tienen las curvas características para un ventilador que funciona a 850 rpm y cuya densidad del aire que pasa por este es de 1,2 kg/m³. Las lecturas de las curvas indican que con un caudal de 150 m³/s, la presión de ventilador es de 2,2 kPa y la potencia del eje de 440 kW. Asumiendo que la eficiencia permanece igual, calcule los correspondientes puntos de funcionamiento del ventilador si se pone a trabajar a 1100 rpm y con una densidad del aire de 1,1 kg/m³.

Solución

Si el mismo ventilador será usado en condiciones diferentes, no hay cambio en el diámetro del rodete o en la geometría en general. Se utilizan las ecuaciones de las leyes de ventilación para calcular la nueva presión, caudal y potencia.

$$p_f = 2,2 \left(\frac{1100}{850} \right)^2 \left(\frac{1,1}{1,2} \right) = 3,377 \text{ kPa}$$

$$Q = 150 \times \frac{1100}{850} = 194,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{ow} = 440 \times \left(\frac{1100}{850} \right)^3 \times \frac{1,1}{1,2} = 874 \text{ kW}$$

6.5 VENTILACIÓN AUXILIAR

La ventilación auxiliar se encarga de direccionar el aire fresco a través de ductos para ventilar labores ciegas. No existe consenso en ingeniería con respecto a la diferencia entre esta ventilación y la secundaria. A continuación, se enfatizará en algunos factores de instalación de la ventilación auxiliar con el objetivo de optimizar su diseño.

6.5.1 VENTILADORES Y DUCTOS

Los ventiladores cumplen con la función de hacer llegar aire limpio procedente del circuito de ventilación principal; los más usados en ventilación secundaria son generalmente de tipo axial. Con respecto a la fuente de energía, se clasifican en dos tipos:

Ventiladores neumáticos:

son aquellos axiales que son accionados por aire comprimido. Solo son recomendables para lugares en los que no es posible hacer llegar la red eléctrica o por motivos de seguridad; puesto que el aire es muy inestable, por lo tanto, estos son muy ineficientes.

Ventiladores eléctricos:

en minería subterránea de carbón los equipos de ventilación, los cables de cajas arrancadoras y todos los otros accesorios eléctricos, deben estar clasificados en el **Grupo I** de la **categoría Mb**, de acuerdo con las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) o sus equivalentes. Cuando se superen los límites reglamentarios de metano, solo deben permanecer en uso aquellos equipos que sean del **Grupo I** de la **Categoría Ma**. Particularmente, un modo de protección eléctrica recomendado para un ventilador es la "envolvente antideflagrante", que en la etiqueta del equipo se reconoce con "**Db**".

Por su parte, los ductos en ventilación subterránea están formados por un tejido textil de poliéster revestido con PVC, el cual proporciona la resistencia mecánica y hace que el conducto de ventilación sea impermeable. Para estos, se precisan los siguientes parámetros:



Son impelentes o aspirantes.



Deben ser autoextinguibles.



Tienen una protección antiestática.



Cuentan con coeficientes de fricción bajos (0,015) y malos (más de 0,035).



Tienen longitudes estándar: 5 m, 10 m, 15 m y 20 m.



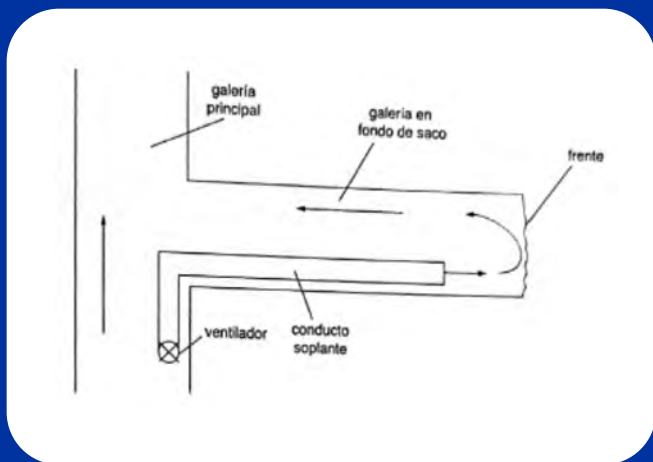
Sus diámetros pueden ser de 30 cm hasta 1 m.



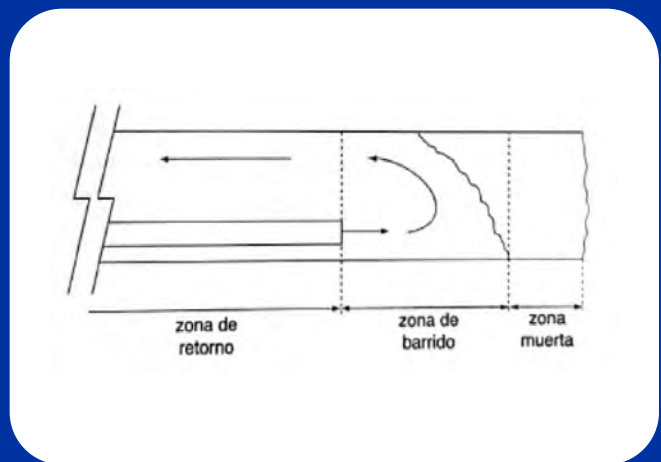
¿Porque en minería subterránea, generalmente, no se utiliza tubería metálica?

VENTILACIÓN SOPLANTE

- El aire, impulsado por un ventilador, entra al frente a través de la tubería, y desplaza la masa de aire viciada hacia la corriente principal, a través de la galería.
- Este es el sistema predominante en ventilación secundaria en minería.
- La corriente de aire limpio que se genera en este sistema, en caso de tener una velocidad alta, provoca una mezcla turbulenta y disminuye la estratificación del gas al entrar en contacto con los gases que hay en el frente.
- La salida del conducto debe estar situada a una distancia adecuada del frente. Si esta es excesiva, se crea una zona muerta en la cual el aire no se renueva. ¿Cuál distancia es la adecuada entre el ducto y el frente?



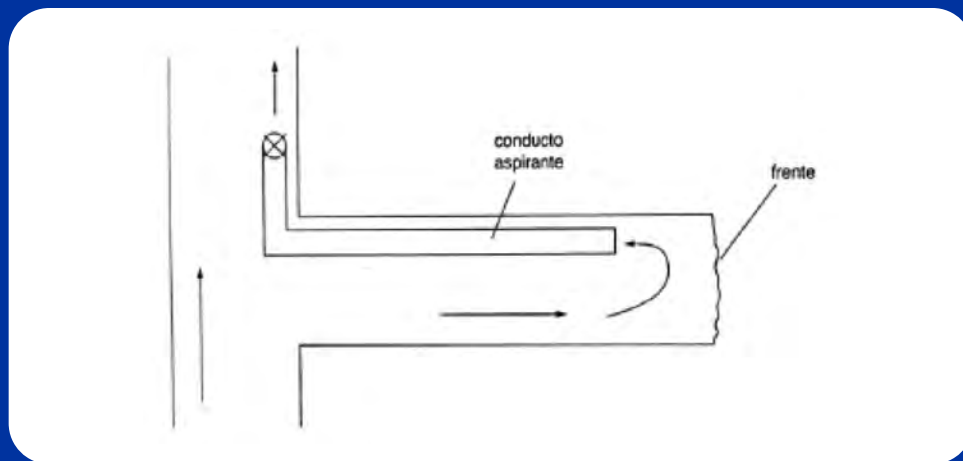
Gráfica 25. Ventilación auxiliar soplante.
[AITEMIN, 2011]



Gráfica 26. Frente de explotación con ventilación soplante.
[AITEMIN, 2011]

VENTILACIÓN ASPIRANTE

- El aire contaminado del frente es succionado a través de un conducto. Gracias a la depresión que crea un ventilador situado en el otro extremo este aire es evacuado de la corriente de ventilación principal, por lo cual logra entrar aire limpio a través de la galería.
- La boca de aspiración de la tubería de este sistema se sitúa muy próxima al frente. Aun así, debido a la distribución de las curvas de velocidades de aire en las zonas próximas, este no efectúa en general un buen barrido del frente, por lo que suele ser necesario la configuración mixta.



Gráfica 27. Ventilación auxiliar aspirante.
[AITEMIN, 2011]



7. GESTIÓN DE LA VENTILACIÓN

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Presentar los elementos de gestión que permiten asegurar que el plan de ventilación cumplirá su objetivo. Para ello, se abordarán tres temáticas: las mediciones mínimas y sus principales instrumentos de medición, los elementos que hacen parte del isométrico de ventilación y la capacitación para realizar procedimientos de trabajo seguro.

7.1 ELEMENTOS EN LA GESTIÓN DE LA VENTILACIÓN

La gestión de la ventilación consiste en un proceso sistemático en el cual se monitorean las principales variables que brindan información sobre su desempeño (caudal y caída de presión) y su efectividad (concentraciones de gases, temperatura efectiva y concentración de polvo). Además, comprende otras actividades determinantes para garantizar que esta cumpla su objetivo, como lo son: el registro de las mediciones en planos y libros; el análisis de dichas tendencias y la toma de decisiones; la capacitación de todos los que intervienen en el proceso; el mantenimiento de los equipos de ventilación; la calibración de los equipos de medición y los procedimientos de trabajo seguro. En esta sección se hará énfasis en lo relativo a las mediciones, el registro en planos y libros y la capacitación.

7.2 MEDICIONES

7.2.1 PROPÓSITO DE LAS MEDICIONES

Una de las diferencias entre la ventilación industrial y un sistema de ventilación en una mina, es que esta última es una entidad dinámica, que cambia continuamente debido al avance de la explotación, la conexión de los trabajos, los cambios en las secciones y los equipos de ventilación. Por lo anterior, requiere que se realicen aforos, regularmente, para su control y vigilancia.

Las mediciones son, por lo tanto, un procedimiento estructurado para obtener datos de la distribución del caudal, de la caída de presión y de la calidad del aire en las vías principales del sistema de ventilación. Las principales que deben realizarse para cada rama del sistema son:

- Caudal (Q), midiendo la sección de la labor y la velocidad del aire.
- Presión diferencial en el ventilador Δp .

Los parámetros que pueden ser calculados a partir de Q y Δp y pueden usarse en el planeamiento de la ventilación y el control son:

- Distribución de caudales, pérdidas de presión y fugas.
- Resistencia de cada rama ($R = Q^2 / \Delta p$). La resistencia aerodinámica se puede obtener también mediante mediciones, es la forma más exacta, pero la más laboriosa.
- Pérdidas de potencia ($p \times Q$) y, por lo tanto, de distribución de costos de operación a través de la red.
- Eficiencia volumétrica del sistema.
- Efectos de la ventilación natural.
- Factores de fricción.

Las otras mediciones fundamentales son las referidas a la calidad del aire, entre las que destacan: la temperatura seca y de bulbo húmedo, las concentraciones de gases en el aire y la concentración de polvo inhalable y respirable. A continuación, se describen algunos de los métodos y equipos de medida de estas variables.

7.2.2 AFOROS O MEDIDAS DEL CAUDAL DE AIRE

El volumen de aire (Q), que pasa por algún punto fijo en una vía o ducto, está determinado cada segundo por el producto de su velocidad (v) y el área de la sección trasversal que atraviesa:

$$Q = vA$$

Los aforos de ventilación deben realizarse semanalmente, de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1886 de 2015. Es muy importante que estos se realicen en los frentes de trabajo, para comprobar que les está llegando el caudal mínimo requerido a los trabajadores de esa zona.

Dado que la medida de la sección transversal (A) es un problema esencialmente geométrico, que puede obtenerse mediante topografía, este apartado se centrará solo en algunos métodos para la medición de la velocidad (v).

7.2.2.1 MEDICIÓN DIRECTA DE LA VELOCIDAD MEDIANTE ANEMÓMETROS

Los anemómetros se utilizan para calcular rangos de velocidad bajos, normalmente entre 0 y 8 m/s, incluso en algunos aparatos hasta 20 m/s; lo que los hace de uso casi exclusivo en galerías, chimeneas y frentes. Los de rango más alto (10 a 20 m/s) se utilizan también en tuberías de ventilación secundaria.

Existen varios tipos de anemómetros, según el captador utilizado y la transformación realizada de la señal de medida, los más conocidos son:

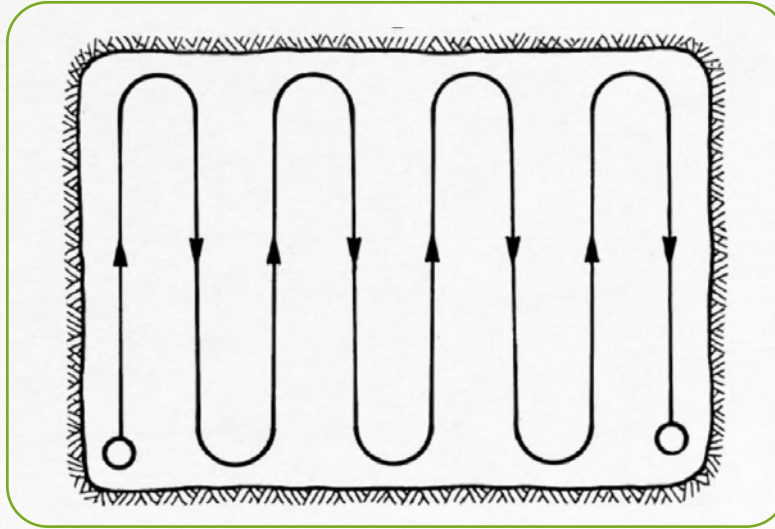
- Molinete con transmisión mecánica a un cuentavueltas.
- Molinete con contador de impulsos al cortar el haz de luz de un fotodiodo.
- Termistancia o hilo caliente.
- Vórtice.
- Placa (velometer).
- Doppler.

La medida de un anemómetro se debe realizar con las siguientes exigencias:

- El anemómetro debe estar calibrado.
- Medir en un plano perpendicular al eje de la sección de la labor.
- La medida se debe conseguir en función de la altura de la sección.
- Medir a una distancia tres veces mayor al ancho de la labor, si se mide antes de un cruce o desvío.
- Medir siempre conservando una distancia del perímetro de al menos 20 cm.

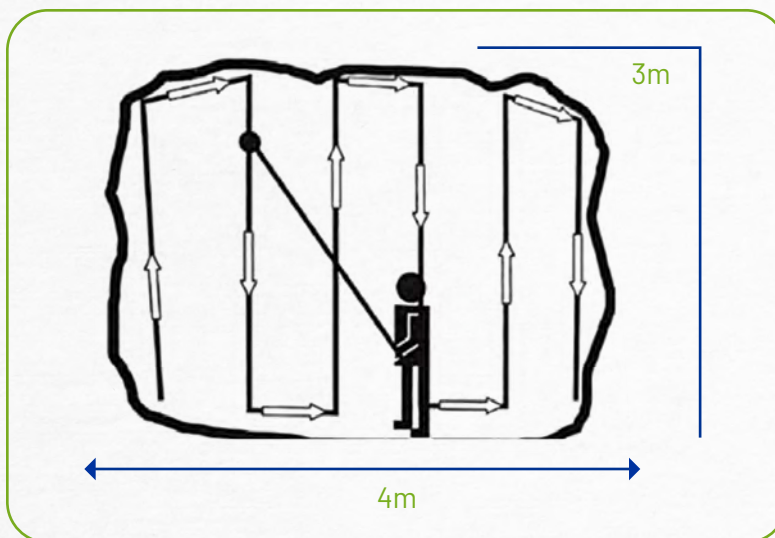
Método de barrido:

se aplica en la mayor parte de las secciones de la mina. Consiste en circular el aparato a lo largo de la sección, efectuando un barrido lo más amplio posible con un recorrido predeterminado. La velocidad de barrido será de 0,4 m/s, sin embargo para velocidades inferiores a 1 m/s, se deberá realizar a 0,2 m/s.



Gráfica 28. Método de barrido en secciones pequeñas.

Este método requiere que el anemómetro acumule los valores y dé una medida integrada o un valor medio, para ello deben seguirse las instrucciones del operador. En secciones grandes, será necesario definir los recorridos y ajustarlos al tiempo de lectura del dispositivo.

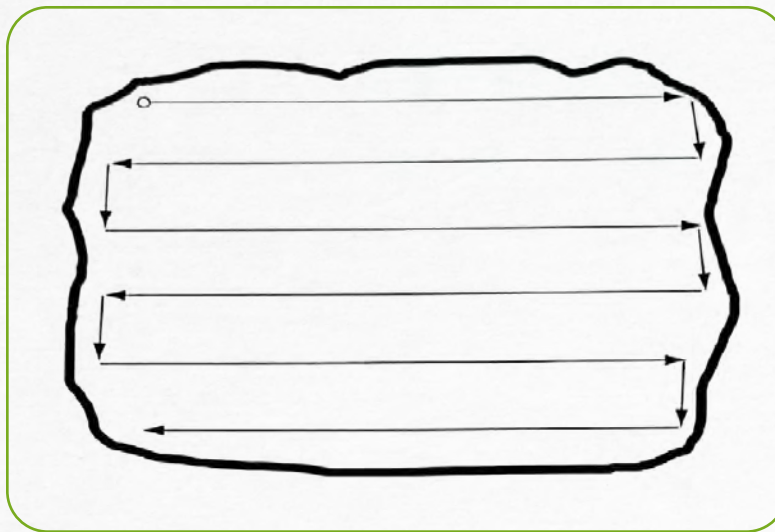


Gráfica 29. Determinación del tiempo de barrido.

$$(6 \times 3) + 4 = 22 \text{ m}$$

$$22 / 0,4 = 55$$

Los recorridos se pueden hacer en horizontal o, en los casos de alta precisión, usando la técnica que determina la velocidad de las distintas cuadrículas.



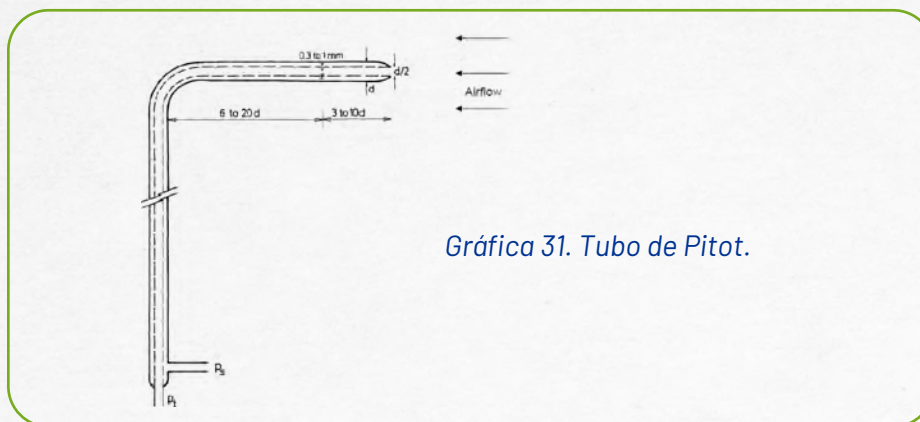
Gráfica 30. Barrido horizontal.

7.2.2.2 MEDICIÓN INDIRECTA MEDIANTE TUBOS DE PITOT:

Con el tubo de Pitot se mide la presión dinámica (p_d) obteniendo la velocidad (v), por medio de la siguiente fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$$

Esta solo puede emplearse con velocidades elevadas, por encima de 10 m/s, sobre todo, en la proximidad e interior de los ventiladores principales y en los conductos de ventilación secundaria.



Gráfica 31. Tubo de Pitot.

7.2.3 MEDICIONES DE PRESIÓN DIFERENCIAL EN EL VENTILADOR

El propósito primario de realizar mediciones de presión es determinar su pérdida por fricción (p), que corresponde al caudal (Q) medido en cada rama. Existen dos métodos para ello:

1 Presiones absolutas o barométricas:

la presión diferencial se obtiene a partir de la diferencia de dos valores absolutos. Estas medidas se realizan con:

- **Barómetro de mercurio:** se utiliza en ocasiones como patrón en el exterior de la mina. Es de gran precisión, pero no es adecuado para utilizar dentro de esta.
- **Barómetro aneroide:** presenta la precisión suficiente para la determinación de la presión barométrica. No es válido para la determinación de pérdidas de carga de la mina, ya que la precisión es del orden de 13,6 mm.c.a.

2 Presiones absolutas o barométricas:

la presión total del ventilador es el incremento en la presión total (p_t) medida por un tubo de Pitot atravesando este (incremento total de energía mecánica impartida por el ventilador). Bajo esta premisa se fundamenta este método.

- **Ramas:** para las medidas realizadas con el micromanómetro, se situará el aparato en un punto intermedio de la rama y desde él se extenderá una goma hacia cada sección elegida como punto de medida. En el extremo de cada goma se acoplará un tubo de Pitot, midiendo así directamente la diferencia de presión entre ambos puntos. Después de medir la sección elegida y la velocidad del aire, se calculará el caudal en esa sección.

$$Q = vA \quad R = \frac{1.000 \times \Delta H}{q^2}$$

- **Nudos:** para el cálculo de la resistencia de un nudo se deberán medir el aire y las presiones en cada una de las ramas que confluyen en él, teniendo en cuenta el sentido de la corriente de aire.

7.2.4 MEDICIONES DE CALIDAD DEL AIRE

Medir la calidad del aire es indispensable para advertir situaciones de riesgo inminente y para determinar si la ventilación está cumpliendo su objetivo. En la siguiente tabla se presentan los parámetros con los cuales se determina la calidad del aire.

Parámetros	Concentraciones de gases (% o ppm)	Temperatura seca y húmeda (OC)	Concentración del polvo respirable (mg/m ³)
Equipos de medida	Monitores portátiles que incluyen sensores para monitorear hasta seis gases: O₂, CO, CH₄, H₂S, CO₂ y NO₂. Monitoreo continuo: son estaciones fijas para medir especialmente O₂, CO y CH₄. Se puede monitorear desde superficie las condiciones de la atmósfera minera.	El psicrómetro permite medir th y ts. Con estas dos mediciones y la velocidad del aire, se puede determinar la temperatura efectiva.	Equipo que se compone de una bomba de aspiración, una unidad de captación, un ciclón, un cronómetro, un termómetro y un manómetro.
Periodicidad	Por lo menos dos veces por cada turno de trabajo, pero lo ideal es que sea un monitoreo continuo.	Semanal.	Anual, pero es recomendable migrar a monitores portátiles individuales para los trabajadores más expuestos.

Tabla 19. Mediciones de calidad del aire.

7.3 CAPACITACIÓN Y RESPONSABILIDADES

Para la gestión de la ventilación, se establecen en el programa de capacitación unas responsabilidades y temas sugeridos, de acuerdo con la labor desempeñada:

- **Titular del derecho minero, explotador y empleador.** En materia de seguridad de la atmósfera minera, debe garantizar, como mínimo, los recursos necesarios para la ejecución de un plan de ventilación adecuado a las necesidades de las labores.
- **Responsable de la labor subterránea.** Es la persona calificada y capacitada, responsable de la ejecución técnica de los trabajos que se realizan en una mina o en una labor subterránea, la cual es nombrada por el titular o explotador minero, según el artículo 7 del Decreto 1886 de 2015. Además de las funciones delegadas, el responsable es quien debe validar las siguientes funciones en materia de seguridad en cuestiones atmosféricas:



Capacitaciones.

Programar capacitaciones para el personal en relación con la ventilación y la atmósfera minera, en estas se deben abarcar, como mínimo, los siguientes temas: componentes del aire y de la atmósfera minera; características de los gases y los contaminantes presentes en la mina; VLP, socialización del circuito de ventilación; mantenimiento de los equipos, accesorios e infraestructura de ventilación; equipos de medición de gases; y lectura de los tableros de registro de mediciones atmosféricas y disposiciones en materia de ventilación, según el Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas.



Capacitación para el encargado de la supervisión de la ventilación.

La persona encargada de la supervisión de la ventilación, adicionalmente de recibir la capacitación para el personal minero, debe asistir a la siguiente capacitación: manejo de los equipos de detección de gases; diligenciamiento del tablero, libro o planilla de registro de las medidas atmosféricas; y medición de gases en los diferentes frentes de trabajo subterráneos. Se recomienda, también, que sea una persona capacitada y haga parte de la brigada de emergencia de la empresa.



Evacuación de la mina.

Cuando se ponga en riesgo la seguridad del personal por fallencias en la ventilación o por fallas de la energía eléctrica, el responsable técnico de la labor subterránea o el encargado de la supervisión de la ventilación, debe ordenar la evacuación inmediata de todo el personal de la mina.





Aforos de ventilación.

Programar semanalmente las mediciones de los aforos correspondientes a los caudales de ventilación, temperaturas (seca y húmeda) y humedad relativa. Los cuales deben realizarse también en los frentes de trabajo.



Mantenimiento de equipos y vías.

Para el mantenimiento de equipos, infraestructura y accesorios, se elabora el programa de mantenimiento preventivo y las hojas de vida de los equipos. Así mismo, deben gestionarse recursos económicos, personal calificado, repuestos y materiales necesarios para el mantenimiento de los elementos que son soporte de la ventilación en la mina.



Dotación.

Todo el personal debe tener los EPP destinados para la protección contra material particulado, polvo, gases tóxicos o deficiencia de ventilación.

Encargado de la supervisión de la ventilación.

Es un colaborador que se delega en cada turno para que se encargue de la supervisión de la ventilación en todas las labores. Esta persona debe estar capacitada para realizar dichas funciones y el encargado de escogerla es el responsable técnico de la labor subterránea.

Para garantizar la seguridad del personal con respecto a factores atmosféricos, en cada turno de trabajo debe elegirse una persona que reciba la capacitación necesaria para tomar decisiones pertinentes y realizar las siguientes funciones:

- Manejar equipos de mediciones de gases.
- Realizar mediciones de gases, antes de iniciar cada turno, en los frentes activos y donde se realicen trabajos periódicos. Si se van a realizar trabajos después de ejecutar una voladura, se debe hacer la medición de gases en los frentes por donde transita el personal y en los que puedan verse afectados por la emanación de gases por los explosivos utilizados en la voladura.
- Revisar los equipos e infraestructura del sistema de ventilación como ventiladores, ductos, derivaciones, tabiques, puertas, entre otros.
- Actualizar diariamente los tableros y libros de registro de las mediciones atmosféricas.

Trabajadores mineros.

El personal involucrado en las labores subterráneas tiene la obligación de salvaguardar toda la infraestructura y los equipos que soportan al sistema de ventilación. Así mismo, deben reportar al encargado de la supervisión de la ventilación y al responsable de la labor subterránea los daños, las perturbaciones o las anomalías que se presenten en la atmósfera de la mina. También, es su obligación asistir a las capacitaciones y entrenamientos sobre SST y salvamento minero que sean impartidas por la empresa o externos (ARL, ANM o Salvamento Minero de la región).





8. REGLAS DE ORO DE LA VENTILACIÓN

- Como síntesis de esta guía se presentan diez reglas de oro de la ventilación:

1

OBJETIVO DE LA VENTILACIÓN

Todas las labores subterráneas deben estar recorridas por un flujo de aire suficiente en cantidad y calidad para diluir los contaminantes a concentraciones seguras. El aire exterior introducido estará exento de gases, vapores y polvos nocivos y peligrosos.

2

INGRESO Y SALIDA DEL AIRE

Toda mina debe tener dos galerías distintas para la entrada y la salida del aire. Solo en casos excepcionales y apoyándose de ventilación auxiliar, podrá hacerse excepción de esta regla.

3

RUTAS DE EVACUACIÓN

Toda operación minera subterránea debe contar con, al menos, dos rutas de evacuación en caso de emergencia, que estén en buen estado para el tránsito de personas y cuenten con recursos suficientes para facilitar la evacuación.

4

VENTILACIÓN FORZADA

Toda labor minera subterránea debe contar con ventilación forzada o mecánica, cuyo ventilador principal debe ubicarse, preferiblemente, en superficie. Salvo un procedimiento especial, la ventilación principal nunca deberá suspenderse.

5

CONTROL DE FUGAS

Las labores mineras que no estén recorridas por una corriente de aire y su cierre sea temporal, deben estar señalizadas y tener restringido el acceso; cuando su cierre es definitivo las labores deben estar tabicadas para evitar fugas y las áreas abandonadas deben estar aisladas herméticamente.

6

CÁLCULO DE CAUDALES Y RESISTENCIAS

El cálculo del caudal debe comenzar por cuantificar las necesidades de este en los frentes de explotación y, posteriormente, en otras labores. En el cálculo de la resistencia de la mina y el caudal, deben asumirse factores de seguridad debido a los cambios en la configuración de esta que pueden generar cambios en la resistencia del flujo del aire y los coeficientes de reparto del caudal. También, es indispensable contar con la información de los contenidos de gas metano en los mantos de minería de carbón para el cálculo de caudales.

7

DIÁMETRO Y LONGITUD DE LOS DUCTOS DE VENTILACIÓN

En los ductos de ventilación secundaria se debe utilizar el diámetro máximo posible, dado que ello reduce la resistencia y, en consecuencia, la potencia requerida; lo que implica directamente un ahorro en el consumo de energía. La longitud de los tramos de los ductos de ventilación deben ser lo más largos posible, porque ello conlleva a un menor número de juntas, menor caudal de fugas y, por lo tanto, menor presión necesaria en el ventilador y menor capacidad de este.

8

VARIADOR DE FRECUENCIA

Es recomendable instalar un variador de frecuencia en los ventiladores para lograr optimizar la velocidad y entrega en el frente de trabajo del caudal adecuado; el cual puede ser menor cuando se ha avanzado poco en la explotación o mayor cuando aumentan las concentraciones de gases tóxicos y explosivos. Por lo tanto, el variador de frecuencia representa ahorro de energía y mayor seguridad.

9

SEGURIDAD EN LOS EQUIPOS E INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS

En minería de carbón, los ventiladores así como todos los accesorios eléctricos como cajas de bornas, cajas arrancadoras y cables, deben tener modos de protección eléctricos adecuados para trabajo en atmósferas explosivas. Entre los recomendados están el envoltorio antideflagrante, la seguridad aumentada y la seguridad intrínseca.

10

GESTIÓN DE LA VENTILACIÓN

La gestión de la ventilación es esencial para verificar que se está cumpliendo el objetivo (garantizar una atmósfera segura para la vida). Esta incluye: el monitoreo semanal de las velocidades, presiones, humedad y temperatura; el monitoreo continuo de los gases; los procedimientos de trabajo seguro; la capacitación de todos los trabajadores en el conocimiento de la atmósfera minera, los procedimientos de respuesta a emergencias y otras competencias específicas; el mantenimiento de los ventiladores y accesorios; la calibración de los equipos de monitoreo y el plan de emergencias. El éxito en la gestión de la ventilación en una mina no solo radica en implementar todos los anteriores elementos, sino también en que el seguimiento conlleve a la toma de decisiones para actuar en casos en los que se presenten condiciones de riesgo inminente, aumento en tendencias peligrosas o se desee mejorar la eficiencia del sistema.



BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Minería. (2021). Guía técnica para el diseño de planes de prevención de explosiones de metano y polvo de carbón. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/guia_preencion_mitigacion.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (2022). Cuadro de Control de Emergencias Mineras.
- Australian Institute of Health and Safety (AIHS). (2019). *Synopsis. In The Core Body of Knowledge for Generalist OHS Professionals* (2° Ed.). Victoria, Australia.
- Carrasco G. J., Alarcón R. D., Albuerne P. J., Fernández B. E., Fernández V. E., García G. L., & Madera G., J. (2011). Manual de ventilación de minas y obras subterráneas. Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN). Madrid, España.
- Decreto 1886 de 2015. Ministerio de Minas y Energía. Por el cual se define el Reglamento de seguridad en las labores subterráneas. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/decreto_1886_de_2015.pdf
- Decreto 944 de 2022. Ministerio de Minas y Energía. Por el cual se modifica el Decreto 1886 de 2015
- https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DECRETO_944_DEL_1_DE_JUNIO_DE_2022.pdf
- Gheorghe G. C. (2020). Emergencias mineras mortales en Colombia 2005 - 2020: investigación con modelo jerárquico de causalidad de 100 eventos. Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/30813>
- Gheorghe G. C. (2023). Guía técnica: lo esencial en la gestión de seguridad y salud en minería. ARL SURA.
- McPherson M. J. (2012). *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Springer Science & Business Media.
- Streeter V., Wylie B. & Bedford K. (2000). Mecánica de fluidos. (9° Ed.). ISBN: 9789586009874. MCGRAW-HILL.
- Thakur, P. (2018). *Advanced mine ventilation: respirable coal dust, combustible gas and mine fire control*. Woodhead Publishing.