

VENTILACION MINERIA SUBTERRANEA

INTRODUCCIÓN

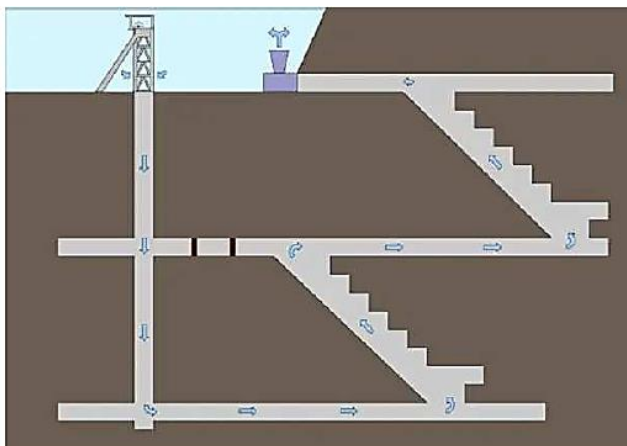
La ventilación en minería subterránea es un proceso esencial para mantener condiciones de trabajo seguras y saludables para los mineros. Este sistema tiene como objetivo principal suministrar aire fresco y eliminar los contaminantes peligrosos, tales como gases tóxicos, polvo, y calor excesivo que se generan durante las operaciones mineras. Un sistema de ventilación eficiente no solo garantiza la seguridad y el bienestar de los trabajadores, sino que también mejora la productividad al proporcionar un ambiente de trabajo más confortable y reducir los riesgos de accidentes y enfermedades ocupacionales.

La planificación y diseño de la ventilación en minas subterráneas involucra la consideración de varios factores clave, incluyendo la estructura y extensión de las galerías, la ubicación de las fuentes de contaminación, y las condiciones geológicas y ambientales. El uso adecuado de ventiladores, conductos y reguladores de flujo es fundamental para distribuir el aire de manera uniforme y eficiente. Además, el monitoreo constante de la calidad del aire y la implementación de sistemas de control automatizados permiten ajustar el flujo de ventilación en tiempo real, adaptándose a las cambiantes condiciones de operación.

La ventilación en mina subterránea

Es el proceso mediante el cual se hace circular por el interior de la mina el aire necesario para asegurar una atmosfera respirable y segura para el desarrollo de los trabajos.

La ventilación se realiza estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de todas las labores. Para ello es indispensable que la mina tenga dos labores de acceso independientes; dos chimeneas, dos socavones, una chimenea y un socavón, etc.



OBJETIVOS DE LA VENTILACIÓN

- Suministrar oxígeno necesario para la respiración de los trabajadores.
- Diluir y extraer gases tóxicos y polvo ambiental.
- Evitar la formación de mezclas explosivas gas – aire
- Reducir la temperatura en lugares muy calurosos y aumentarla si es muy baja
- Proporcionar el aire suficiente para la normal operación de equipos diésel subterráneos.

EL AIRE DE MINAS

Al pasar por la mina, la composición de aire cambia: la cantidad de oxígeno disminuye, la de anhídrido carbónico aumenta. Además, se agregan al aire diversos gases (CH₄, H₂S, SO₂, CO, H), vapores y polvos.

Se considera que el aire de mina se compone de:

- Aire atmosférico
- Gases activos (gases explosivos o nocivos que se forman en las labores mineras)
- Aire muerto (mezcla de anhídrido carbónico 5 – 15 % y nitrógeno 95 – 85% en exceso comparado con el aire atmosférico). El contenido de aire muerto varía, en el aire de mina de unos decimos hasta algunas unidades por ciento.

I. ATMOSFERA DE MINA

Naturaleza y composición del aire; Siendo el aire un fluido básico de la vida; el cual, al pasar por una mina se altera, su composición cambia; se define como una mezcla mecánica de gases que, en su estado puro y seco tiene la siguiente composición.

COMPOSICION DEL AIRE SECO

GAS	% en volumen	% en peso
Nitrógeno - N ₂	78,09	75,53
Oxígeno - O ₂	20,95	23,14
Anh. Carbónico - CO ₂	0,03	0,046
Argón y otros	0,93	1,284

Propiedades del aire

El aire de minas es una mezcla de gases y vapor de agua, se acerca mucho a los gases perfectos, en cuanto a sus propiedades físicas; por lo tanto, existe ciertas propiedades del aire y ciertas leyes que rigen su comportamiento.

• Densidad

Se define como la cantidad de masa de aire contenida en una unidad de volumen, depende de la altitud (m), presión y temperatura del sector. Se mide en varias unidades.

Unidades de densidad:

kilogramos por metro cúbico (kg/m³): Unidad del Sistema Internacional.

gramos por centímetro cúbico (g/cm³): 1 g/cm³ = 1000 kg/m³.

gramos por litro (g/L): 1 g/L = 1 kg/m³.

libras por pie cúbico (lb/ft³): 1 lb/ft³ ≈ 16,0185 kg/m³.

Tabla de Conversión de Densidad:

Unidad	Conversión a kg/m ³
1 g/cm ³	1000 kg/m ³
1 g/l	1 kg/m ³
1 libra/pie ³	≈ 16,0185 kg/m ³

• Presión

La presión del aire es la fuerza que el aire ejerce sobre una superficie por unidad de área. Es una propiedad esencial en la ventilación de minas, ya que una adecuada presión del aire es crucial para la circulación del aire fresco y la evacuación del aire viciado. La presión también influye en la temperatura y la humedad del aire, afectando las condiciones de trabajo. Se mide en varias unidades.

Unidades de Presión:

Pascales (Pa): Unidad del Sistema Internacional. 1 Pa = 1 N/m².

Bar (bar): 1 bar = 100,000 Pa.

Milímetro de mercurio (mmHg): 1 mmHg ≈ 133.322 Pa.

Atmósfera (atm): 1 atm = 101,325 Pa.

Libras por pulgada cuadrada (psi): 1 psi ≈ 6894.76 Pa.

Tabla de Conversión de Presión:

Unidad	Conversión a Pa
1 bar	100,000 Pa
1 mmHg	≈ 133.322 Pa
1 atm	101,325 Pa
1 psi	≈ 6894.76 Pa

- **Peso específico**

es el peso del aire en unidad de volumen. En la ventilación de minas se utiliza el peso específico standard = 1,2 kg/m³ que es el peso de 1 m³ de aire, con la presión de 1 atm., temperatura de 15°C y humedad de 60%.

- **Temperatura**

la temperatura del aire se expresa por lo general en las minas, en grados Celsius, la temperatura normal en ventilación de minas se considera en 15 °C. A veces se utiliza también la temperatura en grados Kelvin. La relación entre ambas es: $T = t + 273$ °K (grados Kelvin).

- **Viscosidad**

La viscosidad del aire es una medida de su resistencia al flujo y deformación, reflejando la fricción interna entre sus capas. En la ventilación de minas subterráneas, la viscosidad afecta la eficiencia del sistema al influir en la facilidad con la que el aire se mueve a través de conductos y galerías. Un aire más viscoso requiere más energía para ser desplazado, aumentando los costos operativos y las pérdidas de presión. Se mide en unidades de viscosidad dinámica (Pascuales por segundo, Pa·s) y viscosidad cinemática (metros cuadrados por segundo, m²/s).

II. GASES DE MINAS

Origen de los Gases

- Gases de estratos en formaciones rocosas: El más común es el metano, liberado entre 0,6 y 1,2 m³/min por m² de superficie fresca de carbón expuesta.
- Gases de tronadura: Emitidos por dinamitas, cuya clasificación depende de su emisión de gases. Estos datos son cruciales para cálculos de dilución.
- Máquinas de combustión interna: Emiten contaminantes como CO, NO₂, aldehídos, humos, metano, y SO₂. La cantidad varía según varios factores de la máquina.
- Fuegos y explosiones: La combustión incompleta genera CO, metano y otros gases peligrosos.
- Respiración humana: Libera aproximadamente 47,20 m³/s de CO₂ por trabajador.
- Baterías: Durante la recarga, liberan pequeñas cantidades de hidrógeno.

Tipos de Gases

_Nitrógeno (N₂): Inodoro, incoloro e insípido, con un peso específico de 0,97. Puede causar asfixia desplazando el oxígeno en áreas mal ventiladas.

_Anhídrido carbónico (CO₂): Sin color ni olor, ligeramente ácido, con un peso específico de 1,53. Aumenta la ventilación pulmonar a mayores concentraciones, con riesgos significativos a altos niveles.

_Monóxido de carbono (CO): Inodoro e incoloro, con un peso específico de 0,97. Altamente tóxico, puede causar la muerte al combinarse con la hemoglobina de la sangre.

_Ácido sulfhídrico (H₂S): Inodoro, de olor a huevo podrido, con un peso específico de 1,19. Extremadamente venenoso, provoca irritación y ataques al sistema nervioso.

_Anhídrido sulfuroso (SO₂): Incoloro, sofocante, de fuerte olor sulfuroso, con un peso específico de 2,26. Irrita las mucosas y puede dañar gravemente los pulmones a altas concentraciones.

_Óxidos de nitrógeno: Compuestos tóxicos como NO y NO₂, más pesados que el aire. Pueden ser fatales incluso a bajas concentraciones debido a su efecto corrosivo en los tejidos respiratorios.

_Gas grisú (metano, CH₄): Principalmente metano, muy inflamable y peligroso en minas. Forma mezclas explosivas con el aire y requiere buena ventilación para ser eliminado.

Clasificación de los Gases según sus Efectos Biológicos

Gases asfixiantes: Simples (hidrocarburos, CO₂, H₂, N₂); Químicos (CO, HCN).

Gases irritantes: Primarios (HCl, NH₃, SO₂, Cl₂, O₃, NO₂); Secundarios (H₂S).

Gases anestésicos: Primarios (parafinas, aldehídos, cetonas); Con efectos sobre vísceras, sistema hematopoyético, sistema nervioso, sangre y sistema circulatorio.

III. POLVO DE MINAS

El aire de los ambientes laborales en las minas contiene sustancias particuladas como polvos.

El polvo de minas es un conjunto de finas y finísimas partículas minerales suspendidas en el aire de la atmósfera de las minas o asentadas sobre las paredes, el piso y el techo de las labores mineras.

El polvo es considerado como uno de los contaminantes ambientales de mayor importancia en minería subterránea, este se genera en varias etapas de explotación y concentración de minerales (detonación y voladuras, transferencias de cargas, fragmentación primaria y secundaria, etc.).

El mismo tiene ocurrencias, comportamientos y métodos de control similar a los contaminantes gaseosos. Un concepto estrechamente relacionado con el polvo es

el aerosol, definido como partículas sólidas o líquidas en suspensión o que forman parte del aire.

Los siguientes conceptos son útiles en el control de partículas sólidas o líquidas en suspensión:

- Las partículas sólidas o líquidas cuando están en suspensión en el aire tienen comportamientos similares.
- Las partículas de polvo mayor a 10 micrones rara vez permanecen en suspensión en el aire, aun a velocidades moderadas, tienden a precipitarse rápidamente.
- El polvo de la mina o de otra actividad industrial con efectos dañinos para la salud humana tiene un rango en tamaño entre 0,5 a 3 micrones.
- Las partículas de polvo con tamaño menores a 10 micrones tienen peso insignificante y como tal pueden permanecer en suspensión indefinidamente.
- Para el control de las partículas es necesario controlar la corriente de aire donde éstas, están suspendidas.

Acción del polvo sobre la salud

El contenido de polvo en el aire se expresa: gravimétricamente (en miligramos de polvo por 1 m³, o numéricamente por el número de partículas por 1 cm³. El aire siempre contiene en suspensión partículas de polvo. A veces en las ciudades, el aire contiene hasta 50.000 ó 200.000 partículas por cm³.

Contenido de Polvo	Estado del Aire
1 mg/m ³	Poco contaminado
5 mg/m ³	Moderadamente contaminado
10 mg/m ³	Contaminado
20 mg/m ³	Muy Contaminado
100 mg/m ³	Excesivamente contaminado

Se distinguen los siguientes tipos de polvo:

1. Polvo mineral no tóxico
2. Polvo mineral tóxico, con mineral de mercurio, plomo, cobre, arsénico, etc.
3. Polvo de carbón

Hasta el polvo no tóxico, contenido en el aire en importantes cantidades, es nocivo, ya que irrita las vías respiratorias y los ojos, ataca los pulmones y desorganiza las

funciones del organismo humano en conjunto, provocando la enfermedad denominada neumoconiosis.

Los nombres de las principales enfermedades y los posibles agentes de su origen son:

- **Silicosis** (causada por la sílice libre)
- Silicotuberculosis, (complicación de silicosis y tuberculosis)
- Asbestosis, (causada por los asbestos).
- Silicatosis, (causada por silicatos).
- Siderosis, (causada por el hierro y minerales de hierro).
- Antracosis, (causada por el carbón).
- Antracosilicosis, (causada por la acción mutua de carbón y sílice).

CANTIDAD DE AIRE NECESARIO

La importancia relativa de los objetivos que persigue la ventilación de minas depende de las características propias de cada mina y no se puede determinar de antemano. En las minas metalíferas de poca profundidad, bastara que la ventilación procure llevar la cantidad de aire necesario para la respiración del personal.

En minas grisutas, por lo general, la completa eliminación del peligro del grisú, es la misión más importante y determina la magnitud de la ventilación. En minas muy calientes, obviamente lo más importante será la eliminación del exceso de calor. Asimismo, cuando se trate de la explotación de mantos ferríferos potentes, en donde se hace necesario el empleo de grandes vehículos de carga o transporte, y el mantenimiento de la escala de producción exige el arranque simultaneo de un alto tonelaje de mena; habrá que prestar especial atención a la evacuación de los gases de escape de los motores diesel, y a la dilución y eliminación de gases tóxicos generado por las voladuras.

Por último, existen minas en las que el desprendimiento de polvo en grandes cantidades es inevitable, por lo que su eliminación del aire de minas debería considerarse el objetivo principal de la ventilación.

CLASIFICACIÓN DE LA VENTILACIÓN

Según la energía utilizada para la circulación del aire

- **Ventilación natural**

La única fuerza natural que puede crear y mantener un flujo sustancial de aire es, básicamente la energía térmica, debido a una diferencia de temperatura. El aire de la mina se calienta al pasar por lugares de trabajos y aberturas y va generando energía térmica; esta es suficiente para superar las pérdidas de cargas, de lo que resulta un flujo.

Finalmente podemos decir que es la energía más barata y abundante en la naturaleza es el aire natural, que se utiliza en la ventilación para minas subterráneas. Este aire se introduce por la bocamina principal de ingreso, recorriendo el flujo del aire por la totalidad del circuito de ventilación, hasta la salida del aire por la otra bocamina.

Para que funcione la ventilación natural tiene que existir una diferencia de alturas entre las bocaminas de entrada y salida. En realidad, más importante que la profundidad de la mina es el intercambio termodinámico que se produce entre la superficie y el interior. La energía térmica agregada al sistema se transforma a energía de presión, susceptible de producir un flujo de aire (el aire caliente desplaza al aire frío produciendo circulación).

- **Ventilación forzada**

Es un sistema que permite el intercambio de aire con el exterior de manera mecánica mediante el uso de ventiladores. Se realiza mediante la creación artificial de depresiones o sobre presiones en conductos de distribución de aire o áreas de una labor.

A su vez, dentro de la ventilación forzada se puede distinguir:

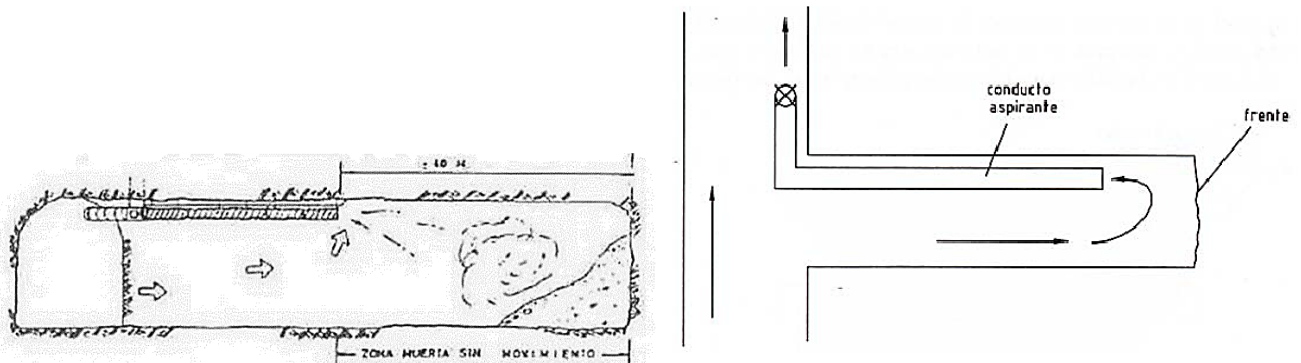
_ Sistema Impelente

El aire fresco se inyecta por el ventilador a través de las mangas de ventilación hacia el frente, mientras que el aire viciado sale desplazado por la labor misma hacia la boca de la rampa o chimeneas próximas.



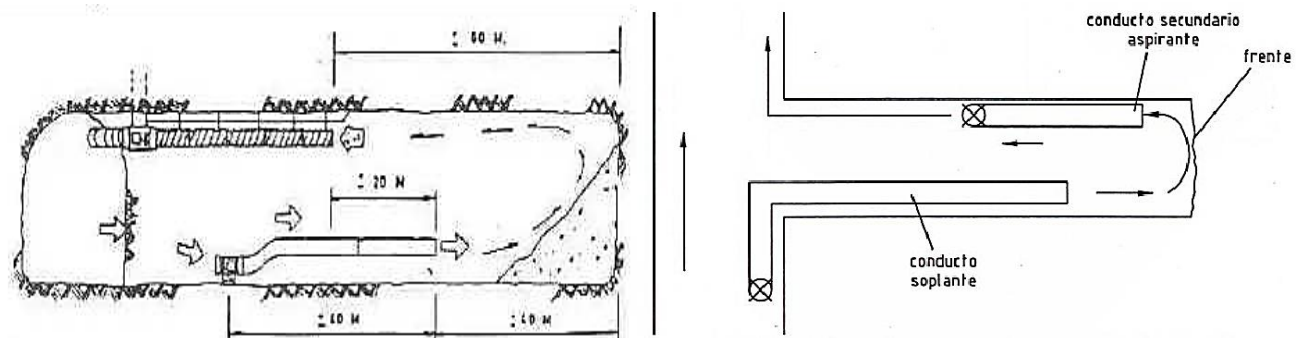
_ Sistema Aspirante

También conocido como sistema extractor, consiste en aspirar el aire que ocupa el frente de avance de la labor mediante una tubería.



_ Sistema Combinado

Para la aplicación de este sistema son necesarias dos tuberías provistas cada una de su ventilador, uno de ellos inyectará el aire fresco y el otro extraerá el aire con contaminantes.



Según la envergadura y rigidez:

- **Ventilación principal**

Se trata de un sistema rígido, en que le dimensiona la cantidad de aire necesario para ventilar un rajo de explotación, varios niveles principales o toda la infraestructura subterránea de la mina. En este último caso, se tendrán en cuenta todas las labores y ramificaciones del total de la mina para el cálculo de las depresiones. Su principal característica es que el diseño, construcción e implementación se realiza para toda la vida de la mina, aunque puede estar sujeto a modificaciones para su optimización.

- **Ventilación secundaria o auxiliar**

Es un sistema dinámico en el que la cantidad de aire necesario se otorgará a medida que va progresando la construcción de labores de preparación y desarrollo de la mina. Se utilizan ventiladores auxiliares que tienen dimensiones, potencias y (por lo general) suministros de caudal menores que los principales.

Los ventiladores auxiliares o secundarios se utilizan para proveer el aire fresco a labores de un solo acceso (tope ciego).

VENTILADORES

El ventilador, es básicamente una máquina que tiene como objetivo principal la generación de una corriente de aire permanente o bien un flujo forzado en un conducto, que, sin embargo, puede variar su intensidad o dirección de acuerdo con el interés de quien lo maneje.

Está constituido por una serie de palas con formas y disposiciones diversas según que el flujo sea axial (ventilador de hélice) o radial (ventilador centrífugo).

Un ventilador es una máquina que transmite energía a un fluido (aire o gases), produciendo el incremento de presión necesario (Presión Total) con la que mantener un flujo continuo de dicho fluido.

Cada ventilador vendrá definido por su curva característica, que es el lugar geométrico de los puntos de funcionamiento del mismo para cada ángulo de regulación de los álabes. Por tanto, tendremos una curva característica distinta para cada ángulo. El punto de corte de la curva característica con la resistencia del circuito es el punto de funcionamiento del ventilador.

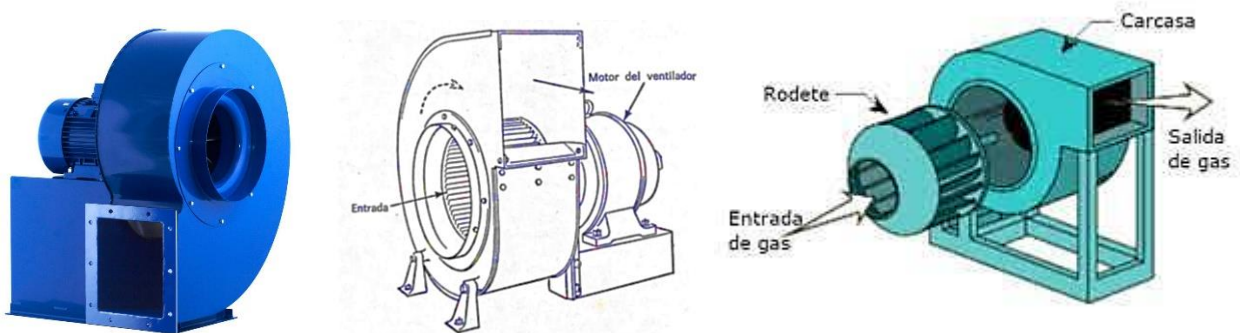


TIPOS DE VENTILADORES

Los ventiladores son dispositivos mecánicos utilizados para mover aire en un sistema de ventilación. Los ventiladores se dividen en dos grandes grupos: ventiladores centrífugos y ventiladores axiales.

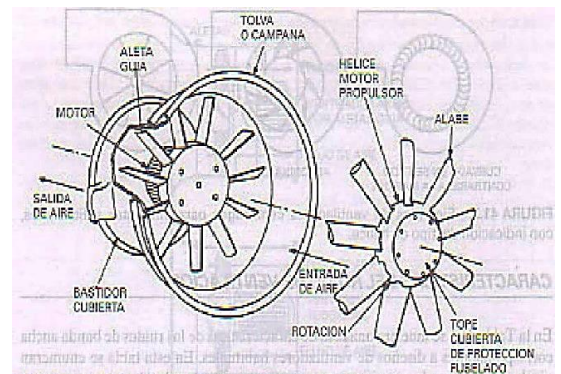
- **Ventiladores Centrífugos**

Los ventiladores centrífugos, también conocidos como ventiladores radiales, funcionan mediante la utilización de un impulsor que gira dentro de una carcasa. El aire entra al ventilador a través del eje y es expulsado radialmente hacia afuera por la fuerza centrífuga creada por el giro del impulsor. Estos ventiladores son capaces de generar altas presiones y son eficaces en sistemas de ventilación que requieren mover aire a través de largas distancias y contra altas resistencias. Son ideales para aplicaciones donde se necesita una presión constante y un flujo de aire controlado. Este tipo de ventiladores es comúnmente utilizado en minas profundas como las de Sudáfrica, Australia y Canadá, donde la gran complejidad de los circuitos genera una resistencia muy alta.



- **Ventiladores Axiales**

Los ventiladores axiales, por otro lado, mueven el aire en una dirección paralela al eje del ventilador. Utilizan un conjunto de palas que giran alrededor de un eje central, creando un flujo de aire lineal. Los ventiladores axiales son más eficientes al mover grandes volúmenes de aire a bajas presiones y son utilizados comúnmente en situaciones donde se requiere una ventilación general y menos resistencia del sistema. Son adecuados para aplicaciones donde el flujo de aire directo y el ahorro de espacio son importantes.



COMPARACIÓN ENTRE LOS VENTILADORES CENTRÍFUGOS Y AXIALES PARA LA VENTILACIÓN

Los ventiladores centrífugos, comparados con los ventiladores axiales, tienen los siguientes inconvenientes:

_ **Tamaño y Peso:** Los ventiladores centrífugos tienden a ser más grandes y pesados que los axiales, lo que puede dificultar su instalación y mantenimiento en espacios reducidos o en condiciones de minería subterránea.

_ **Costo Inicial:** Suelen ser más costosos debido a su diseño más complejo y los materiales utilizados en su construcción, lo que puede significar una inversión inicial mayor.

_ **Mantenimiento:** Requieren más mantenimiento debido a su estructura más compleja ya la necesidad de asegurar que el impulsor y la carcasa estén en buen estado para evitar pérdidas de eficiencia.

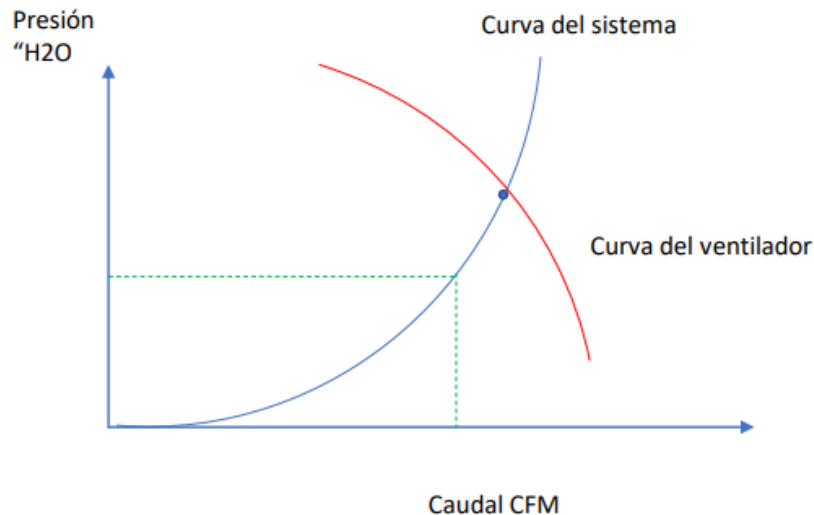
_ **Eficiencia en Volúmenes Altos:** Aunque son eficientes en generar alta presión, no son tan eficientes como los ventiladores axiales en mover grandes volúmenes de aire, lo que puede ser una desventaja en aplicaciones donde se necesita ventilar amplias áreas rápidamente.

_ **Espacio Requerido:** Ocupan más espacio debido a su diseño, lo que puede ser un inconveniente en minas con espacios limitados y restricciones de instalación.

_ **Rendimiento:** Los ventiladores centrífugos pueden tener una menor eficiencia energética en comparación con los axiales cuando se trata de mover grandes volúmenes de aire a bajas presiones, lo que puede resultar en un mayor consumo de energía.

CURVA CARACTERÍSTICA DE UN VENTILADOR Y PUNTO DE OPERACIÓN

La capacidad de un ventilador no puede estar expresada por simples valores de presión y caudal, sino por un rango de valores relacionados entre sí por medio de una curva continua conocida con el nombre de curva característica de un ventilador; la cual es representada generalmente en un sistema cartesiano de caudales en el eje de las abscisas y presiones en el eje de las ordenadas. Sobre esta curva será siempre posible encontrar un punto de máxima eficiencia, menor consumo de energía y bajo nivel de ruido.



FLUJO DE AIRE (Q):

Esta referido a la cantidad y calidad de aire que se necesita para ventilar un determinado lugar en trabajo en la mina.

Las Leyes del Estado del flujo de aire indican que por una cantidad de aire que circule entre dos puntos, debe existir una diferencia de presiones entre estos puntos. La relación entre la diferencia de presión (H) y la cantidad de flujo de aire (Q) ha sido estudiada por varias personas.

Es obvio que si no existe una diferencia de presiones no existe una cantidad de flujo, es decir, si $H = 0$, $Q = 0$. También es obvio que mientras mayor sea H, mayor será Q. En el caso de que el aire que circula subterráneamente donde el patrón del flujo es turbulento (es decir como un río que fluye en los rápidos), la relación entre las dos cantidades puede expresarse en la siguiente formula:

$$H = RQ^2$$

En donde:

- H = pérdida de la presión (Pa)
- R = resistencia (Ns^3 / m^8)
- Q = flujo del volumen (m^3 / s)

El termino R de la ecuación se denomina como la resistencia del conducto de ventilación o del ducto al cual se aplica.

Para que el aire fluya a través de la mina, es necesario que exista una diferencia de presión entre la entrada y la salida. La diferencia de presiones se debe a causas Naturales (gradiente térmica) o inducida artificialmente por medios mecánicos mediante el uso de ventiladores. La diferencia de presiones se debe a la imposición

de alguna forma de presión en un punto, o en una serie de puntos en el Sistema de Ventilación.

Para que circule el aire debe proporcionarse galerías para la entrada y salida del aire. Para que circule el aire a través de la mina, es necesario que la energía que dispone la corriente de aire, deberá ser mayor que la energía requerida para vencer la resistencia del conjunto de labores que constituye la mina y que definen los circuitos de ventilación.

La presiones de la ventilación de minas, con respecto a la presión atmosférica, puede ser positiva (impelente) o negativa (Extractoras).

Ejemplo;

1. Calcular la pérdida de presión cuando $4 \text{ m}^3 / \text{s}$ de aire circula a través de un ducto que cuenta con una resistencia de $9.3 \text{ N s}^3 / \text{m}^8$.

$$Q = 4 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$R = 9.3 \text{ N s}^3 / \text{m}^8$$

$$p = 149 \text{ Pa}$$

2. Calcular la pérdida de presión por un conducto de aire que circula $4 \text{ m}^3 / \text{s}$, que cuenta con una resistencia de $40 \text{ N s}^3 / \text{m}^8$.

$$Q = 4 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$R = 40 \text{ N s}^3 / \text{m}^8$$

$$p = 640 \text{ Pa}$$