

Juan Herrera Herbert

Ventiladores para minería subterránea.

Diseño, selección y aplicaciones.

Curso de “Tecnologías y Desarrollos Avanzados en Ventilación de Espacios Subterráneos”

Madrid - 2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior
de Ingenieros de Minas y Energía

www.minasyenergia.upm.es



Ventiladores para minería subterránea. Diseño, selección y aplicaciones.

Autor: Juan Herrera Herbert (juan.herrera@upm.es).

ADVERTENCIA

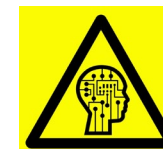
El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.



Nota:
Uso responsable de herramientas IA.

Recurso docente desarrollado con fuentes documentales del Mining Technology Innovative Lab y el apoyo de diversas herramientas de IA en el ámbito del Proyecto de Innovación Educativa "*Fortalecimiento del Conocimiento y Uso Ético de la Inteligencia Artificial en el Entorno Universitario*" y financiación del Proyecto de Investigación *I2MINTECH Project*.



Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
Laboratorio de Tecnologías Mineras

Calle Ríos Rosas 21
28003 Madrid (España)



Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner.
Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.

Alcance y objetivos

- Esta presentación aborda de forma técnica y aplicada el uso de ventiladores en sistemas de ventilación minera, cubriendo desde los principios fundamentales hasta aspectos avanzados como la selección, regulación, instalación y mantenimiento.
- Se consideran diferentes tipos de ventiladores (axiales, centrífugos, de flujo mixto) y su integración eficiente en el circuito de ventilación subterráneo.
- Objetivos específicos
 - Comprender el funcionamiento físico de los ventiladores y su función en el sistema de ventilación minera.
 - Identificar y clasificar los distintos tipos de ventiladores usados en minería.
 - Analizar los fundamentos técnicos: caudal, presión, resistencia, rendimiento, curvas características.
 - Explicar la adaptación del ventilador al circuito y su impacto en la eficiencia del sistema.
 - Conocer los métodos de regulación del caudal y presión según el tipo de ventilador.
 - Aplicar las leyes de los ventiladores para el escalado, análisis de rendimiento y selección adecuada.
 - Establecer criterios para la elección técnica y económica del ventilador más apropiado.
 - Reconocer las buenas prácticas de instalación, mantenimiento y seguridad.

Introducción al concepto de ventiladores

- Un ventilador es un equipo electromecánico diseñado para movilizar aire o gases, generando una diferencia de presión que permite su desplazamiento:
 - Inducen el movimiento del aire a través de un circuito, a base de crear un cierto incremento de presión que compensa las pérdidas que se generan en el mismo.
 - Para realizar este trabajo el ventilador requiere de una potencia en el eje del motor que lo acciona que viene dada por la expresión:

$$Potencia [wattios] = \frac{Caudal [m^3 / s] \times Presión Total [Pa]}{\eta_{ventilador} [\%]}$$

- El ventilador es parte esencial de un sistema de ventilación en minería subterránea.
- Existen también otras máquinas destinadas a elevar la presión del aire, que reciben distintos nombres según el rango de presiones de trabajo y su campo de aplicación:
 - Ventiladores: <100 mbar
 - Soplantes: 100-2000 mbar
 - Compresores: >2000 mbar

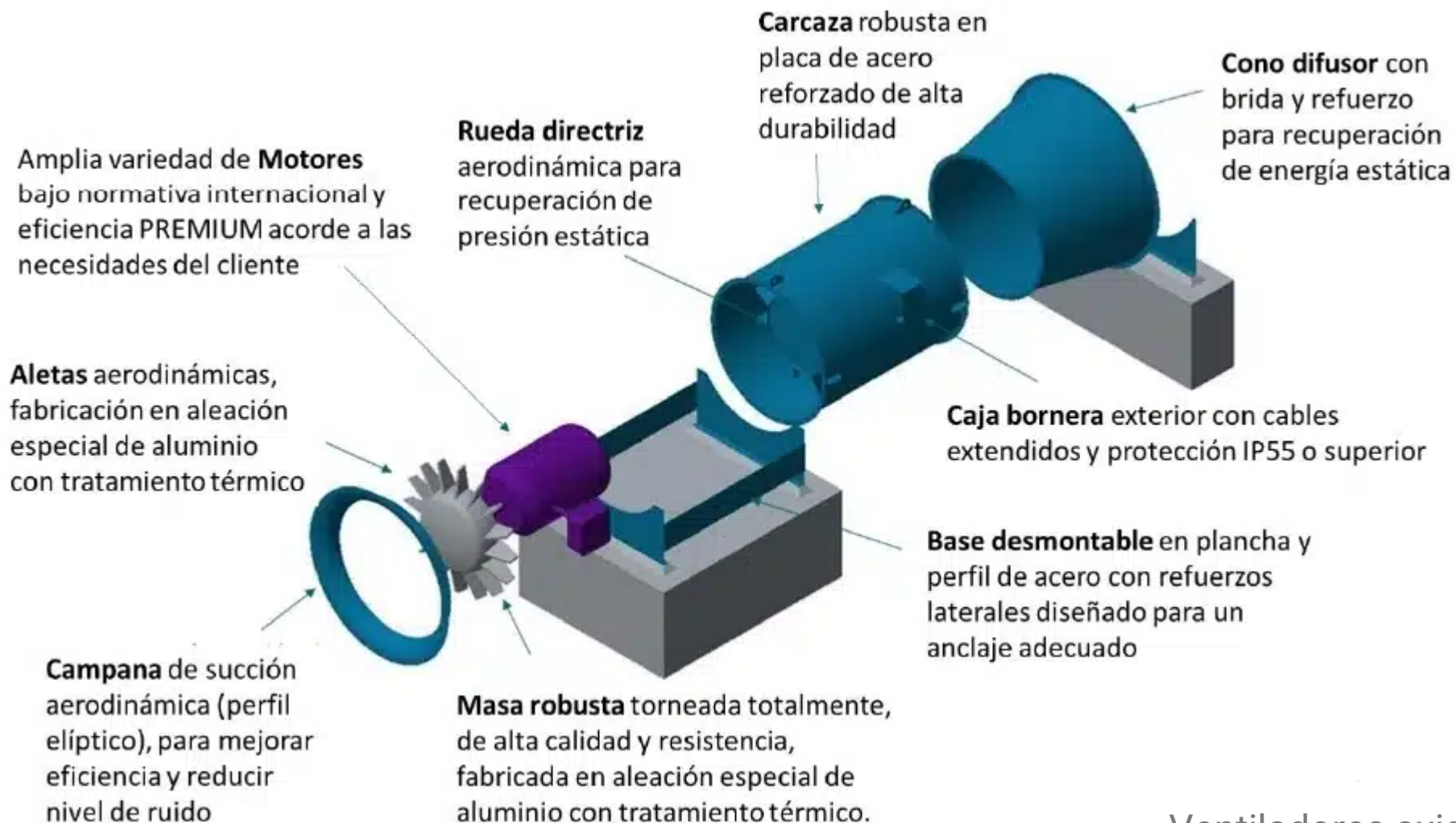
- Una correcta **selección, operación y mantenimiento** de ventiladores es fundamental para **garantizar un caudal de aire suficiente y estable**, en función del tamaño del circuito, la profundidad de la mina, los equipos utilizados y las condiciones ambientales.
 - Un ventilador mal dimensionado puede generar **zonas mal ventiladas**, acumulación de gases peligrosos o ineficiencia energética.
 - Una **operación adecuada de los ventiladores** permite ajustar el flujo de aire según las necesidades de cada etapa del trabajo (perforación, carga, sostenimiento, etc.).
 - El **mantenimiento preventivo** evita fallos mecánicos, vibraciones, pérdidas de eficiencia o paradas no programadas.
- Todo esto repercute directamente en:
 - La **seguridad de los trabajadores**
 - La **eficiencia energética del sistema**
 - La **vida útil del equipo**



- Los ventiladores pueden clasificarse según su función en el sistema:
 - **Ventiladores principales:**
 - Instalados en superficie,
 - Mueven el aire en todo el sistema subterráneo.
 - Son de gran capacidad y están diseñados para funcionar de forma continua.
 - **Ventiladores secundarios:**
 - Se ubican en galerías intermedias, ramales o galerías profundas.
 - Complementan el flujo del ventilador principal en zonas más alejadas o ramificadas donde el aire no llega con suficiente fuerza.
 - Pueden operar en serie con los principales.
 - **Ventiladores auxiliares:**
 - De menor tamaño y a menudo portátiles, son compactos y de menor potencia.
 - Se utilizan de forma temporal en labores puntuales en frentes de trabajo o labores de desarrollo (perforación, fortificación) o para tareas de emergencia.
 - Conectados mediante conductos flexibles.
- Cada uno juega un papel específico y **su correcta integración garantiza la homogeneidad del flujo de aire en todo el circuito.**

Fundamentos de los ventiladores

- Los ventiladores tienen como función mover aire en grandes volúmenes a través de galerías subterráneas.
- Funcionan generando una presión diferencial que impulsa el aire desde una zona de mayor presión hacia una de menor presión.
- Básicamente, un ventilador transforma energía mecánica (del motor) en energía cinética y presión del aire, impulsándolo a través del circuito de ventilación.
- Principios físicos básicos involucrados:
 - Movimiento de fluidos (aire): el aire responde a los principios de la dinámica de fluidos compresibles, y su comportamiento depende del tipo de flujo, presión, temperatura y densidad.
 - Generación de presión diferencial: los ventiladores crean una diferencia de presión entre su entrada y su salida, lo que fuerza al aire a desplazarse a través del sistema de ventilación.
 - Transferencia de energía mecánica: las palas del ventilador transfieren energía al aire, incrementando su velocidad y presión. Esta energía puede perderse en parte por rozamientos internos y resistencia del sistema.



Ventiladores axiales Howden

Flujo de aire a través del ventilador

- El aire pasa por distintas etapas dentro del ventilador: entrada, aceleración por el rotor, y salida. La forma de las aspas y el tipo de ventilador influyen directamente en la **velocidad, dirección y presión** del flujo.
- Tipos de flujo en ventiladores
 - **Flujo axial:** El aire se desplaza paralelo al eje del ventilador. Común en ventiladores axiales. Alta capacidad de caudal, pero limitada capacidad de presión.
 - **Flujo radial (centrífugo):** El aire entra axialmente y se expulsa radialmente. Se utiliza cuando se necesita vencer altas resistencias. Más eficiente en condiciones de alta carga.
 - **Flujo mixto:** Combinación de los dos anteriores. Las trayectorias del aire son parcialmente radiales y axiales. Ofrece equilibrio entre presión y caudal.

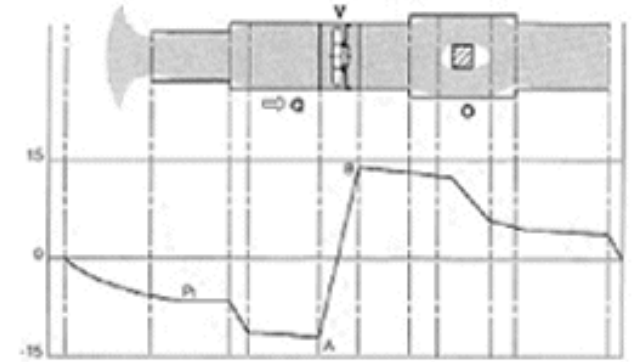


Pérdidas de presión por rozamiento

- A medida que el aire circula por el sistema de ventilación (tuberías, conductos, galerías), sufre **pérdidas de presión** debido al **rozamiento** contra las paredes, obstáculos y cambios de sección.
- Estas pérdidas deben ser vencidas por la energía suministrada por el ventilador.

Resistencia del circuito ventilatorio:

- La **resistencia del sistema** depende de la geometría de las galerías, la rugosidad de las superficies, la longitud del trayecto, los elementos que interfieren en el flujo y el número de ramales.
- Esta resistencia define la **curva característica del sistema**, que debe compararse con la curva del ventilador para una correcta selección.



Potencia y rendimiento de un ventilador:

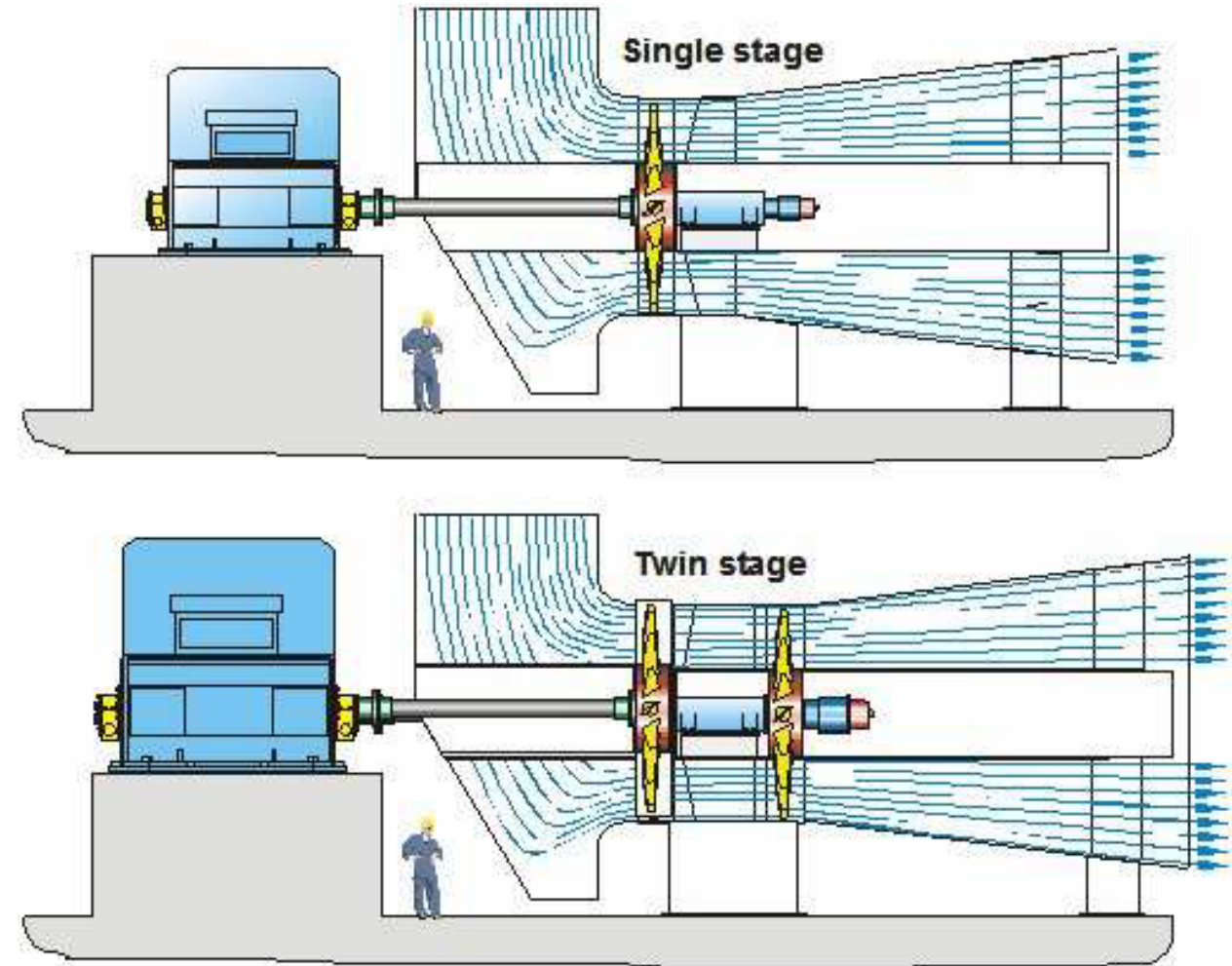
- **Potencia teórica o de fluido (P_f):** Energía que el ventilador transfiere al aire.
- **Potencia al eje (P_e):** Potencia entregada al eje del ventilador, considerando pérdidas mecánicas.
- **Potencia absorbida:** Energía eléctrica o térmica consumida por el motor.
- **Rendimiento total (η_t):** Relación entre la potencia útil y la potencia absorbida.
- **Rendimiento mecánico (η_m):** Relación entre la potencia al eje y la absorbida por el motor.
- **Rendimiento manométrico (η_{man}):** Mide la eficiencia con que se genera presión útil en el sistema.
- **Rendimiento global:** Resultado del producto de todos los rendimientos parciales.

Tipos y clasificación de los ventiladores

- En función de cómo mueven el aire, se distinguen tres tipos principales:
 - **Centrífugos:** El aire entra por el centro y se impulsa radialmente. Ideales para superar **altas resistencias** del sistema. Mayor presión, menor caudal.
 - **Axiales:** El flujo de aire es paralelo al eje del ventilador. Recomendados para **grandes caudales con menor pérdida de carga**. Suelen utilizarse como ventiladores principales o secundarios.
 - **De flujo mixto:** Combinan características de los dos anteriores. Su uso ha aumentado por su **versatilidad y buen rendimiento intermedio**.
- Según su forma constructiva, un ventilador puede ser:
 - **Horizontal**, los más usuales.
 - **Vertical**, más aconsejables donde la configuración vertical reduce las pérdidas de carga del circuito.



- Según el tipo de accionamiento: un ventilador puede ser accionado:
 - Directamente por el motor (el caso más frecuente).
 - Por medio de un eje de transmisión cardan, utilizado en algunas aplicaciones cuando el aire a extraer es corrosivo o potencialmente explosivo, o simplemente para optimizar las tareas de mantenimiento del motor.
 - Por medio de poleas/correa (en desuso por su bajo rendimiento).
- En función del número de etapas o escalones:
 - Una sola etapa, aptos para la mayoría de las aplicaciones.
 - Con dos escalones, para aplicaciones con presiones muy elevadas (más de 5000 Pa) que no se consiguen con un ventilador de un solo escalón.



- Según la función que va a realizar el ventilador:
 - De extracción de aire viciado (imagen A): deben de estar preparados, según la aplicación, para extraer aire abrasivo, humos calientes o gases explosivos, por lo que su protección en conjunto es más rigurosa.
 - De impulsión de aire fresco (imagen B): Son generalmente los más sencillos, ya que solo movilizarán aire limpio.



- Según su modo de operación:
 - De velocidad fija:
 - Funcionan a régimen constante.
 - Son simples, pero menos eficientes ante cambios de demanda.
 - De velocidad variable (VSD):
 - Su velocidad se ajusta a la demanda real de aire.
 - Permiten ahorro energético y mejor control del sistema.

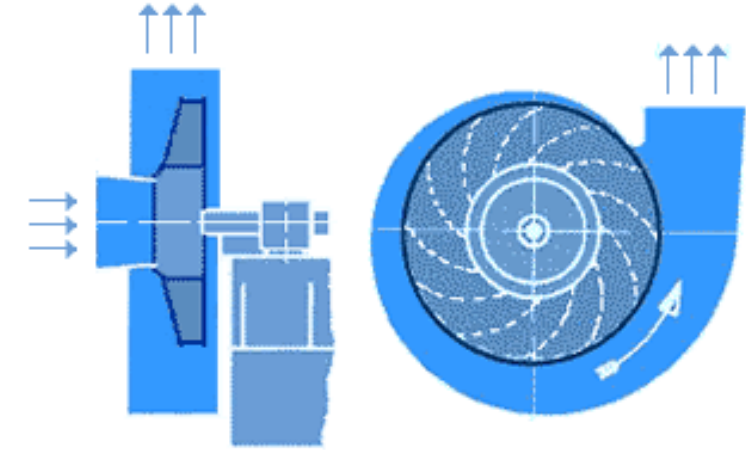
- Según su instalación y movilidad:
 - Fijos: instalados permanentemente en estructuras de la mina o en superficie.
 - Portátiles:
 - Usados en ventilación auxiliar o zonas de acceso temporal.
 - Ligereza y facilidad en su manipulación son aspectos clave.

Clasificación de los ventiladores

- Los ventiladores se dividen en los siguientes tipos:
 - **Ventiladores centrífugos (radiales).**
 - El flujo de aire entra axialmente y sale perpendicular (radialmente) al eje.
 - Generan mayores presiones, adecuados para sistemas con alta resistencia.
 - Más robustos, pero menos compactos.
 - Usados en instalaciones permanentes y zonas con complejidad de ventilación.
 - **Ventiladores axiales.**
 - El flujo de aire es paralelo al eje de rotación.
 - Ideales para mover grandes volúmenes de aire con baja a moderada presión.
 - Son comunes en ventilación principal y auxiliar.
 - Ejemplos: ventiladores de túnel, boosters.
 - **Ventiladores de flujo mixto.**
 - Combinan las características de axiales y centrífugos.
 - Ofrecen un buen equilibrio entre caudal y presión.
 - Utilizados en soluciones específicas donde se requiere versatilidad.
 - **Ventiladores de hélice.**
- Para cada uno de estos tipos se pueden disponer con variedad de posiciones de descarga y distintos tipos de accionamiento del rodete.

Ventiladores centrífugos

- También llamados ventiladores radiales, son dispositivos que aumentan la presión del aire y lo impulsan perpendicularmente al eje de rotación, gracias a la acción de la fuerza centrífuga generada por un rodete giratorio.
- Consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral:
 - El aire, que entra axialmente en línea recta por el centro del ventilador (a través del ojo del rotor o rodete) paralelo a la flecha del ventilador.
 - Las palas del rodete giran rápidamente, aplicando fuerza centrífuga.
 - El aire es acelerado radialmente hacia el exterior del rodete.
 - Luego pasa por una voluta (carcasa en espiral) que convierte la velocidad en presión.
 - El aire, al ser succionado por el rotor y arrojado contra la envolvente se descarga por la salida en ángulo recto a la flecha.



Características principales:

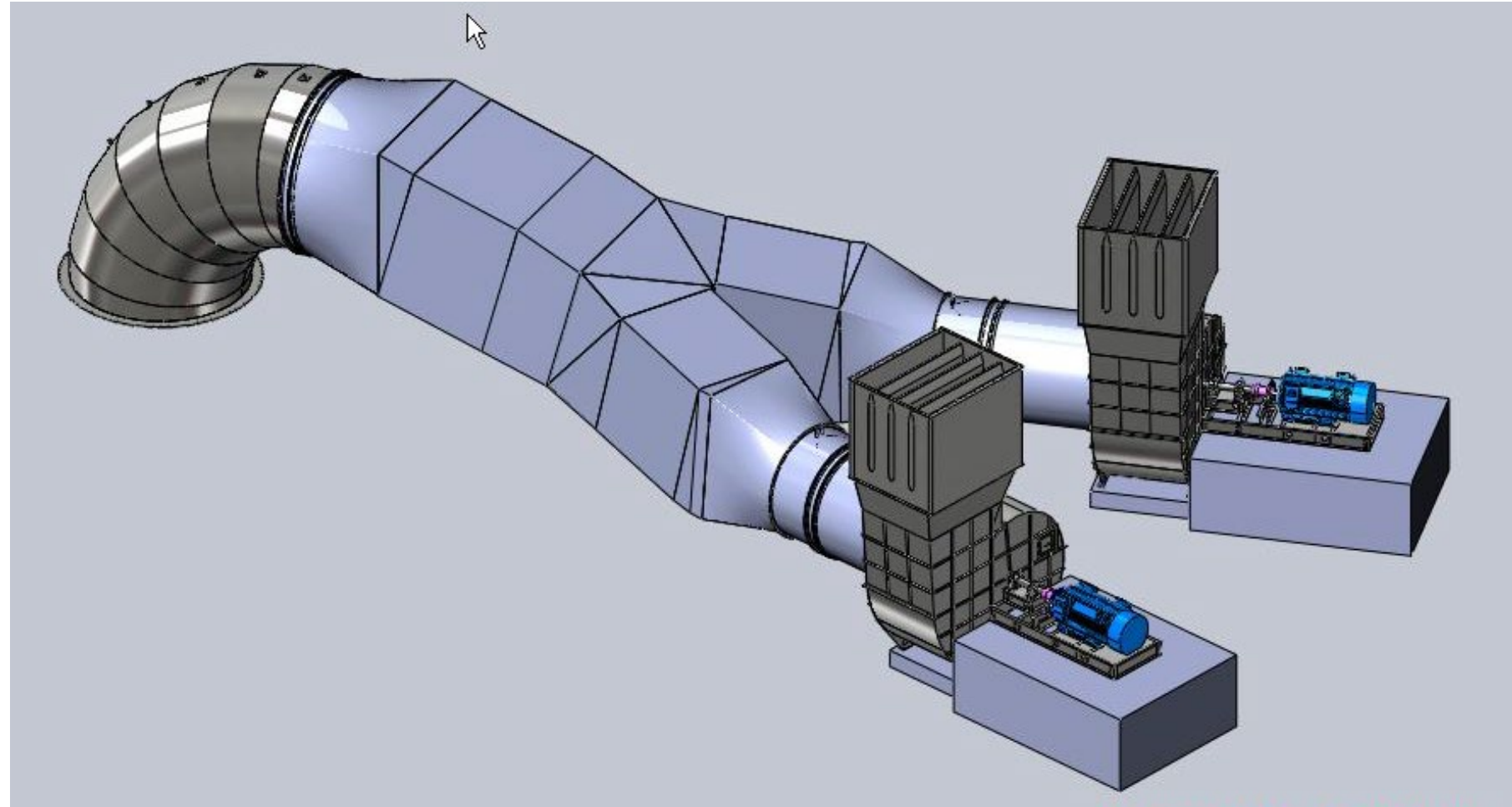
- Alta presión: generan más presión que los ventiladores axiales. Son ideales para redes de ventilación con muchas pérdidas de carga (fricción, curvas, cambios de sección).
- Menor caudal comparado con ventiladores axiales del mismo tamaño.
- Funcionamiento estable: muy eficientes en aplicaciones con resistencia variable.
- Diseño robusto: resistentes al polvo, a altas temperaturas y a contaminantes presentes en el aire de minas.
- Puede ser de entrada sencilla o de entrada doble.

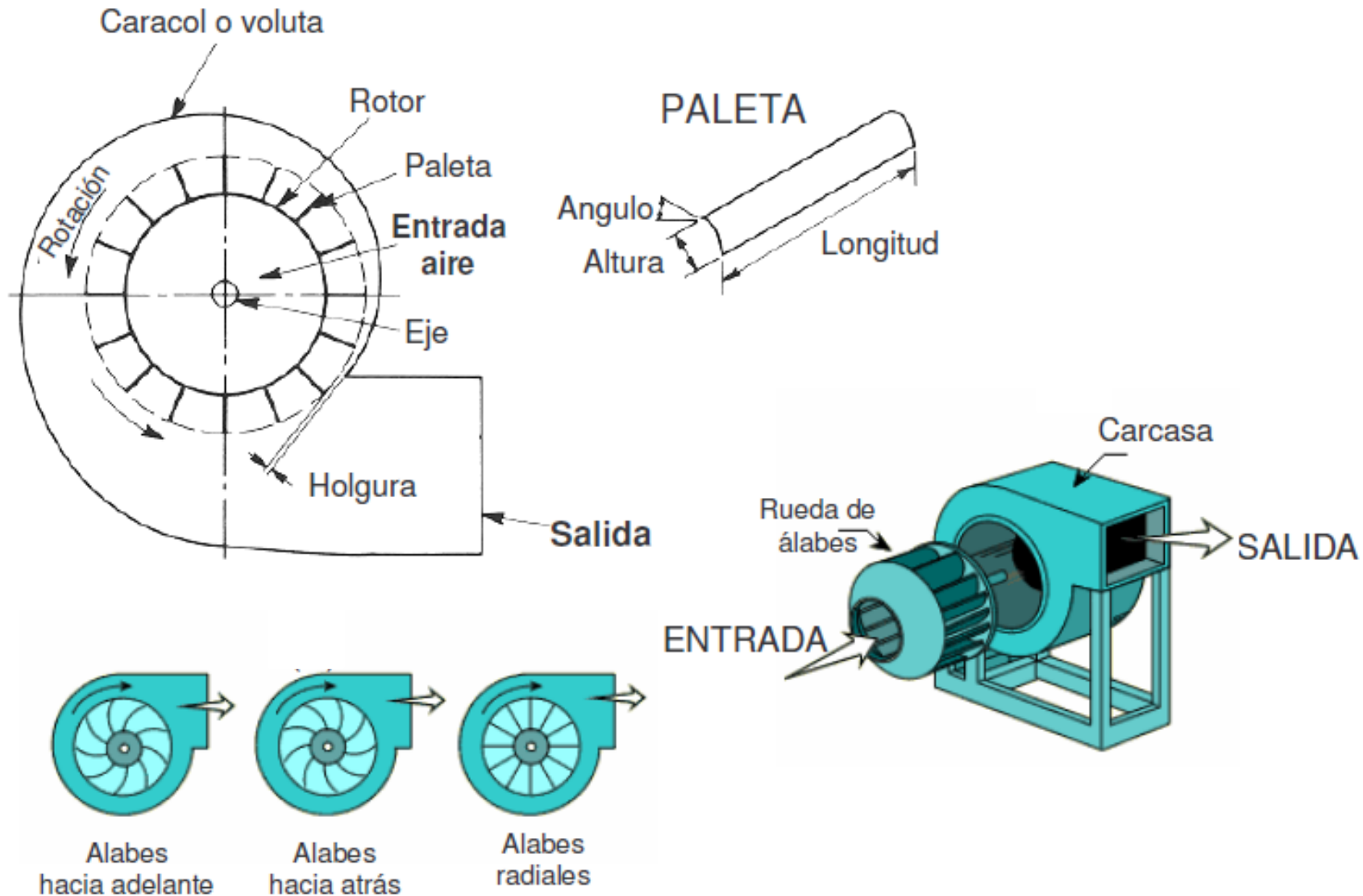
Desventajas:

- Estos ventiladores tienen un rendimiento bajo fuera del punto de diseño.
- Su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal: riesgo de sobrecarga.
- Son bastante inestables funcionando en paralelo debido a su característica caudal-presión.



- Son muy usados en minería para mover aire a través de redes con alta resistencia.
 - Extracción de aire en minas profundas o con redes complejas.
 - Ventilación principal o secundaria donde se requiera vencer una gran resistencia del circuito.
 - Aspiración de polvo o gases pesados.

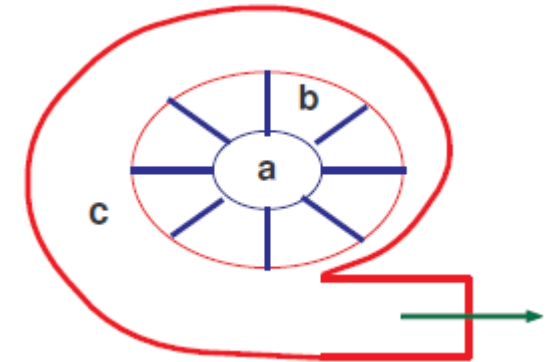




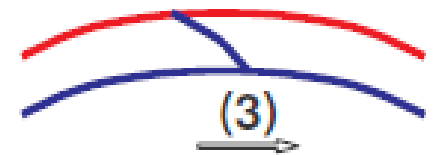
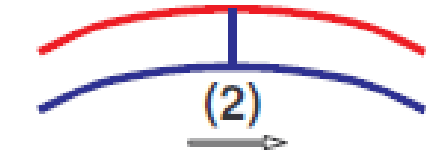
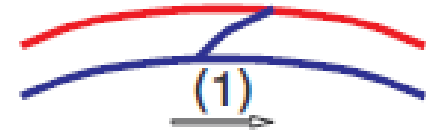
- Tipos según orientación de las palas
 - Palas curvas hacia adelante: bajo nivel de ruido, alto caudal, pero menos eficientes.
 - Palas rectas (radiales): muy resistentes a la suciedad. Útiles en condiciones severas.
 - Palas curvas hacia atrás: mayor eficiencia energética y menor consumo. Muy usados en minería.

Ventiladores radiales o centrífugos

- El aire entra en la dirección del eje y sale perpendicular a él.
- **Oído de entrada:**
 - Simple
 - Doble (a ambos lados)
- **Rueda de alabes:** Rueda hueca con gran número de paletas (doble en los de doble entrada).
- **Disposición de las paletas:**
 - (1) Hacia adelante:
 - Menos ruidosos y voluminosos.
 - Para condiciones de trabajo más o menos fijas (instalaciones de aire acondicionado)
 - Rendimiento volumétrico inferior al 65%.
 - (2) Radiales:
 - Autolimpiantes (por ejemplo, cuando el aire lleva partículas en suspensión).
 - (3) Hacia atrás:
 - Para condiciones de trabajo variables (circuito de ventilación principal de una mina)
 - Rendimiento volumétrico inferior al 95%.



- (a) Oído de entrada
- (b) Rueda de alabes
- (c) Caracol o voluta



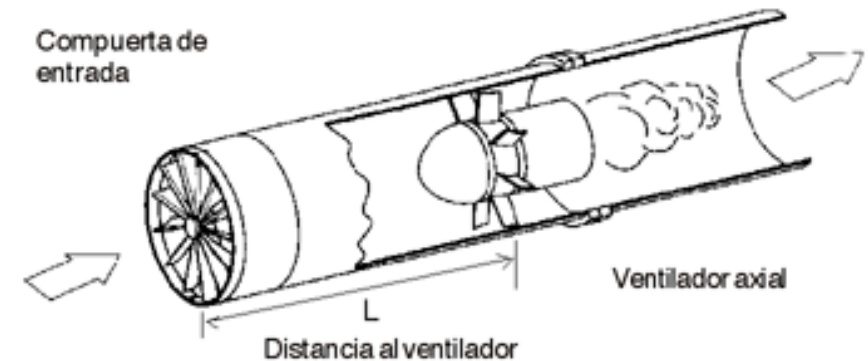






Ventiladores axiales

- Son dispositivos que impulsan el aire en dirección paralela al eje del ventilador: el aire entra y sale en línea recta.
- Consiste esencialmente en un rodete alojado en una envolvente cilíndrica o carcasa, que "empuja" el aire hacia adelante.
- Funcionamiento básico
 - El rotor con aspas gira, generando una presión que impulsa el aire.
 - El flujo se mantiene alineado al eje del ventilador (flujo axial).
 - Se suelen usar con difusores o carcasas para mejorar el rendimiento.



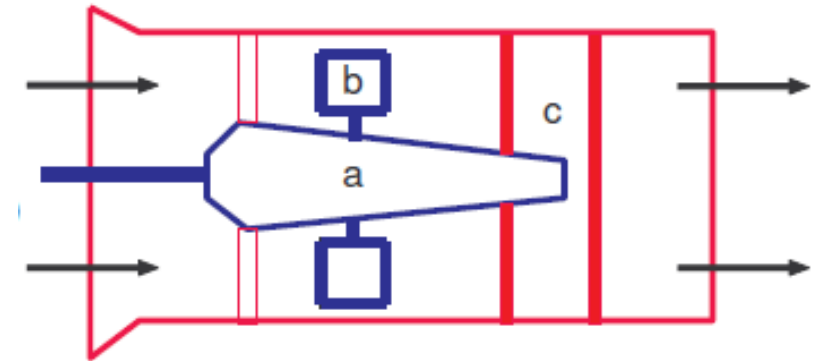
Características principales

- Mueven un alto caudal de aire y grandes volúmenes rápidamente.
- Presiones de bajas a moderadas, por lo que tienen menor capacidad para vencer resistencias altas (en comparación con los centrífugos).
- Tienen una alta eficiencia energética, especialmente en trayectos directos y sin muchas curvas.
- Tienen tamaños compactos, por lo que permiten un ahorro de espacio y una fácil integración en galerías o túneles.
- Pueden ser reversibles, ya que algunos modelos pueden invertir el flujo para situaciones de emergencia.
- Pueden funcionar en un amplio rango de volúmenes de aire, a presiones estáticas que van de bajas a moderadamente altas.
- Pueden desarrollar mayores presiones estáticas que el ventilador centrífugo a la vez que es mucho más eficiente.
- Ofrecen mejor eficiencia en un amplio rango de puntos de funcionamiento, mientras que los ventiladores centrífugos pueden tener un rendimiento muy alto, pero solamente sobre un rango muy reducido, y sólo sobre una curva característica.
- Tienen mayor rendimiento mecánico que los centrífugos.
- Un ventilador axial, para las mismas prestaciones de presión y caudal, requiere menor espacio físico que un ventilador centrífugo, ya que por el diseño puede utilizar motores de mayor velocidad.
- Tienen más versatilidad en la regulación que un ventilador centrífugo.



Ventiladores axiales

- El aire entra y sale en dirección axial.
- **Rotor:** Puede ser
 - Sencillo ($\Delta P < 30$ mbar)
 - Múltiple ($\Delta P > 30$ mbar)
- **Paletas:**
 - ΔP y Q aumentan con la anchura de las paletas.
 - $Q \sim L^2$ (L: Longitud de las paletas)
 - A mayor elevación de presión, mayores pérdidas por recirculación de aire en la periferia y en el centro (menor rendimiento volumétrico). Por consiguiente:
 - Mayor número de paletas.
 - Mayor diámetro de rotor y paletas más cortas.
 - Pequeñas tolerancias entre paletas y carcasa.
 - Las paletas pueden ser orientables:
 - Individual o conjuntamente.
 - Con el ventilador parado o en marcha.
- La adición de álabes-guía, detrás del rotor, convierte al ventilador turbo-axial en un ventilador axial con aletas guía.

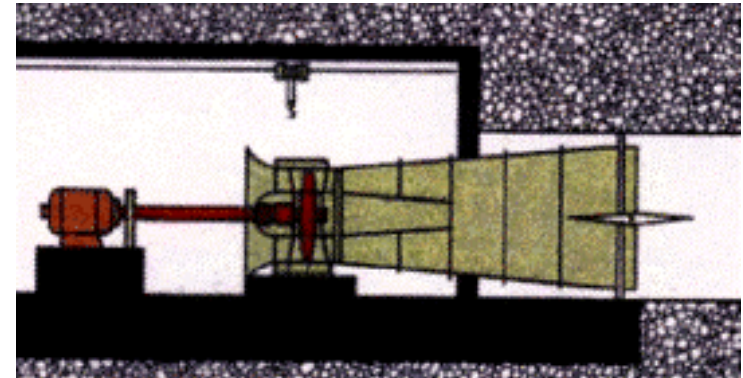


- (a) ROTOR.
- (b) PALETAS.
- (c) DISTRIBUIDOR.





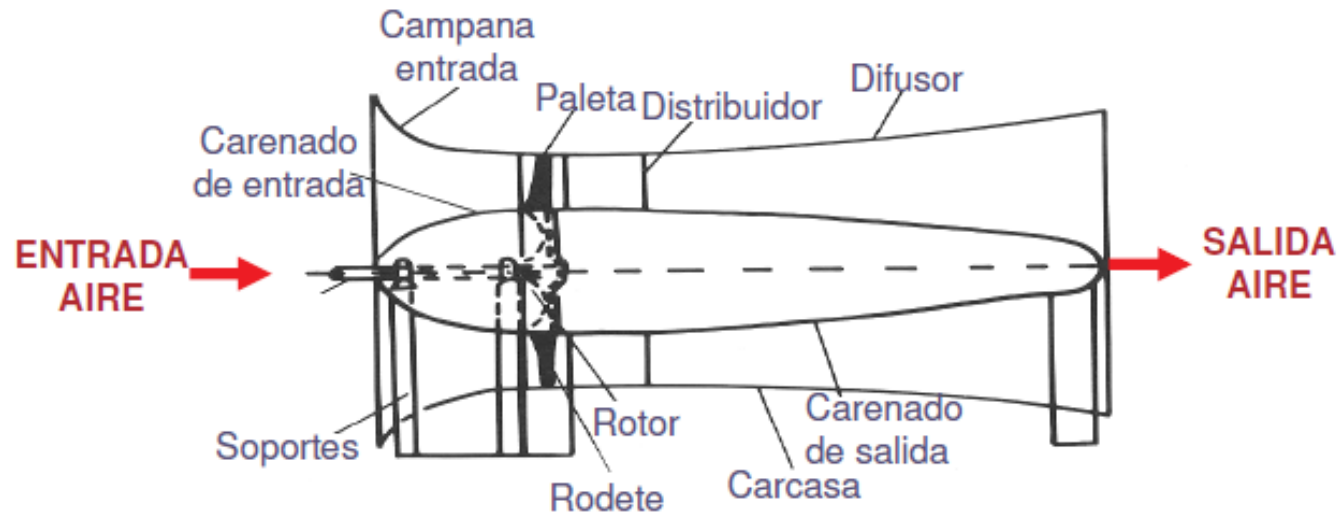
- Son ampliamente utilizados en minería por su alto caudal y eficiencia en trayectos rectos:
 - Ventilación principal o secundaria en galerías con trayectos rectos y largos.
 - Control de temperatura, gases tóxicos y polvo.
 - Comúnmente montados en superficie o en puntos estratégicos de extracción o inyección de aire.
 - También se emplean en ventilación auxiliar (frentes de trabajo, ramales de menor sección).





■ Distribuidor:

- Conjunto de álabes fijos que reconducen el flujo y evitan remolinos.
- Características:
 - Rendimiento volumétrico: 0'75-0'9
 - Reversibles aunque con menor rendimiento.
 - Regulables variando la orientación de las paletas.
 - Ruidosos.
 - Pequeños y fáciles de instalar.
 - Utilizados en ventilación principal y secundaria.

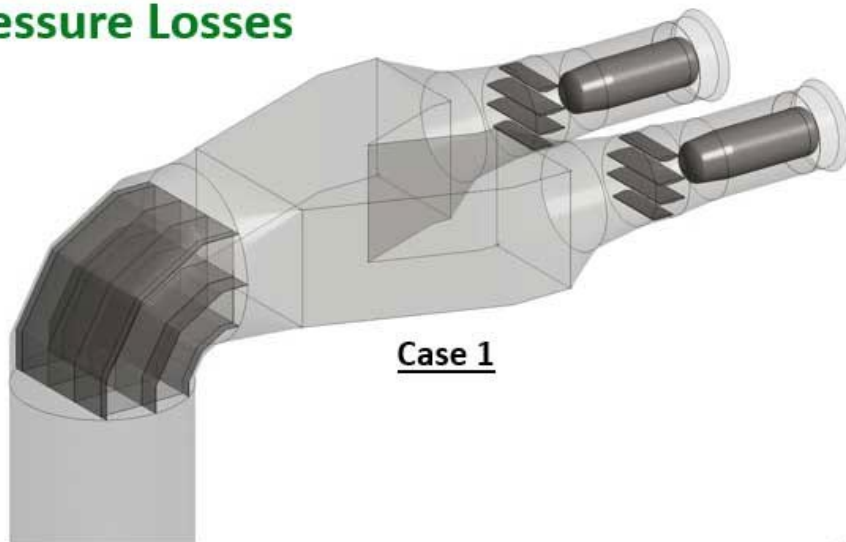




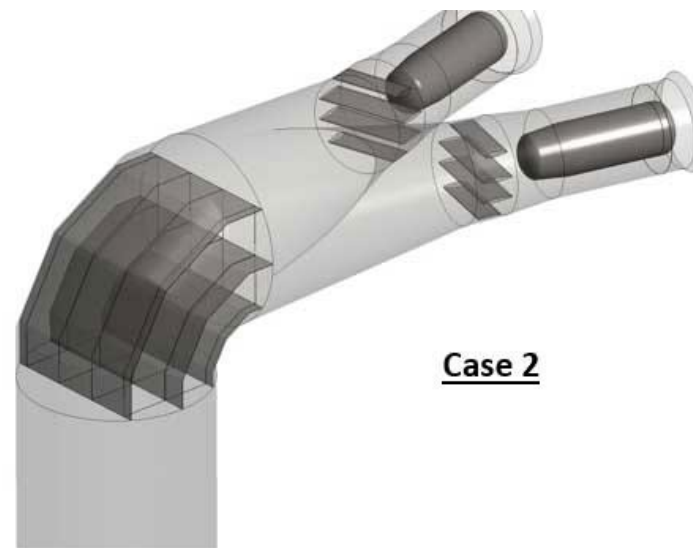
Comparación rápida entre ventiladores axiales y centrífugos

| Ventilador Axial | Ventilador Centrífugo |
|------------------|---|
| Alto caudal | Mayor presión |
| Baja resistencia | Ideal para circuitos con alta resistencia |
| Menor coste | Mayor eficiencia en redes complejas |

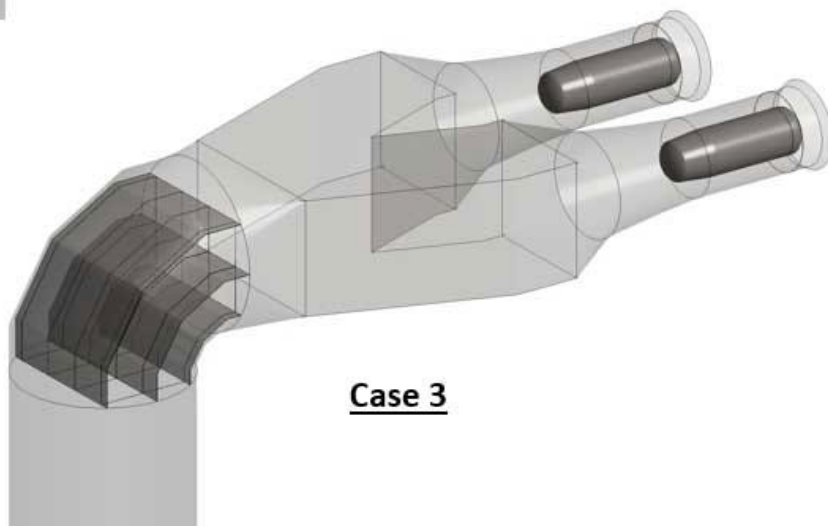
Pressure Losses



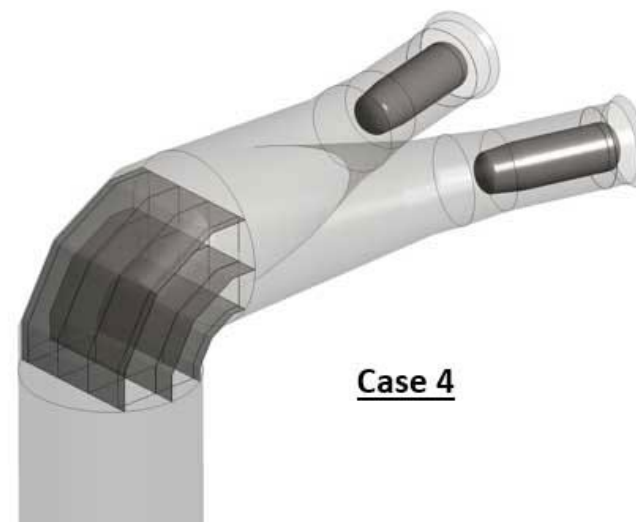
Case 1



Case 2



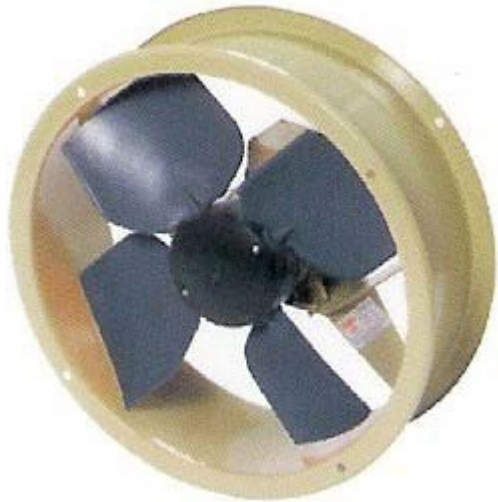
Case 3



Case 4

Fuente: Zitron

Ventilador de hélice



- Aunque se parecen a los ventiladores axiales, no son lo mismo.
- Este ventilador está formado por un rodete dentro de un anillo o carcasa de montaje.
- La dirección de la corriente de aire es paralela a la flecha del ventilador.
- Se emplea para movilizar aire en circuitos cuya resistencia es muy pequeña.
- Puede manejar grandes volúmenes de aire a una presión estática baja.
- Todos los ventiladores de hélice son axiales, pero no todos los axiales son de hélice.
- El ventilador axial puede incorporar diseños más complejos y eficientes para aplicaciones exigentes como en minería, mientras que el de hélice es más básico y se usa en aplicaciones simples de ventilación local o auxiliar.

Diferencias entre ventiladores axiales y ventiladores de hélice

| Característica | Ventiladores Axiales | Ventiladores de Hélice |
|-----------------------------|--|---|
| Dirección del flujo de aire | El aire fluye paralelo al eje de rotación | También axial (paralelo), pero con un diseño más simple |
| Diseño de las aspas | Aspas perfiladas, diseñadas para eficiencia aerodinámica y presión | Hélices simples, como las de un ventilador doméstico |
| Presión generada | Capaces de generar presiones moderadas (0,3–1,2 kPa) | Baja presión (0,1–0,3 kPa), adecuados solo para trayectos cortos y sin mucha resistencia |
| Eficiencia energética | Más eficientes, especialmente en configuraciones con carcasa y difusores adecuados | Menor eficiencia si no se usan difusores o carcasas |
| Aplicaciones típicas | Ventilación principal y secundaria en minería, túneles, industria | Ventilación auxiliar, extracción localizada, espacios abiertos o sin conductos |
| Coste y mantenimiento | Más costosos en general; requieren más mantenimiento | Más económicos y sencillos de mantener |
| Instalación | Se instalan generalmente dentro de conductos o túneles con diseño aerodinámico | Pueden ir en espacios abiertos o bocas de conducciones sin necesidad de estructuras complejas |

Ventiladores de flujo mixto

- Los ventiladores de flujo mixto combinan características de los ventiladores axiales y centrífugos:
 - El flujo de aire atraviesa el ventilador con una dirección intermedia entre axial y radial, es decir, el aire sale en un ángulo oblicuo respecto al eje.
 - Esta configuración permite aprovechar las ventajas de ambos tipos: buena capacidad de generar presión y mover un caudal significativo.

Características constructivas y funcionamiento:

- Son un impulsor de flujo axial modificado para generar un componente radial de flujo, que se suma al flujo espiral
- El rotor tiene aspas curvadas, diseñadas para impulsar el aire en una dirección mixta (ni totalmente axial ni totalmente radial).
- Se genera presión dinámica mediante el giro del impulsor, con salida angular del aire.
- Suelen estar montados en carcasas especiales que guían el flujo y aumentan el rendimiento.



<https://www.solerpalau.co/>

Ventajas:

- ✓ Inyectan y/o extraen aire en una forma más lineal.
- ✓ Dan lugar a un caudal moderado-alto: buen compromiso entre cantidad de aire y capacidad para vencer resistencia.
- ✓ Generan una presión media, algo mayor que los axiales, pero menor que los centrífugos.
- ✓ Son eficientes y consumen menos energía. Mayor eficiencia en sistemas con pérdidas de carga moderadas.
- ✓ Tienen un coste de operación más bajo.
- ✓ Requieren menos RPMs para alcanzar el mismo flujo de aire y presión que un ventilador centrífugo.
- ✓ Tienen un reducido nivel de ruido.
- ✓ Son más adaptables y garantizan un rendimiento óptimo en diferentes entornos.
- ✓ Diseño más compacto que los centrífugos para la misma presión.

Aplicaciones en minería:

- ✓ Pueden ser útiles como ventiladores principales, secundarios o auxiliares.
- ✓ En ventilación auxiliar o secundaria, particularmente utilizables en redes de ventilación con trayectos largos y moderada complejidad.
- ✓ Son muy adecuados cuando se necesita flexibilidad entre presión y caudal.
- ✓ Son eficientes en ventilación de frentes de trabajo, túneles en desarrollo, o zonas con geometría variable.

Factores claves al elegir un ventilador

A la hora de seleccionar el ventilador requerido, es esencial considerar:

- **Caudal o volumen de aire requerido** en la mina.
- Longitud y diámetro de los conductos, así como la presencia de curvas y bifurcaciones que generan resistencia al flujo de aire.
- **Presión** que el ventilador debe generar para vencer la resistencia del sistema de ductos y superar obstáculos.
- Material de fabricación.
- **Tamaño y tipo de arranque del motor**, para proporcionar la potencia necesaria para mover el volumen de aire requerido a la presión deseada.
- Normativas de seguridad y certificaciones, para contribuir a un ambiente de trabajo más confortable y productivo.
- **Condiciones ambientales.**
- Variables técnicas (coeficientes de fricción, pérdidas de choque, diámetro de la carcasa, velocidad del eje nominal, etc.).
- **Influencia del método de explotación** sobre la ventilación.
- Facilidad de instalación y mantenimiento.



Ventiladores axiales Howden

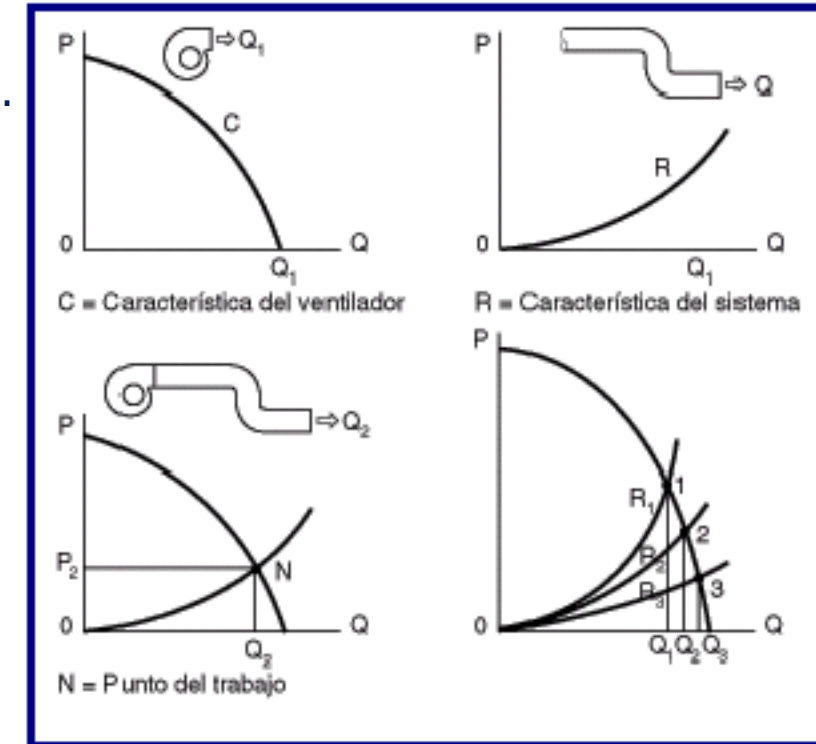
Adaptación del ventilador al circuito

- La selección de un ventilador solo puede hacerse de forma integrada con el conjunto del proyecto de ventilación:
 - No puede hacerse de forma aislada.
 - Requiere considerar las características del circuito (longitud de galerías, número de bifurcaciones, pérdidas por fricción, cambios de sección, etc.) para garantizar que el ventilador aporte el caudal necesario a la presión requerida.
- Punto de operación del ventilador
 - Es el punto donde interseccionan la curva característica del ventilador y la curva de resistencia del circuito.
 - En este punto se equilibran la presión generada por el ventilador y la presión requerida por el circuito para transportar el caudal deseado.
 - Este punto define:
 - El caudal efectivo que circula por el sistema.
 - La presión total que debe vencer el ventilador.
 - La eficiencia con la que opera el equipo.



El objetivo es que el ventilador se adapte de forma eficiente a la resistencia del sistema, maximizando su rendimiento.

- Punto de funcionamiento óptimo:
 - Es aquel en el que el ventilador opera con máxima eficiencia energética y mecánica.
 - Generalmente se encuentra cerca del centro de la curva de rendimiento del ventilador.
 - Trabajar fuera de este rango puede resultar en:
 - Mayor desgaste.
 - Ruido excesivo.
 - Consumo de energía innecesario.
 - Pérdida de vida útil del equipo.
- Influencia del sistema en la eficiencia del ventilador:
 - La red de galerías y su configuración afectan directamente la carga que enfrenta el ventilador.
 - Un circuito mal diseñado puede:
 - Generar pérdidas de presión innecesarias.
 - Alejar el punto de operación del óptimo.
 - Exigir un ventilador sobredimensionado o ineficiente.
 - Considerar la interacción sistema–ventilador como un conjunto es un aspecto crítico.

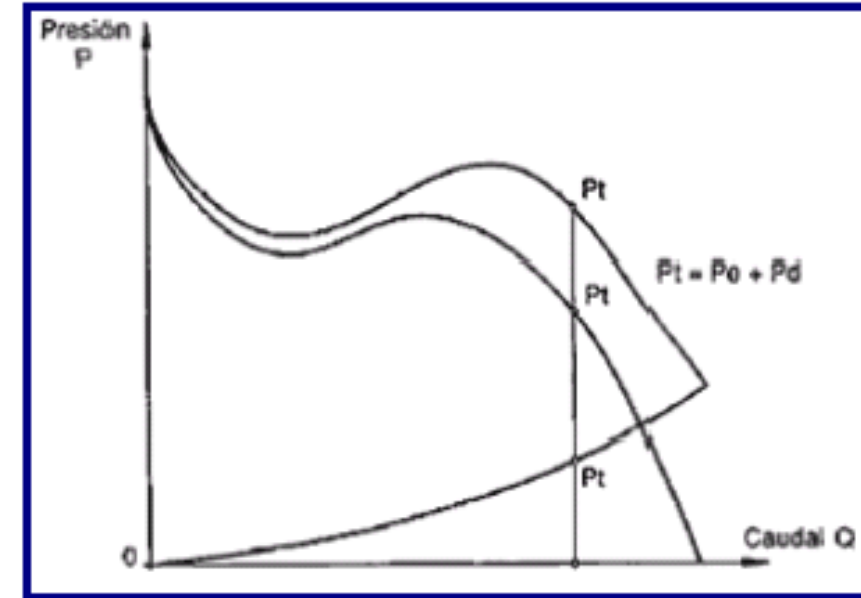


- Intersección de curvas: clave del acoplamiento
 - Curva del ventilador: Representa cómo varía la presión generada en función del caudal entregado.
 - Curva de resistencia del circuito:
 - Refleja la presión necesaria para mantener distintos caudales a lo largo del circuito.
 - Suele tener una forma cuadrática debido a la fricción.
 - La intersección de ambas curvas indica el punto de equilibrio entre lo que el ventilador puede ofrecer y lo que el sistema necesita.
- Consideraciones para un acoplamiento eficiente:
 - Seleccionar ventiladores cuyas curvas características se ajusten al comportamiento real del sistema.
 - Evaluar variaciones del circuito (puertas, obstrucciones, cambios de sección).
 - Contar con sistemas de regulación (palas orientables, variadores de frecuencia) para ajustar el punto de operación ante cambios en la demanda.
 - Realizar un monitoreo periódico del punto de funcionamiento.



Curva característica de un ventilador

- Es una representación gráfica de su comportamiento operativo frente a distintas condiciones de caudal de aire.
- Permite visualizar cómo varían parámetros clave como la presión generada, potencia requerida y eficiencia en función del caudal (Q).
- Las curvas más comunes que se grafican para un ventilador incluyen:
 - **Presión total (P_t) y Caudal (Q):** muestra la presión total que el ventilador puede generar para diferentes flujos de aire. Disminuye a medida que el caudal aumenta.
 - **Presión estática (P_s) y Caudal (Q):** refleja la presión disponible para vencer la resistencia del sistema. También tiende a disminuir con mayor caudal.
 - **Potencia al eje (P_e) y Caudal (Q):** indica cuánta energía mecánica requiere el ventilador para generar distintos caudales. Suele aumentar con el caudal.
 - **Rendimiento (η) y Caudal (Q):** mide la eficiencia con la que el ventilador convierte la energía en movimiento de aire útil. Tiene forma de campana, con un **pico en el punto de mayor eficiencia**.



■ Interpretación de la curva:

- Permite predecir el comportamiento del ventilador en diferentes puntos de operación.
- Ayuda a identificar el punto óptimo de eficiencia.
- Muestra el efecto de restricciones o variaciones en el sistema.

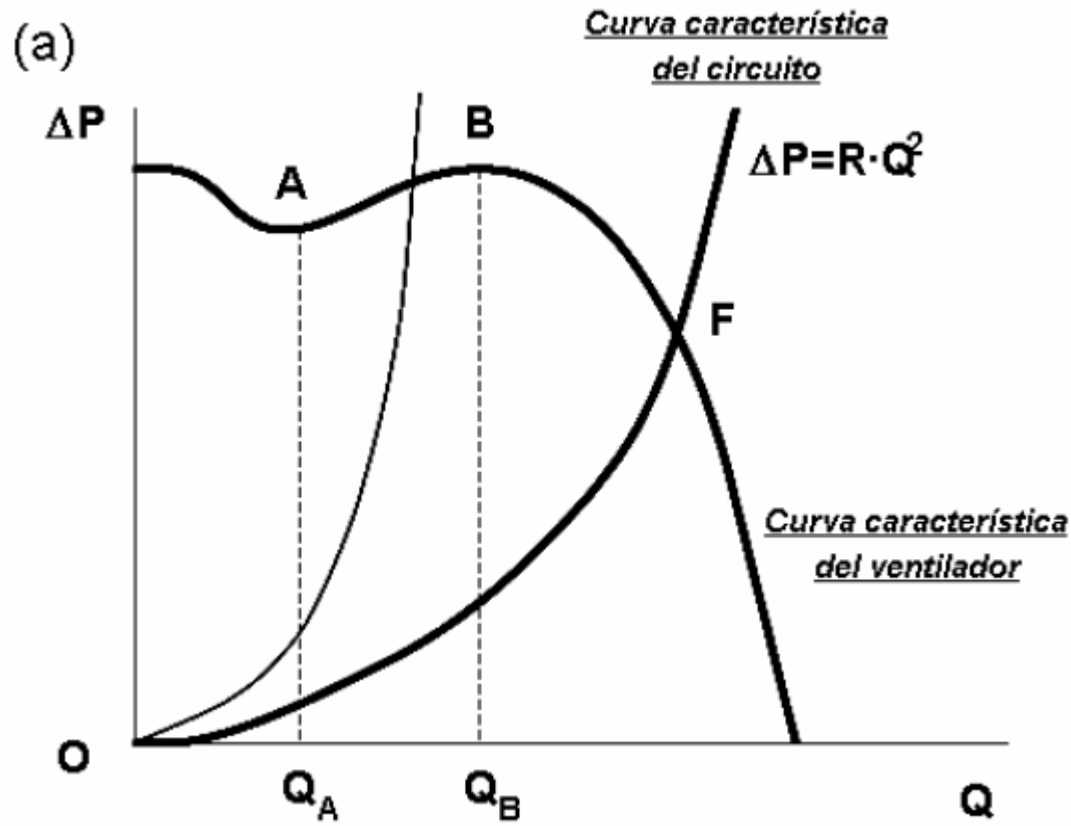
■ Intersección con la curva del sistema. Uso en diseño y selección de ventiladores:

- La intersección entre la curva del ventilador y la curva de resistencia del circuito define el punto de trabajo real.
- Si la red cambia (puertas cerradas, obstrucciones), la curva de resistencia se modifica, y el punto de operación se desplaza.

■ Importancia para la selección y operación:

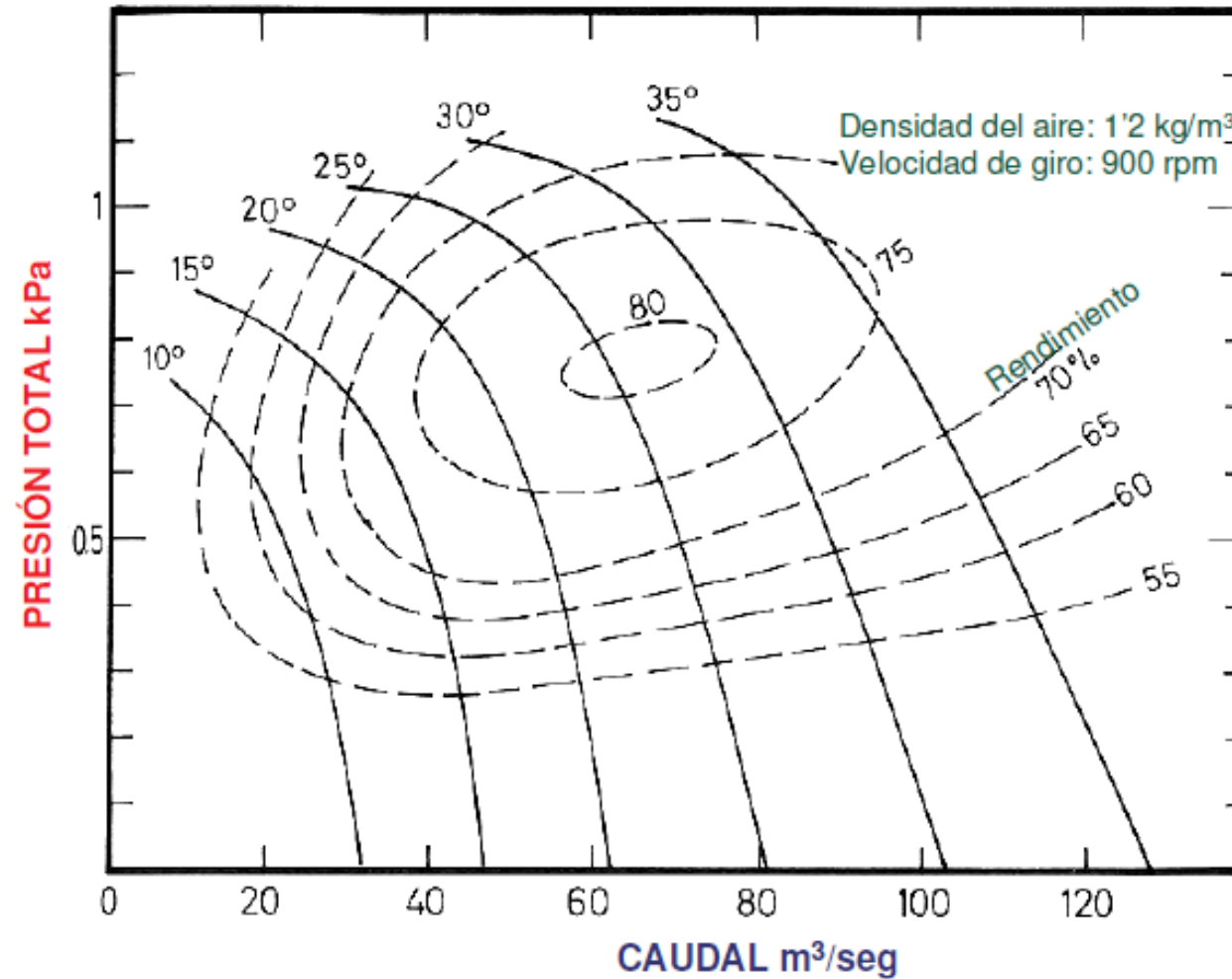
- Evita seleccionar ventiladores sobredimensionados o ineficientes.
- Permite diseñar sistemas de ventilación equilibrados y energéticamente eficientes.
- Es crucial para definir estrategias de control (regulación de velocidad, ángulo de palas, etc.).





- 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, existirá 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.
- **Ventiladores axiales:** tienen curvas de presión más planas, lo que los hace sensibles a variaciones en la red. Buen rendimiento a alto caudal y baja presión.
- **Ventiladores centrífugos:** presentan curvas más pronunciadas, mayor presión a bajo caudal. Ideales para redes con alta resistencia.
- **Ventiladores de flujo mixto:** combinan características de ambos, con curvas intermedias que ofrecen buena adaptabilidad.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN VENTILADOR AXIAL



Rendimiento del ventilador

■ Rendimiento Mecánico (η_m)

- Mide la **eficiencia con la que el ventilador convierte la potencia mecánica del motor en energía útil transmitida al aire.**
- Un rendimiento mecánico bajo implica derroche energético y mayor consumo eléctrico.
- Las pérdidas mecánicas pueden aumentar por mantenimiento insuficiente o erróneo, vibraciones o alineación deficiente.
- Elementos clave:
 - **Potencia entregada por el motor (P_m):** es la energía mecánica que llega al eje del ventilador desde el motor.
 - **Pérdidas mecánicas:** incluyen fricción y rozamientos en cojinetes, vibraciones, desalineación del eje, calentamiento por rozamiento, etc.
 - **Potencia al eje (P_e):** Energía que efectivamente impulsa el rodete del ventilador.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_m}$$

Donde:

- P_e : potencia efectiva en el eje
- P_m : potencia entregada por el motor

■ Rendimiento Manométrico (η_{man})

- Relaciona la presión útil generada por el ventilador (para vencer la resistencia del sistema) con la potencia efectiva al eje.

$$\eta_{man} = \frac{P_{fluido}}{P_e}$$

Donde:

- P_{fluido} : potencia transmitida al fluido (caudal \times presión útil)
 - P_e : potencia efectiva al eje
- Es un parámetro fundamental para comparar distintos modelos de ventiladores.
 - Permite evaluar si un ventilador es adecuado para las condiciones del sistema.
 - Factores que lo afectan:
 - Velocidad de giro del ventilador
 - Geometría del rodete y de los álabes
 - Condiciones de instalación (ej. distancia de paredes, ductos mal alineados)
- ## ■ Factores que afectan el rendimiento global del ventilador
- Diseño de álabes: Forma, ángulo y perfil aerodinámico determinan la eficiencia en la transferencia de energía al aire.
 - Holguras internas: Pequeñas separaciones entre piezas móviles (eje, carcasa, rotor) pueden causar pérdidas por recirculación de aire.
 - Pérdidas internas: Turbulencias, rozamientos y reflujo en el interior del ventilador.

- **El rendimiento global (η_t) resulta de multiplicar los distintos rendimientos parciales: $\eta_t = \eta_m \cdot \eta_{man}$**

Regulación de los ventiladores

- La ventilación requiere ajustes constantes para adaptarse a cambios en la configuración de la red subterránea, la demanda de aire fresco o la evacuación de contaminantes.
- La regulación del caudal permite asegurar condiciones seguras y eficientes, mientras que el control de la presión ayuda a optimizar el rendimiento del sistema y minimizar pérdidas de energía.
- La regulación adecuada del ventilador optimiza el consumo energético y prolonga la vida útil del equipo.
- Los sistemas de control automático con VFD:
 - Permiten un ajuste continuo y adecuado en minas con variaciones frecuentes en la ventilación requerida.
 - Comparado con el estrangulamiento, el ahorro energético puede superar el 30-50%.
- Un sistema de ventilación bien regulado garantiza:
 - Entornos de trabajo seguros.
 - Menor desgaste mecánico gracias a un funcionamiento correcto.
 - Reducción significativa en el consumo eléctrico y costes operativos de la mina.



■ Métodos de regulación para ventiladores centrífugos

- Estrangulamiento (compuertas o dampers): Método mecánico tradicional que implica obstruir parcialmente el flujo para reducir el caudal. Aunque es simple, reduce la eficiencia del sistema, ya que la energía no utilizada se disipa en forma de pérdida de carga.
- Variación de la velocidad de rotación (VFD - Variador de Frecuencia): Permite adaptar el régimen de funcionamiento del ventilador a la demanda real, reduciendo significativamente el consumo energético y mejorando la eficiencia.
- Álabes directrices variables (IGV - Inlet Guide Vanes): Consiste en orientar el flujo de aire antes de entrar en el impulsor, alterando la cantidad de aire suministrado sin cambiar la velocidad del rotor. Método eficiente, especialmente en aplicaciones con carga variable.

■ Métodos de regulación para ventiladores axiales

- Álabes de paso variable: Cambian el ángulo de ataque de los álabes durante la operación, permitiendo ajustar el caudal sin alterar la velocidad. Muy eficaces y usados en ventiladores de gran capacidad.
- Variación de velocidad (VFD): Similar al caso de los centrífugos, es uno de los métodos más eficientes desde el punto de vista energético.
- Funcionamiento en paralelo o serie: El uso de varios ventiladores trabajando conjuntamente permite modular el caudal total del sistema. Los ventiladores pueden encenderse o apagarse según la demanda.

Leyes de los ventiladores

- Las leyes de los ventiladores son principios fundamentales que describen cómo cambian el caudal, la presión y la potencia en función de la velocidad de rotación del ventilador o de su tamaño.
- Estas relaciones permiten predecir el comportamiento del ventilador bajo diferentes condiciones de operación o al escalar equipos en fases de diseño o sustitución.
- Relaciones básicas (a velocidad constante y geometría constante):
 - Ley del Caudal: el caudal es directamente proporcional a la velocidad de rotación del ventilador.
 - Ley de la Presión: la presión generada varía con el cuadrado de la velocidad de rotación.
 - Ley de la Potencia: la potencia absorbida por el ventilador varía con el cubo de la velocidad de rotación.



■ Aplicaciones prácticas de las leyes de los ventiladores

- Escalamiento de equipos: permiten estimar cómo se comportará un ventilador más grande (o más pequeño) si mantiene la misma geometría pero cambia su tamaño o velocidad, lo que vale para diseños preliminares y sustituciones de equipos.
- Comparación entre ventiladores: ayudan a normalizar el rendimiento de distintos modelos bajo condiciones de operación similares, facilitando la elección del equipo más eficiente.
- Simulación de rendimiento: se puede simular cómo responderá un ventilador al cambiar el régimen operativo, por ejemplo, al implementar un variador de frecuencia (VFD) o en condiciones de pérdida de carga.

■ Consideraciones y limitaciones:

- Aplican solo a ventiladores geoméricamente similares, es decir, misma forma, ángulo de álabes, etc.
- Suponen un flujo completamente desarrollado, sin perturbaciones ni efectos no lineales significativos (como turbulencias extremas).
- No contemplan efectos de compresibilidad, lo cual limita su uso en gases a muy alta velocidad o presión.
- La eficiencia no siempre se conserva, por lo que al escalar se deben validar los rendimientos reales con datos de fabricante.

Elección del ventilador

- La elección del ventilador adecuado es un proceso técnico y estratégico.
- Un ventilador mal dimensionado o inadecuado puede provocar deficiencias en la ventilación, aumentos en los costes energéticos y operativos, o incluso riesgos para la seguridad del personal.
- **Criterios técnicos**
 - **Requisitos del sistema de ventilación:**
 - **Caudal requerido (Q):** volumen de aire necesario para diluir gases, polvo y mantener condiciones térmicas adecuadas.
 - **Presión estática y total:** para superar la resistencia del sistema de galerías y pérdidas por fricción.
 - **Características del circuito de ventilación:**
 - **Curva de resistencia** de la red: determina la presión necesaria a diferentes caudales.
 - **Configuración del sistema** (ramificaciones, longitudes, cambios de sección).



<https://es.chartindustries.com/>

- **Restricciones físicas y operativas:**
 - **Espacio disponible** para instalación del ventilador.
 - **Ubicación** (en superficie, interior mina, estaciones intermedias).
 - Accesibilidad para operación y mantenimiento.
- **Condiciones ambientales:**
 - Presencia de **polvo, humedad, temperaturas elevadas, gases corrosivos** (SO₂, H₂S).
 - Requiere **materiales resistentes** y, a veces, **ventiladores con protección especial** (IP, ATEX).
- **Factores económicos y de mantenimiento**
 - **Eficiencia energética:** clave en minas de gran escala; ventiladores eficientes reducen el consumo energético (uno de los mayores costos en ventilación).
 - **Costos operativos y de mantenimiento:** se evalúa la **facilidad de acceso**, la **frecuencia de mantenimiento**, la **disponibilidad de repuestos**.
 - **Durabilidad y fiabilidad:** se priorizan equipos con **larga vida útil** y **robustez mecánica**.
- **Evaluación de proveedores y homologación técnica**
 - **Homologación técnica:** cumplimiento de normas nacionales e internacionales (por ejemplo, **UNE, ISO, ATEX**, etc.).
 - Evaluación de **certificaciones de seguridad**, calidad, y **experiencia del fabricante** en minería.
 - **Soporte técnico y postventa** ofrecido por el proveedor.

■ Proceso de selección paso a paso

- **Definir requerimientos** de ventilación (Q y ΔP).
- **Establecer curva de resistencia** del circuito.
- **Seleccionar tipo de ventilador** (axial, centrífugo, mixto).
- **Cruzar curvas características** del ventilador y del sistema para encontrar el **punto de operación óptimo**.
- **Evaluar el rendimiento energético** y la compatibilidad ambiental.
- **Validar la compatibilidad física y normativa**.
- **Realizar un análisis técnico-económico** comparativo.



<https://fantr.com/>

Instalación, mantenimiento y seguridad de los ventiladores

Instalación:

■ Selección del emplazamiento adecuado:

- Asegurar una base firme y nivelada.
- Ubicación con buena accesibilidad para inspección y mantenimiento.
- Protección frente a vibraciones del entorno, polvo, humedad, gases y temperaturas extremas.

■ Alineación y acoplamiento:

- Correcta alineación entre el motor y el eje del ventilador para evitar vibraciones y desgaste prematuro.
- Uso de amortiguadores de vibración si es necesario.

■ Conexiones y conducciones:

- Sellado correcto de juntas y acoplamientos para evitar fugas de aire.
- Uso de silenciadores o compuertas cuando se requiera control de ruido o regulación.

■ Verificación inicial:

- Revisión del sentido de giro, nivel de vibraciones, consumo eléctrico y caudal.

Mantenimiento preventivo y correctivo

■ Mantenimiento preventivo (programado):

- Limpieza periódica de aspas, rejillas, filtros y conductos.
- Lubricación de rodamientos y partes móviles.
- Revisión de anclajes, conexiones eléctricas y protecciones térmicas.
- Medición de vibraciones y temperatura como indicadores de desgaste.

■ Mantenimiento correctivo:

- Reparación de componentes dañados: motores, cojinetes, rodets.
- Sustitución de palas desgastadas o deformadas.
- Corrección de desequilibrios en el balance o alineación incorrecta.
- Intervenciones en caso de aumento anormal de ruido, consumo o pérdida de rendimiento.

Conclusiones

- Los ventiladores son componentes críticos en los sistemas de ventilación minera, esenciales para la seguridad, salubridad y eficiencia operativa en espacios subterráneos.
- El conocimiento técnico detallado sobre tipos de ventiladores, curvas características, rendimientos y métodos de regulación permite una mejor selección, operación y mantenimiento, reduciendo costes y riesgos.
- La adaptación adecuada al circuito de ventilación, así como la implementación de estrategias de control eficientes (como el uso de variadores de frecuencia o sistemas de regulación de álabes), impacta directamente en el rendimiento energético y funcional del sistema.
- El mantenimiento preventivo y la evaluación continua del desempeño son claves para prolongar la vida útil del equipo, evitar fallos operativos y garantizar la continuidad de la ventilación en ambientes exigentes.
- La integración de criterios técnicos, económicos y normativos en el proceso de selección asegura una solución eficaz y adaptable a diferentes contextos mineros.

Dudas y preguntas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGIA
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS MINERAS

TECHNICAL UNIVERSITY OF MADRID
HIGHER TECHNICAL SCHOOL OF MINING AND ENERGY ENGINEERING
MINING TECHNOLOGIES LABORATORY