

Juan Herrera Herbert

Leyes y conceptos básicos fundamentales en ventilación subterránea.

**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





Leyes y conceptos básicos fundamentales en ventilación subterránea.

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.

Foto de portada: <https://www.icliberia.com/>

Identificador DC: <https://oa.upm.es/88123/>

Identificador OAI: [oai:oa.upm.es:88123](https://oai.oa.upm.es/88123)

Copyright © 2025. Todos los derechos reservados



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 los principios fundamentales de la dinámica de fluidos aplicados a los sistemas de ventilación subterránea. Se analizarán conceptos clave como caudal, presión, pérdidas de carga, resistencia aerodinámica, así como leyes físicas esenciales que rigen el comportamiento del aire en movimiento dentro de redes de ventilación. Además, se explorará la relación entre estos principios y los problemas comunes de ventilación ineficiente en sistemas reales.

■ Objetivos

- Comprender el comportamiento de los fluidos en movimiento, con énfasis en el aire como fluido gaseoso.
- Diferenciar entre caudal másico y caudal volumétrico, y entender su implicancia en el diseño de ventilación.
- Analizar los tipos de presión presentes en un sistema: estática, dinámica y total.
- Identificar las pérdidas de presión por fricción, cambios geométricos y elementos de red.
- Interpretar la resistencia aerodinámica y la curva característica de una galería.
- Aplicar leyes y fórmulas como la Ecuación de Continuidad, la Fórmula de Atkinson, y las leyes de Kirchhoff a redes de ventilación.
- Reconocer las causas de una ventilación deficiente y cómo evitarlas desde el enfoque técnico.

Conceptos básicos en ventilación

Concepto de fluido

Sustancia que tiene la propiedad de fluir, carece de rigidez y elasticidad, y en consecuencia cede inmediatamente a cualquier fuerza tendente a alterar su forma, adoptando así la forma del recipiente que lo contiene.

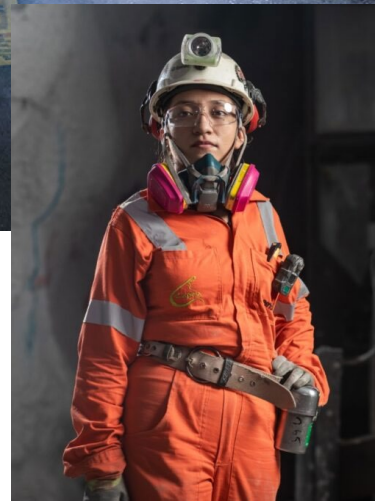
Como fluido, un gas:

- Fluye,
- Carece de rigidez y elasticidad. Constan de partículas en movimiento bien separadas que chocan unas con otras y tratan de dispersarse
- Cede inmediatamente a cualquier fuerza tendente a alterar su forma, adoptando la forma del recipiente que lo contiene.
- Tiende a ocupar el mayor volumen posible (son muy expandibles)
- Es compresible (es decir, su volumen disminuye cuando sobre ellos se aplican fuerzas).



Un fluido se mueve cuando existe una diferencia de presiones, yendo desde un punto donde existe alta presión hasta otro de baja presión, siguiendo el camino que opone menor resistencia al paso.

- **Toda mina es una red compleja de huecos** (pozos, galerías, cámaras y zonas de explotación) de dimensiones y distribución variables, **a cada una de los cuales ha de llegar la cantidad necesaria de aire.**
- Además, los reglamentos exigen condiciones que han de ser cumplidas en cualquier circunstancia, lo que complica el cálculo de un sistema de ventilación eficaz.



- Concepto de caudal:
 - Cantidad de sustancia que atraviesa una sección determinada en la unidad de tiempo.
 - El caudal Q puede ser de dos tipos:
 - Caudal másico.
 - Caudal volumétrico.

- Concepto de presión:
 - Presión hidrostática
 - Tipos de presiones presentes en un fluido gaseoso en movimiento:
 - Presión estática
 - Presión dinámica



Concepto de Caudal

- Caudal másico y **Caudal volumétrico**
- Es la cantidad de volumen de una sustancia que atraviesa una determinada sección en un segundo.
- Las unidades en que se mide el caudal son m^3/s
- El volumen que ocupa un gas depende de las condiciones de presión y temperatura a las que está sometido.
- Para expresar el caudal volumétrico, también se necesita saber las condiciones de presión y temperatura a las que se refiere ese volumen.
- El error que se comete si no se tiene en cuenta esto, puede ser grande.
- Caudal en volúmen "normal" Q_n (m^3/s): es el caudal en volumen que se observaría si el fluido se encontrara en condiciones normales de presión y temperatura (15 °C y 1 atmósfera):

Concepto de presión

- Al estar en movimiento continuo, las moléculas de un gas golpean frecuentemente las paredes internas del recipiente que los contiene.
- Al hacerlo, inmediatamente rebotan sin pérdida de energía cinética, pero el cambio de dirección (aceleración) aplica una fuerza a las paredes del recipiente. **Esta fuerza, dividida por la superficie total sobre la que actúa, es la presión del gas.**
- Cuantas más moléculas choquen mayor será la presión y cuanto más rápido se muevan (estar a mayor temperatura), mayor será la presión.
 - Presión hidrostática: la debida al peso de una columna de fluido sobre la superficie de un objeto.
 - Presión estática: la propia de un fluido independientemente de su velocidad.
 - Presión dinámica: la que deriva de la inercia de las partículas del fluido cuando chocan con una superficie perpendicular a su movimiento.
 - Presión total: Es la presión resultante de la **suma de la estática y la dinámica**.

Pérdidas de presión en un sistema

- Por **fricción o rozamiento**:
 - Entre las capas del propio fluido y entre el aire y las paredes hace que éste pierda energía.
 - En minería, las pérdidas por fricción llegan a ser alrededor del 70-90% de las pérdidas totales en la mina.
- Por **impacto** (pérdidas dinámicas) por cambios de sentido, velocidad y aceleración causados por obstáculos que se encuentra el fluido en su propio trayecto.
- Por **cambio de dirección**
- Presión **por cambio de sección**
- Además de las pérdidas de presión por rozamiento, hay que tener en cuenta que siempre que exista un cambio de dirección o de sección más o menos brusco en la conducción, se producen **turbulencias adicionales y remolinos** en la vena fluida, que generan a su vez pérdidas de energía y por lo tanto de presión.

Pérdidas de presión por rozamiento

- El flujo de aire de ventilación, tanto si fluye por conducciones como si lo hace por pozos ó galerías, es de régimen turbulento.
- En tales circunstancias, las pérdidas de presión generadas por la fricción o rozamiento con las paredes de la conducción se pueden calcular mediante la conocida fórmula de Darcy-Weisbach.

Fórmula de DARCY:

Conductos circulares: $\Delta P = f \cdot L \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \cdot g \cdot D$

Conductos no circulares: $\Delta P = f \cdot \rho \cdot L \cdot C \cdot v^2 / 8 \cdot A \cdot g = K \cdot L \cdot C \cdot v^2 / A$

- L : Longitud de la conducción.

- "f" y " $K=f\rho/8g$ " : Coeficientes de fricción.

- En la fórmula anterior, **agrupando todos los factores que dependen de la geometría o de la rugosidad de la conducción, se puede establecer un nuevo concepto, el de resistencia de la conducción $R=KCL/A^3$** y se convertiría en la expresión que se conoce con el nombre de fórmula de Atkinson:

FORMULA DE ATKINSON:

Para un caudal de aire $Q=A \cdot v$: $\Delta P = K \cdot C \cdot L \cdot Q^2 / A^3 = R \cdot Q^2$

- ΔP : Caída de presión por rozamiento ($N/m^2 = Pa$)
- Q : Caudal de aire (m^3/seg)
- R : Resistencia de la conducción ($N \cdot seg^2/m^8$)
- K : Coeficiente de rozamiento ($N \cdot seg^2/m^4$)

Otras unidades de presión:

1 mbar = 100 Pa 1 mm de columna de agua = 1 kg/m² = 10 Pa

Unidades de la fórmula de ATKINSON en el sistema técnico:

ΔP : kg/m² ó mm c.a. K : kg·seg²/m⁴ R : kg·seg²/m⁸ ó KILOMURGUE.

Valores del coeficiente de rozamiento K

"K" depende de:

La densidad del aire: $K'=(\rho'/\rho)K$

Los obstáculos y grado de curvatura de la conducción

Los cambios de sección de la conducción

Valores tipo de "K" para $\rho= 1'2 \text{ kg/m}^3$:

Galería rectangular sin revestir	0'012 - 0'016
Galería rectangular sin revestir con mucha entibación	0'017 - 0'035
Galería rectangular con revestimiento de hormigón proyectado	0'005 - 0'006
Galería rectangular hormigonada	0'004
Galerías con cerchas metálicas hormigonadas	0'004
Galerías con cerchas metálicas y revestimiento de madera	0'007 - 0'009
Galerías irregulares con cerchas deficientemente alineadas	0'016
Pozos hormigonados sin fortificaciones ni obstáculos	0'003 - 0'004
Pozos hormigonados con obstáculos longitudinales (guías, tuberías...)	0'006 - 0'007
Pozos hormigonados con obstáculos transversales	0'018 - 0'022
Pozos sin revestir	0'010 - 0'014
Tubería de acero galvanizado	0'021
Tubería de fibra de vidrio	0'024
Tubería de plástico flexible (ventilación soplante)	0'0037
Tubería plástico flexible con refuerzo metálico (soplante o aspirante)	0'011

Velocidad del aire

- El rendimiento de la ventilación aumenta con la velocidad del aire ya que un trabajador puede eliminar mejor el calor al medio externo.
- No obstante, a velocidades superiores a 5 m/s no hay mayor influencia práctica.



Caídas de presión por cambios de dirección o sección

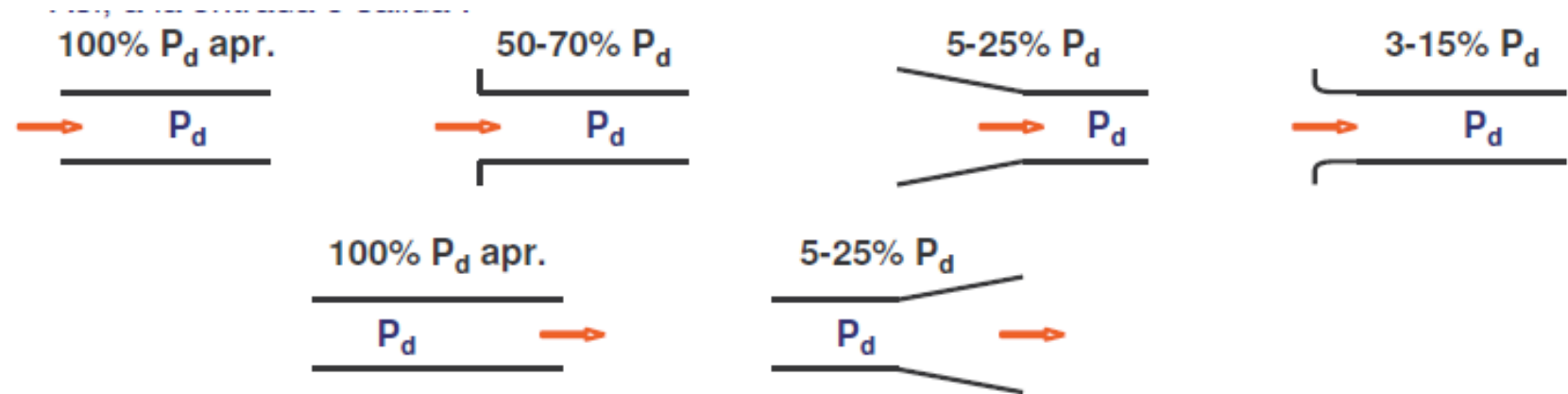
Cambios de dirección

- Producen remolinos y pérdidas de presión proporcionales a la presión dinámica, tanto mayores cuanto más brusco sea el cambio
- Si "D" es el diámetro de la conducción y "r" el radio de curvatura, medido en su punto medio, las pérdidas en una curva de 90° son:

r/D	ΔP_t
> 2	$< 0'15 P_d$
1	$0'25 P_d$
0'5	$0'75 P_d$
EN ESCUADRA	$1'15 P_d$

Cambios de sección

- Producen remolinos y pérdidas de presión proporcionales a la diferencia de presiones dinámicas. Así, a la entrada o salida:



Concepto de Resistencia aerodinámica

- Se denomina resistencia aerodinámica, o resistencia, **la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire en la dirección de la velocidad relativa entre el aire y el cuerpo.**
- La resistencia siempre ocurre en sentido opuesto a dicha velocidad. Esta fuerza se opone al avance de un cuerpo a través del aire.
- La resistencia **es una medida de la oposición al flujo de corriente en un circuito**

Coeficiente de forma de una galería

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

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

- Si la galería está ocupada con material y/o obstáculos, (tuberías, cintas transportadoras, trenes, etc.) su resistencia aumenta.



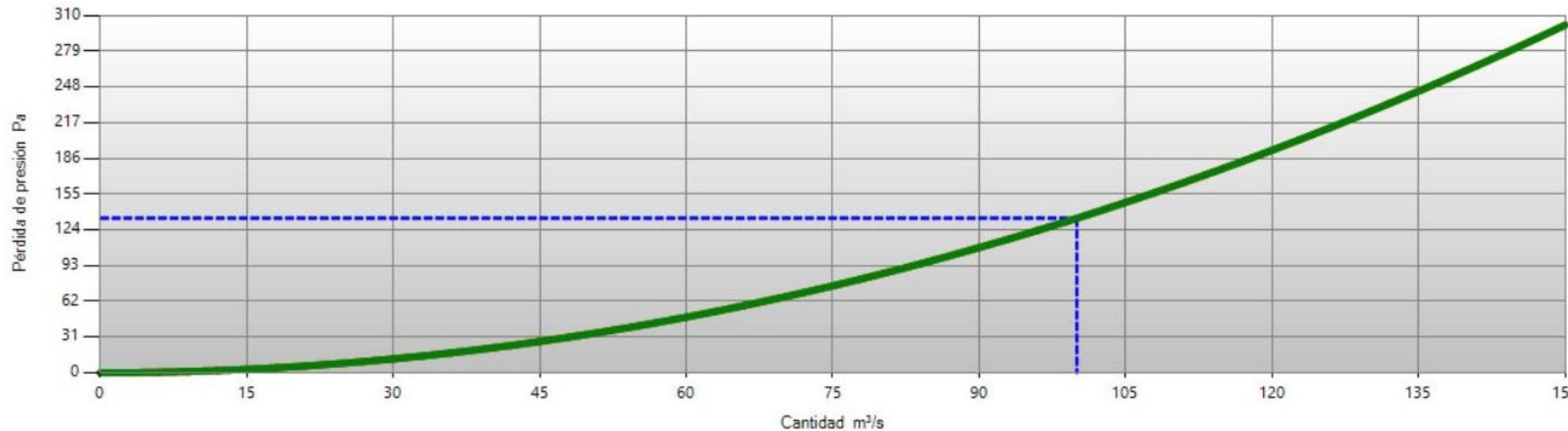
Minas de Suria. Fuente: ICL

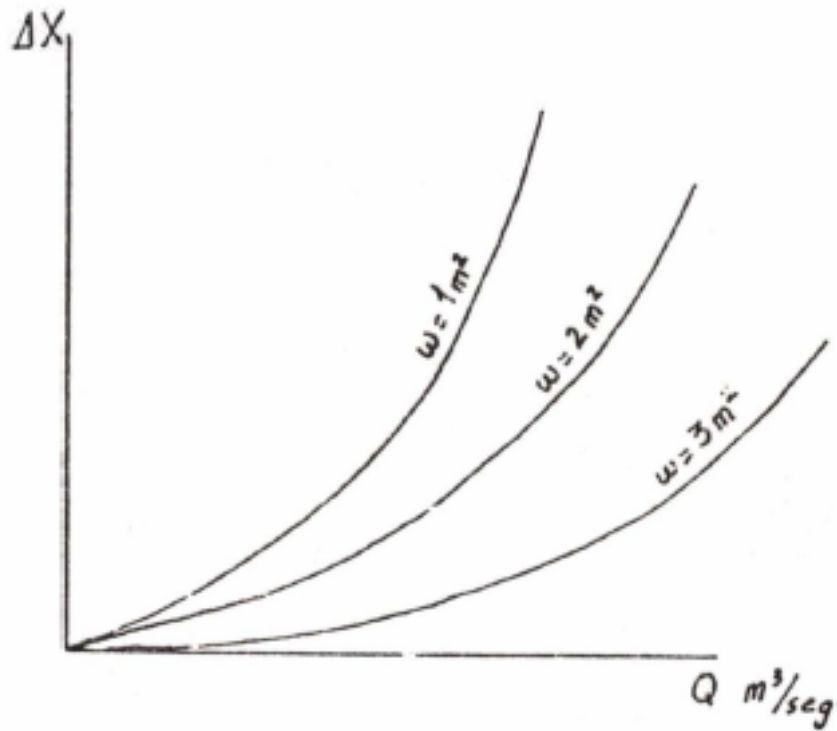
Curva característica de una galería

- La pérdida de carga por fricción es directamente proporcional al cuadrado del caudal del aire que, según la representación gráfica de la ecuación de Atkinson, se expresa de la siguiente manera:

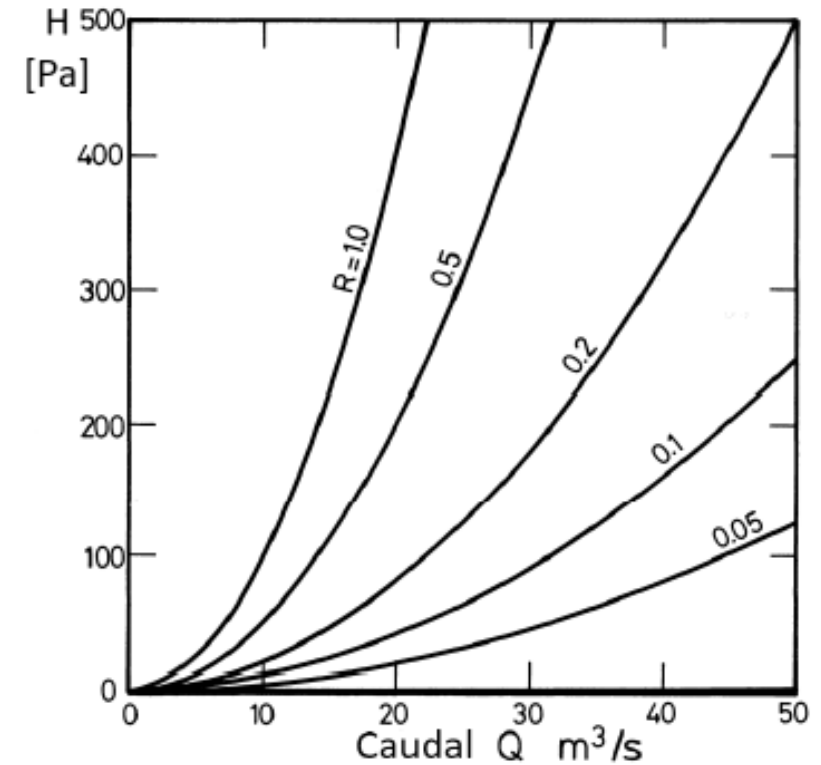
$$\Delta P = R \cdot Q^2$$

- La representación gráfica de esta función adopta la forma de una parábola que se denomina “la curva característica de la galería”, que a medida que aumente la resistencia de la galería, será más cerrada.





Ejemplo de distintas curvas características en función de la sección



Representación de curvas características a diferentes valores de R

Principio básico

La regla fundamental en Ventilación en lo que a mantenimiento de la atmósfera de mina se refiere, es:

“EVITAR A TODA COSTA QUE EL CONTAMINANTE LLEGUE A ESTAR SUSPENDIDO EN EL AIRE”



Minas de Suria. Fuente: ICL

Principios de la ingeniería de control atmosférico en mina

1. Prevención de la emisión de gases y/o polvo:
 - Modificando las operaciones o mejorando la practica operativa.
 - Reduciendo la formación de gases o polvo.
 - Considerar en la ingeniería la necesidad de no contaminar desde el proyecto.
 - Verificar que las modificaciones de la mina no introduzcan nuevos procesos o elementos contaminantes.

2. Remoción y/o eliminación:
 - Limpiando labores para eliminar polvo asentado.
 - Depuración de emisiones de aire con colectores de polvo.
 - Modificar operaciones o mejorar prácticas operativas para reducir la formación de polvo o la producción de gases no deseables (Por ejemplo, mantenimiento de equipos, etc.).

3. Supresión de efectos (con agua o adsorción):
 - Rociado con agua o vapor previo al arranque (polvo)
 - Reducción de emisiones de gases con rociado de agua o espuma
 - Tratamiento del polvo asentado con productos químicos delicuescentes (que absorben humedad del aire).
 - Depuración con colectores de polvo o catalizadores.

4. Contener o aislar (encerrar la fuente):
 - Voladura aislada o con personal totalmente fuera de la mina.
 - Disposición de cerramientos que aislen las operaciones generadoras de polvo y aplicación de sistemas de tratamiento local (filtros catalíticos, rociadores, aspiración, colectores de polvo, etc.).
 - Sistema de ventilación local.

5. Diluir (último recurso) o reducir:
 - Dilución local por ventilación auxiliar.
 - Dilución por corriente de la ventilación principal.

Cualquier esfuerzo en controlar el material particulado antes de que llegue a formar suspensiones áreas permite resultados mas económicos y simples tanto en superficie como en interior de mina.

Principios de la ventilación

Fórmula de Atkinson

- La mayor parte de los problemas de ventilación en las minas se resuelven mediante la aplicación de la ley

$$\Delta P = RQ^2$$

(fórmula de Atkinson)

y donde $h = \Delta P = RQ^2$

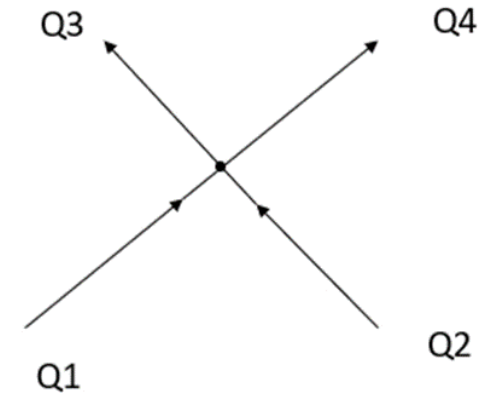
siendo h la pérdida de carga o depresión.

- Sin embargo, en aquellos casos en los que se necesitan resultados más exactos, será necesario acudir a las leyes de la aerodinámica.

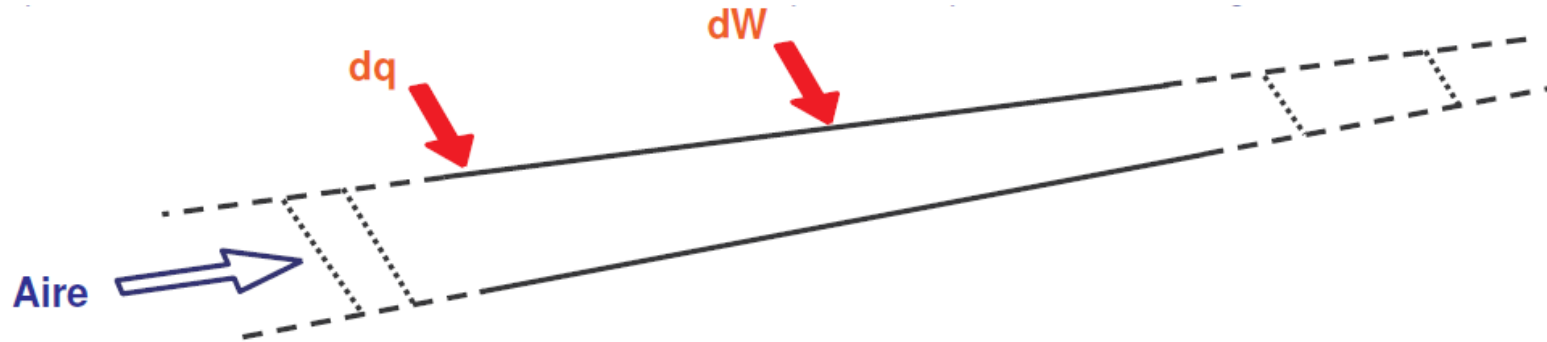


Ecuación de continuidad (Primera Ley de Kirchhoff)

- Según esta ley, el sumatorio de las corrientes que entran en un nodo debe de ser la misma que las que salen del mismo.
- Esto aplicado a las redes de ventilación supone que **los flujos de aire que entran en el sistema deben de ser igual a los que salen de él**, o lo que es lo mismo, el sumatorio de los flujos de aire del sistema deben ser igual a cero.



Ecuación de la energía



Sea un sistema cerrado (sin intercambio de materia), que fluye en régimen permanente (sus propiedades intensivas no cambian con el tiempo). Tampoco cambia el grado de humedad.

z	COTA	z+dz
V	VOLUMEN	V+dV
P	PRESION	P+dP
H	ENTALPIA	H+dH
S	ENTROPIA	S+dS
v	VELOCIDAD	v+dv
U	ENERGIA INTERNA	U+dU
r	DENSIDAD	ρ+dρ
m	MASA	m

dq: CALOR ABSORBIDO POR EL SISTEMA

dW: TRABAJO REALIZADO SOBRE EL SISTEMA

dWr: PERDIDAS POR ROZAMIENTO

$$\mathbf{dq + dW = dH + mgdz + mvdv}$$

$$dH = dU + PdV + VdP = TdS + VdP$$

$$TdS = dq + dWr$$

$$\mathbf{dW = dWr + VdP + mgdz + mvdv}$$

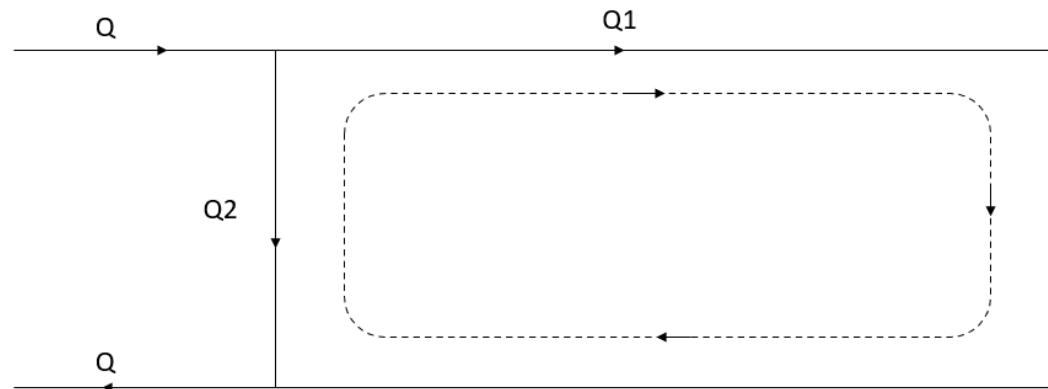
$$\mathbf{dW/V = dWr/V + dP + pgdz + pvdv}$$

La elevación de presión que genera un ventilador sobre la corriente de aire es igual a la caída de presión por rozamiento más el incremento de la presión estática o interna del fluido, más las variaciones (positivas o negativas) de las presiones hidrostática y dinámica del mismo

Ley de las mallas (Segunda Ley de Kirchhoff)

- La segunda ley del Kirchhoff es una aplicación de la ley de la conservación de la energía.
- Esta ley establece que la suma de todas las caídas de tensión del sistema debe de ser iguales a la tensión total del sistema que, vectorialmente, la suma es cero.
- **En los circuitos de ventilación, la suma de las caídas de presión debe de ser igual a cero.**

$$\sum H_T = 0$$



Régimen de flujo

- **El movimiento del aire en el interior de la mina** y, en general, en cualquier trabajo subterráneo, **se tiene que considerar como un flujo turbulento**, pues el valor del número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

- Donde:

V = Velocidad del aire (ms^{-1})

D = Diámetro equivalente de la labor

ρ = Densidad del aire ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

μ = viscosidad del aire ($1,8 \cdot 10^{-5} \text{ N s m}^{-2}$)

- Aplicado a cualquier labor sobrepasa el valor de 2.000, que es el límite del flujo laminar.

■ Conducción horizontal sin ventilador ni pérdidas por rozamiento.

Conducto horizontal: $dz=0$

Sin ventilador intercalado: $dW=0$

Sin pérdidas por rozamiento: $dW_r=0$

Fluido incompresible: $V = m/\rho = \text{cte}$

$$VdP + mv dv = 0$$

$$\int_1^2 VdP + \int_1^2 mv dv = 0$$

$$m(P_2 - P_1)/\rho + m(v_2^2 - v_1^2)/2 = 0$$

$$P_2 + \rho v_2^2 / 2 = P_1 + \rho v_1^2 / 2$$

$$P_s + P_d = P_t = \text{cte.}$$



$\left\{ \begin{array}{l} P_s: \text{ Presión estática} \\ P_d: \text{ Presión dinámica} \\ P_t: \text{ Presión total} \end{array} \right.$

Cuando lo único que se tiene es un cambio de sección progresivo en un conducto horizontal sin que existan pérdidas por rozamiento ni ventilador intercalado, la presión total (suma de las presiones estática y dinámica) se mantiene constante a lo largo del mismo.

■ Conducción horizontal.

Conducto horizontal: $dz=0$
Fluido incompresible: $V = m/\rho = \text{cte.}$

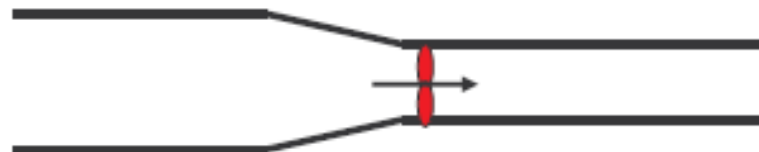
$$dW = dW_r + VdP + mv dv$$

$$\rho dW/m = \rho dW_r/m + dP + \rho v dv$$

$$\rho W/m = \rho W_r/m + (P_2 - P_1) + \rho(v_2^2 - v_1^2)/2$$

ΔP_v : Elevación de presión del ventilador.

ΔP_r : Caída de presión por rozamiento.



$$\Delta P_v = \Delta P_r + \Delta P_s + \Delta P_d = \Delta P_r + \Delta P_t$$

■ Pozo vertical de sección constante y sin ventilador intercalado

Sin ventilador intercalado: $dW = 0$

De sección constante (variación de v despreciable): $dv=0$

$$0 = dW_r + VdP + mgdz$$

$$0 = dW_r/V + dP + \rho g dz$$

$$dP = -\rho g dz - dW_r/V$$

$$P_2 - P_1 = -g \int_1^2 \rho dz - \int_1^2 \frac{dW_r}{V}$$



$$P_2 = P_1 + \Delta P_a - \Delta P_r$$

P_2 : Presión en el fondo.

P_1 : Presión en la superficie

ΔP_r : Caída de presión por rozamiento.

ΔP_a : Autocompresión

ΔP_a es positivo por ser $z_2 < z_1$. Representa la autocompresión que experimenta la vena fluida debido al peso de la columna de aire que tiene por encima. Dicho término puede tener un valor **no despreciable** si se trata de un pozo bastante profundo.

■ Circuito de ventilación principal de una mina

Despreciando los términos de velocidad:

$$1-2: \quad 0 = dW_r + VdP + mgdz \quad 0 = W_{r12} + \int_1^2 VdP + mg(z_2 - z_1)$$

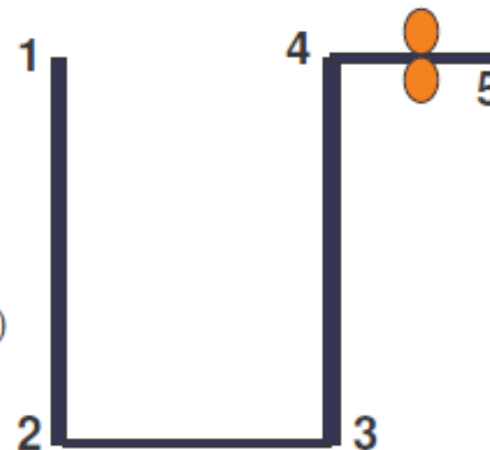
$$2-3: \quad 0 = dW_r + VdP \quad 0 = W_{r23} + \int_2^3 VdP$$

$$3-4: \quad 0 = dW_r + VdP + mgdz \quad 0 = W_{r34} + \int_3^4 VdP + mg(z_4 - z_3)$$

$$4-5: \quad dW = VdP \quad W_v = \int_4^5 VdP$$

Sumando las 4 ecuaciones y suponiendo: $z_4 = z_1$; $z_3 = z_2$

$$W_v = W_r + \oint VdP \quad \left\{ \begin{array}{l} W_v: \text{Trabajo del ventilador.} \\ W_r: \text{Trabajo de rozamiento.} \\ \oint VdP: \text{Ventilación natural} \end{array} \right.$$



Ventilación natural: es debida básicamente al fenómeno de calentamiento o enfriamiento que sufre el aire a su paso por la mina, lo que origina una diferencia de densidad entre el aire del pozo de entrada y el de salida. Esta diferencia de peso entre una y otra columna de aire genera una diferencia de presión entre el fondo del pozo de entrada y el de salida, que en unas ocasiones será favorable a la creada por el ventilador y en otras, desfavorable. Dicho término puede ser por tanto positivo o negativo.

Principios de la ventilación

- Para que exista ventilación debe haber:
 - Dos puntos de diferente presión ($P_1 > P_2$). La corriente va hacia donde la presión es menor.
 - Diferencia de temperaturas ($T_1 > T_2$ a $T_1 < T_2$).
 - Una entrada de aire y una salida.
 - Inducción por medios mecánicos.
- El caudal de aire es la cantidad de aire que entra a la mina y que sirve para ventilar labores, cuya condición debe ser que el aire fluya de un modo constante y sin interrupciones.
- El circuito que seguirá la corriente de ventilación dependerá de la distribución de las resistencias aerodinámicas acorde a las leyes de Kirchhoff.
- Si se quiere cambiar una distribución de ventilación, no hay más que alterar las resistencias del circuito (compuertas, reguladores, tabiques, etc.) y modificar las presiones que generan los ventiladores.

Motivos de una mala ventilación

- Una mala ventilación puede ser debida a:
 - La profundidad de la mina (alta temperatura), donde llega aire caliente y no se hace confortable el entorno de trabajo para el trabajador.
 - Las malas condiciones del circuito de ventilación: longitud, sección, irregularidades, etc., que incrementan la resistencia de la mina y por tanto se disminuye la cantidad de aire en las áreas de trabajo.
 - La mala utilización de las puertas de ventilación o de los reguladores de caudal, no consiguiendo una distribución apropiada del aire en el área de trabajo.
 - La presencia de cantidades anormales de gases nocivos que impiden el trabajo.
 - Humedad del aire, ya que un valor alto de la misma da una temperatura equivalente que la hace menos soportable.
 - No respetar los reglamentos y consignas establecidas, haciendo llegar menor cantidad de caudal de aire que lo que establece la legislación.

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