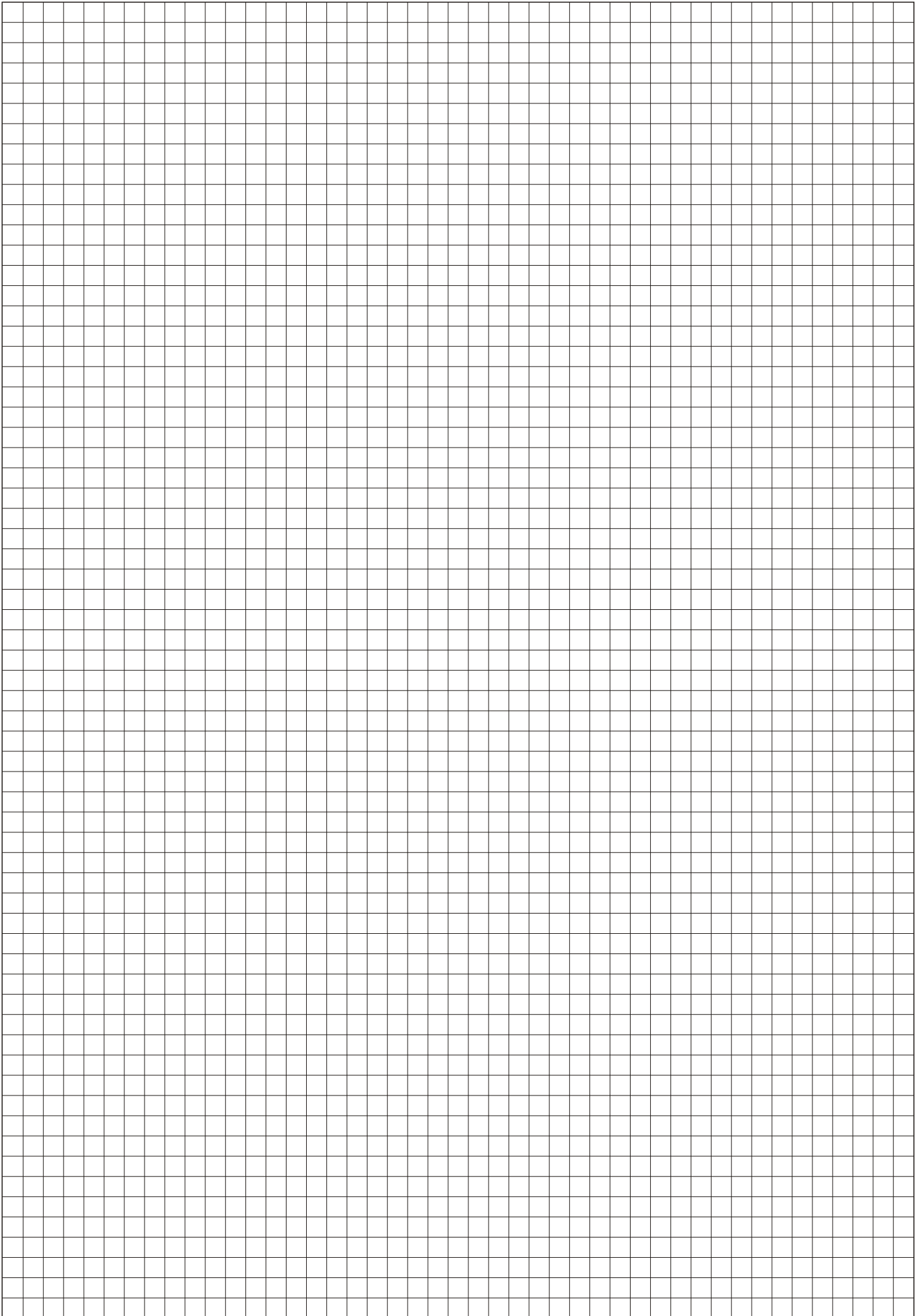




01 - Conceptos básicos

- La presión y el vacío
- Ley Boyle/Mariotte
- Ley Gay/Lussac
- Características de flujo
- Coeficiente "C" y "b"
- Coeficiente Kv
- Caudal



PRESIÓN

La presión es la relación entre una fuerza y la superficie sobre la que se aplica

$$P = \frac{F}{S}$$

Unidad de medida del sistema internacional: $P = \frac{N \text{ (Newton)}}{m^2} = Pa \text{ (Pascal)}$

Siendo el Pa una unidad muy pequeña se prefiere utilizar el bar: **1bar= 10⁵Pa (100kPa)**

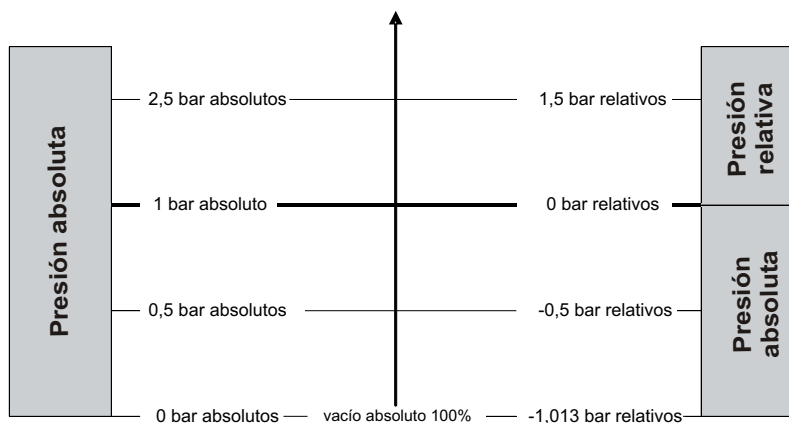
(para las tablas de conversión de la presión en otras unidades de medida, ver página 3.1)

Presión atmosférica: es la presión que ejerce el aire presente en la atmósfera sobre la superficie terrestre.

A 20° C, con 65 % de humedad, sobre el nivel del mar, la presión atmosférica corresponde a 1,013 bar y varía en función de la altitud. En los cálculos este valor se redondea a 1 bar sin considerar la altitud.

Presión relativa: es la presión que viene indicada por los instrumentos en los circuitos neumáticos.

Presión absoluta: es la suma de las presiones atmosférica y relativa (utilizada para el cálculo del consumo de los cilindros).



VACÍO

Se entiende como un espacio o un volumen cerrado privado de materia. Se tiene vacío cuando el valor de la presión es inferior a la atmosférica y se define como vacío absoluto cuando la presión absoluta y la atmosférica son iguales a cero.

Unidades de medida: El vacío se expresa como presión negativa en diversas unidades de medida: bar, Pa, Torr, mmHg, % de vacío.

Campo de empleo: - hasta el 20 % de vacío para ventilación, enfriamiento, limpieza.

- del 20 % al 99 % "Vacío industrial" para elevación, manipulación, automatización
- Más del 99 % "Vacío de procesos" para laboratorios, elaboración de microchips,

revestimientos con depósitos moleculares...

LEY DE BOYLE - MARIOTTE

A temperatura constante, el volumen de un gas perfecto encerrado en un recipiente, es inversamente proporcional a la presión absoluta.

Por tanto, para una determinada cantidad de gas el producto del volumen por la presión absoluta es constante.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = P_3 \times V_3 = \text{etc.}$$

LEY DE GAY Y LUSSAC

- a **presión** constante
el volumen de una determinada cantidad de gas es directamente proporcional a la **temperatura***

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2$$

- a **volumen** constante
la presión de una determinada cantidad de gas es directamente proporcional a la **temperatura***

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

(*en grados absolutos Kelvin: $0^\circ \text{C} = 273^\circ \text{K}$)

En base a todo esto se deduce que **para llenar** por ejemplo **la cámara de un cilindro son necesarios tantos litros de aire como los que contiene la misma cámara multiplicados por la presión** (a temperatura constante)

Una eventual variación de la temperatura que se verificase durante la fase de llenado, no variaría sustancialmente el valor obtenido (V.P) porque si entre la temperatura del aire de red y la temperatura del aire en el cilindro hubiera 20°C de diferencia, se tendría, aplicando la ley de GAY y LUSSAC:

- hipótesis de cámara del cilindro con volumen 100 l.
- temperatura aire de red 30°C a 6 bar de presión.
- temperatura aire en el cilindro 10°C (final)

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2$$

$$100 : V_2 = 273 + 30 : 273 + 10$$

$$V_2 = \frac{100 \times 283}{303} = 93,4 \text{ l.}$$

Del mismo modo para la presión:

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

$$6 : P_2 = 273 + 30 : 273 + 10$$

$$P_2 = \frac{6 \times 283}{303} = 5,6 \text{ bar}$$

En los dos casos como se ve existe una variación a menos de solamente el 6,6%.

Para el cálculo del consumo de aire en litros minuto de un cilindro, ver sección 8

Características de flujo

Cada cilindro, para realizar un determinado empuje y conseguir la carrera en el tiempo requerido, necesita de un determinado caudal que atraviese la válvula de mando.

Es necesario por tanto conocer las leyes de flujo de las válvulas, o sea, las relaciones existentes entre las presiones, caídas de presión y caudales, para comprobar que una válvula está en condiciones de suministrar, a la presión de alimentación prefijada, el flujo requerido por el cilindro con una caída de presión admisible.

Para esta verificación no es necesario tener datos precisos de funcionamiento.

Estos casos vienen presentados de manera diversa, según varias normas y varios métodos experimentales de medida, y consisten sobre todo en coeficientes numéricos que aplicados a oportunas fórmulas definen muy aproximadamente el caudal de las válvulas.

Para comprender el significado de estas fórmulas es necesario examinar cual es el movimiento del flujo en las válvulas neumáticas.

Supongamos que tenemos una válvula alimentada con una presión absoluta a monte P_1 constante y conectamos la utilización de válvula a un regulador de flujo.

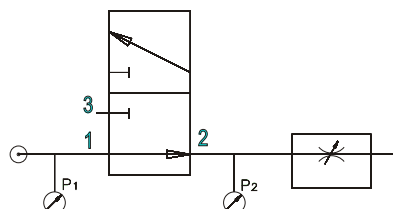
Condiciones iniciales: regulador de flujo cerrado

- caudal nulo ($Q=0$)

- presión a valle igual a la presión a monte ($P_2=P_1$)

Condiciones intermedias: regulador de flujo en apertura

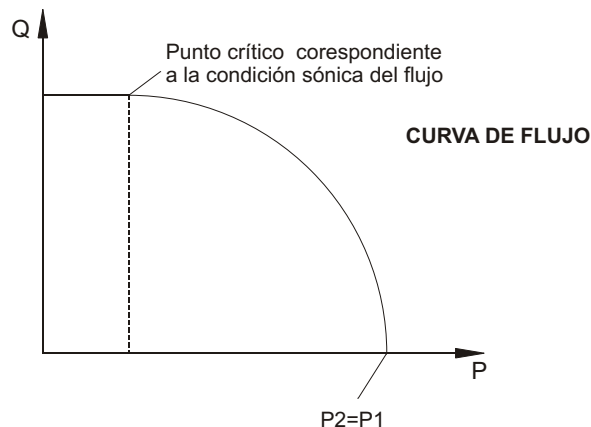
Abriendo progresivamente el regulador de flujo se tendrá una caída de la P_2 y un aumento de caudal hasta un punto crítico a partir del cual, incluso abriendo el regulador de flujo, el caudal permanece constante. El punto crítico corresponde a la condición sónica del flujo.



Condiciones finales: regulador de flujo completamente abierto

- caudal máximo (permanece constante a partir del punto crítico)

- presión a valle $P_2=0$



Al variar P_1 las curvas mantienen el mismo comportamiento y se desplazan a campos de caudal superiores o inferiores según suba o baje P_1 . En el segundo caso podría faltar el tramo horizontal con flujo de la válvula que no alcance el punto crítico. La línea que mayormente interesa en el uso corriente de las válvulas neumáticas es la línea subsónica anterior al logro de las condiciones críticas del flujo. De esta línea se derivan diversas expresiones que se aproximan al curso efectivo y que permiten expresar de modo simple el flujo, utilizando coeficientes experimentales.

COEFICIENTE DE VÁLVULA "C" Y "B"

La recomendación CETOP RP50P (tomada de la normativa ISO 6358) nos da una expresión del caudal en base a dos coeficientes experimentales:

- La conductibilidad "C"
- Relación crítica de la presión "b"

La conductividad $C = Q^*/P_1$ es la relación entre el caudal máximo Q y la presión absoluta de la entrada P_1 en condiciones de flujo sónico y una temperatura del aire de 20°C.

El grado crítico $b = P^*/P_1$ es la correlación entre la presión absoluta de salida P_2 y la presión absoluta de entrada P_1 por el que el flujo se hace sónico.

La formula que representa una aproximación de tipo elíptico de la relación que existe entre la presión y el caudal es la siguiente:

$$Q_N = C \cdot P_1 \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2} \quad [1]$$

donde: Q_N (dm^3/s) es el caudal expresado en condiciones normales correspondientes a 1,013 bar y 20°C;

C ($\frac{\text{dm}^3}{\text{s} \cdot \text{bar}}$) es la conductividad de la válvula;

P_1 (bar) es la presión absoluta de alimentación en bar;

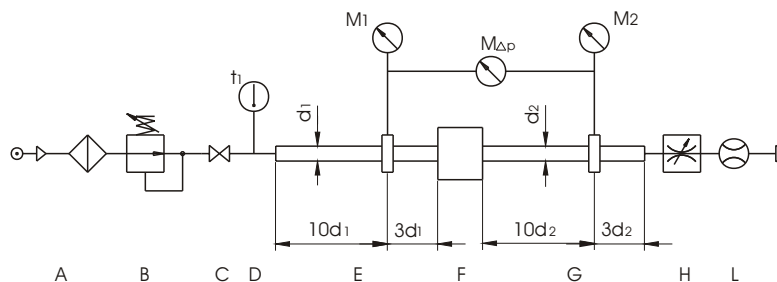
r es la relación entre presión de la válvula y la presión de punta (P_2/P_1);

b es la relación crítica de las presiones;

$k_t = \sqrt{293/T_1}$ es un factor correctivo que tiene en cuenta la temperatura absoluta de entrada T_1 ;

$T_1 = 273 + t_1$ (°K) es la temperatura absoluta (t_1 es la temperatura en °C).

La determinación experimental de los coeficientes "C" y "b" de la válvula se efectúa con aire comprimido de acuerdo con procedimientos estandarizados y utilizando el circuito de prueba reflejado a continuación.



Circuito de prueba CETOP

- A Fuente de aire comprimido.
- B Reductor de presión para la regulación de la presión de cresta P_1 .
- C Llave de paso.
- D Medidor de la temperatura de entrada t_1 , situado en la zona en la que el flujo lleva baja velocidad.
- E Tubo de medición de la presión en cresta.
- F Válvula de prueba.
- G Tubo de medida de la presión a valle.
- H Regulador de caudal para variar la presión de salida P_2 .
- L Medidor de caudal.
- M_1, M_2 Instrumentos de medida de las presiones respectivas de entrada y salida.
- $M_{\Delta P}$ Instrumentos de medida de la caída de presión en el caso de que $P_1 - P_2 < 1$ bar.

En particular, para la medida de las presiones en cresta y a valle de las válvulas es necesario utilizar tubos de medida previstos por la norma, cuyas dimensiones varían en función de las conexiones roscadas de la válvula, y en los puntos de medida de la presión se encuentran en una posición muy precisa en función del diámetro interno del tubo. La conductividad "C" se determina con la fórmula siguiente, midiendo el caudal crítico Q^* que atraviesa válvula con una presión en cresta P_1 constante y superior a 3 bar absolutos y con una temperatura del aire de entrada T_1 .

$$C = \frac{Q^*}{P_1 \cdot K_t} \quad [2]$$

La relación crítica de las presiones “b” se determina teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$b = 1 - \frac{\Delta P}{P_1 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Q'}{Q^*} \right)^2} \right]} \quad [3]$$

Para una determinada presión P_1 constante, se mide el caudal Q' correspondiente a una caída de presión $\Delta P = P_1 - P_2 = 1 \text{ bar}$.

Para determinar la relación crítica “b”, se utiliza la fórmula [3] porque experimentalmente no es fácil probar con precisión P_2^* por la que el flujo se hace sónico.

Tanto los valores de la conductibilidad “C” como los de la relación crítica “b” se obtienen como media entre los datos experimentales de numerosas pruebas. La fórmula [1] se utiliza, conocidos los coeficientes “C” y “b” y las condiciones operativas de la válvula (P_1, P_2, T_1), para calcular el caudal cuando el régimen es subsónico $P_2 > b \cdot P_1$.

En las condiciones sónicas, $P_2 \leq b \cdot P_1$, la fórmula [1] se simplifica y el caudal máximo se obtiene de:

$$Q^* = C \cdot P_1 \cdot k_t \quad [4]$$

COEFICIENTE HIDRÁULICO K_v

El coeficiente hidráulico permite calcular el caudal de líquido que atraviesa una válvula utilizando la siguiente relación:

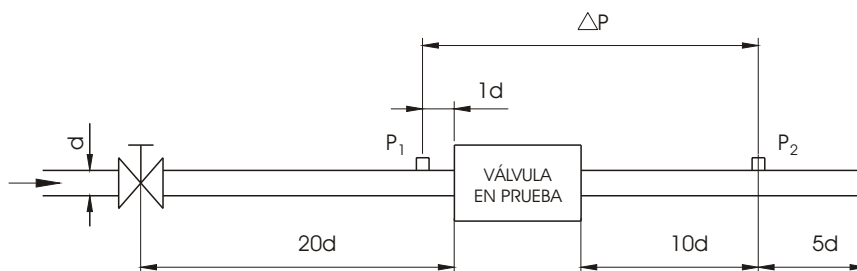
$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (\text{l/min}) \quad [5]$$

donde:
 Q es el caudal del líquido en l/min
 Δp es la caída de presión a través de la válvula en bar ($P_1 - P_2$)
 ρ Es la densidad del líquido en Kg/dm^3

K_v el coeficiente hidráulico en $\frac{\text{l}}{\text{min}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3 \cdot \text{bar}} \right)^{1/2}$

Con esta unidad el coeficiente de flujo “ K_v ” representa el caudal de agua en litros por minuto que atraviesa la válvula con una pérdida de carga de 1 bar.

Para la medida se utiliza un circuito estandarizado en el que las tomas de presión se encuentran en posiciones fijas del diámetro “d” interno del tubo (Norma VDE/VDI 2173).



Circuito hidráulico

En algunos casos el caudal se mide en m^3/h , al que corresponde un K_v ,

en este caso para obtener el $K_v \frac{\text{l}}{\text{min}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3 \cdot \text{bar}} \right)^{1/2}$ basta multiplicar el valor del K_v en $\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3 \cdot \text{bar}} \right)^{1/2}$

por el coeficiente numérico 16,66.

La utilización del coeficiente hidráulico K_v es perfectamente idóneo para definir el caudal del líquido, mientras que nos aporta valores aproximados en el caso del aire comprimido.

La transferencia del caso hidráulico al del aire puede ser sin embargo hecho teniendo en cuenta la variación de densidad y con las hipótesis de que el aire produzca los mismos efectos que los del agua, con análogas pérdidas y contracciones del flujo.

Se pueden por tanto obtener expresiones válidas para el aire comprimido utilizando los mismos coeficientes del caudal medidos con agua.

Entre varias fórmulas que nos dan el caudal QN que atraviesa una válvula para una presión P1 absoluta de entrada constante al variar la P2 absoluta a valle, se encuentra la siguiente:

$$Q_N = 28,6 \cdot K_v \cdot \sqrt{P_2 \cdot \Delta P} \cdot \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \quad [6]$$

- donde:
- Qn es el caudal en volumen en l/min;
 - Kv es el coeficiente hidráulico en $\frac{l}{min} \left(\frac{kg}{dm^3 \cdot bar} \right)^{1/2}$
 - Tn es la temperatura absoluta de referencia;
 - T1 es la temperatura absoluta de entrada en °K;
 - P2 es la presión absoluta de salida en bar;
 - ΔP es la caída de presión P1 - P2 en bar.

La ecuación [6] es válida hasta un valor de $\Delta P = \frac{P_1}{2}$ o sea $P_2 = \frac{P_1}{2}$

Para los valores de P2 inferiores se asume un caudal constante correspondiente a la sónica Q*N dada por la fórmula:

$$Q^*_N = 14,3 \cdot K_v \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \quad [7]$$

CAUDAL NOMINAL QNn

El caudal nominal es el flujo en volumen (expresado en las condiciones normales) que atraviesa la válvula con una presión relativa de entrada P1 = 6 bar (7 bar absolutos) y con una caída de presión de 1 bar, correspondiente a una presión relativa de salida P2 = 5 bar (6 bar absolutos). Habitualmente el caudal nominal viene dado en l/min y puede ser fácilmente obtenido por la curva experimental del flujo trazada para una presión en cresta de 6 bar relativos. El caudal nominal puede ser útil para una primera valoración de las prestaciones de las distintas válvulas, pero es directamente utilizable solo si las condiciones de empleo son afines a las mismas. Para poder comparar válvulas cuyas prestaciones están dadas con coeficientes distintos se pueden utilizar fórmulas de paso. Conocidos coeficientes "C" y "b" el correspondiente valor del caudal nominal se puede obtener de la fórmula:

$$Q_{Nn} = 420 \cdot C \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,857 - b}{1 - b} \right)^2} \quad [8]$$

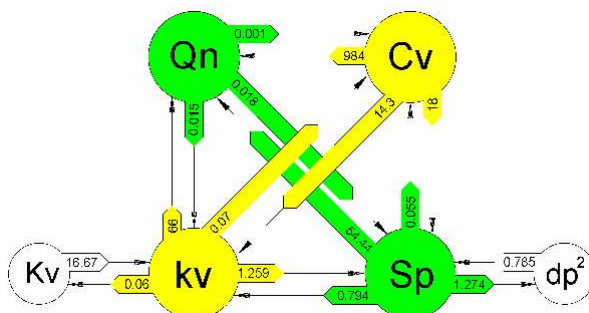
- donde: QNn = es en l/min y C en $\frac{dm^3}{s \cdot bar}$

La relación entre el coeficiente hidráulico KV y el correspondiente del caudal nominal es la siguiente:

$$Q_{Nn} = 66 K_v$$

- donde: QNn es en l/min y KV en $\frac{l}{min} \left(\frac{kg}{dm^3 \cdot bar} \right)^{1/2}$ [9]

Tabla conversiones



Qn	Caudal nominal	NI/min
kv		l/min
Kv	Coeficiente hidráulico	m³/hora
Cv		galones USA/min
Sp	Sección nominal de paso	mm²
dp²	Diámetro² Nominal de paso *	mm⁴

* para obtener el diámetro dp (mm²) ejecutar la raíz cuadrada de dp²