

## ESCURRIMIENTO EN TOBERAS

Las toberas son pequeños conductos destinados a transformar la energía potencial del vapor en energía cinética, que a su vez es cedida a las paletas del rotor de la turbina, transformándose en energía mecánica.

Se debe diseñar la tobera, para que la expansión del vapor desde la presión inicial  $P_0$  hasta la contrapresión  $P_1$ , se realice sin pérdidas (expansión isoentrópica). Es un proceso de derrame, sin intercambio de calor (adiabático) y sin realizar trabajo mecánico.

La ecuación diferencial del movimiento unidimensional, sin rozamiento es la siguiente:

$$-v dp = c dc$$

La integral de esta ecuación entre los límites 0 y 1, es la superficie en el diagrama p-v, cuando el vapor se expande isoentrópicamente desde la presión  $P_0$  hasta  $P_1$ . Es el trabajo que puede realizar 1 kg de vapor en una máquina ideal y es igual a la diferencia de entalpías ( $i_0 - i_{1s}$ ):

$$\text{Sup. de Trabajo } a_{01b} = -v dp = i_0 - i_1 = (c_{1s}^2 - c_0^2) / 2$$

$$\text{De donde resulta: } c_{1s} = \sqrt{2 * (i_0 - i_{1s}) + c_0^2}$$

Si la sección de entrada es tan grande que se puede suponer  $c_0 = 0$  resulta:

$$c_{1s} = \sqrt{2 * (i_0 - i_{1s})}$$

En el sistema internacional de unidades se define la entalpía en Nm / kg y en el sistema técnico en kcal / kp, siendo entonces:

$$c_{1s} = \sqrt{2 * g / A * (i_0 - i_{1s})} \quad (\text{m / s})$$

$g$  = aceleración de la gravedad = 9.8065 m / s

$A$  = equivalente mecánico del calor = 1 / 426.9 (kcal / kp.m)

$$c_{1s} = 91.5 * \sqrt{(i_0 - i_{1s})} \quad (\text{m / s})$$

En el caso de la expansión real con pérdidas (con aumento de entropía), la velocidad vale:

$$c_1 = \varphi \cdot c_{1s} \quad \varphi = \text{coeficiente de velocidad}$$

En el caso de escurrimiento supercrítico (relación de presión menor que la crítica), se usan toberas convergente - divergente, tipo de Laval. En la sección

mínima se establece la presión crítica  $p_k$ :  $\frac{k}{k-1}$

$$P_k = P_0 \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)$$

Para vapor sobrecalentado:  $P_k = 0.547 P_0$  ( $k = 1.300$ )

Para vapor saturado:  $P_k = 0.577 P_0$  ( $k = 1.135$ )

Para aire seco:  $P_k = 0.5266 P_0$  ( $k = 1.410$ )

El vapor alcanza en la sección mínima la velocidad del sonido:

$$C_k = \sqrt{2g * \frac{k}{k+1} * p_o * v_o * 10^4} \quad (\text{m/s}); \text{ con } P_o \text{ (ata); } v_o \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

Para vapor sobrecalentado:	$C_k = 333 * \sqrt{p_o * v_o}$
Para vapor saturado	$C_k = 323 * \sqrt{p_o * v_o}$
Para aire seco	$C_k = 339 * \sqrt{p_o * v_o}$

**DETERMINACION DEL CAUDAL DE VAPOR:**

$$G_s = \frac{C_k * F_{min}}{V_k} \quad (\text{kg/s})$$

Para una expansión isentrópica es:  $V_k = V_o. \left( \frac{P_o}{P_k} \right)^{1/k}$

Reemplazando resulta:

Para vapor sobrecalentado:  $G_s = 209. F_{min}. \mu * \sqrt{\frac{P_o}{V_o}} \quad (\text{Kg/s})$

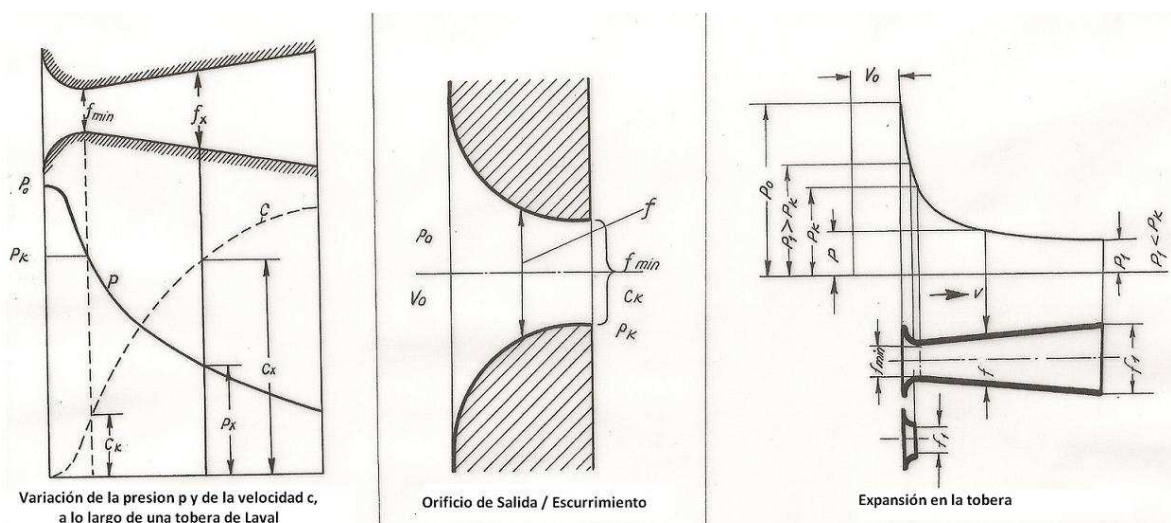
Para vapor saturado:  $G_s = 199. F_{min}. \mu * \sqrt{\frac{P_o}{V_o}} \quad (\text{kg/s})$

Para aire:  $G_a = 215. F_{min}. \mu * \sqrt{\frac{P_o}{V_o}} \quad (\text{kg/s})$

con  $F_{min}$  en  $\text{m}^2$  y  $\mu$  = coeficiente de escurrimiento determinado mediante ensayos. Para boquillas y toberas normalizadas es  $\mu = 1$

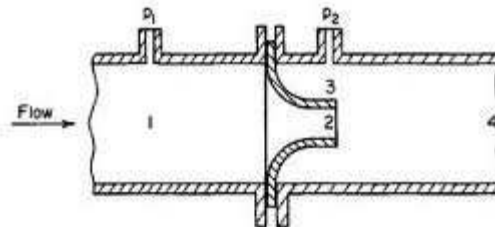
**O sea que en el caso de escurrimientos supercríticos, el caudal de vapor o gas a través de toberas y boquillas depende únicamente de las condiciones iniciales cuando en la sección mínima se alcanza la velocidad del sonido  $C_k$ .**

**En estos casos, también se puede calcular el caudal de vapor con las normas DIN 1952.**



**(Conforme NORMAS DIN 1952, pág. 21)**

En el caso de fuertes expansiones de un gas o vapor a través de boquillas y toberas normalizadas, con relación de presiones menor o igual a la crítica:  $P_2/P_1 \leq P_k$ ,



se establece en la sección mínima la velocidad del sonido correspondiente al estado del fluido en la misma ( presión y temperatura )

En estas condiciones el caudal (kg / s) depende solamente del estado inicial del fluido y de la sección mínima:

$$G_s = \alpha \times F_{min} \times \psi \times \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \quad [\text{kg/s}]$$

$p_1$  = presión inicial [ata]

$v_1$  = volumen específico inicial [  $\frac{m^3}{kg}$  ]

$\alpha$  = coeficiente de escurrimiento para gases y vapores

$\psi$  = cifra de escurrimiento para gases y vapores:

$$\psi = \frac{\sqrt{1 - m^2 \times \mu^2}}{\sqrt{1 - m^2 \times \mu^2 \times \left[\frac{p_2}{p_1}\right]^{\frac{2}{k}}}} \times \sqrt{2g \frac{k}{k-1}} \times \sqrt{\left[\frac{p_2}{p_1}\right]^{\frac{2}{k}} - \left[\frac{p_2}{p_1}\right]^{\frac{k+1}{k}}}$$

$k = C_p/C_v$

$m =$  relación de secciones  $(d / D)^2$

$\mu =$  cifra de contracción, que para el caso de boquillas y toberas bien construidas, conforme NORMAS, es aproximadamente igual a 1.

La cifra de escurrimiento  $\psi$  alcanza para la relación crítica de presiones su valor máximo y permanece constante para relaciones menores.

Las normas DIN 1952 muestran unos registros de Schiller que permiten calcular el caudal con la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{\alpha \times \psi}{\sqrt{2g}} \times 1,2522 \times d^2 \times \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \quad [\text{kg / h}] \quad (\alpha)$$

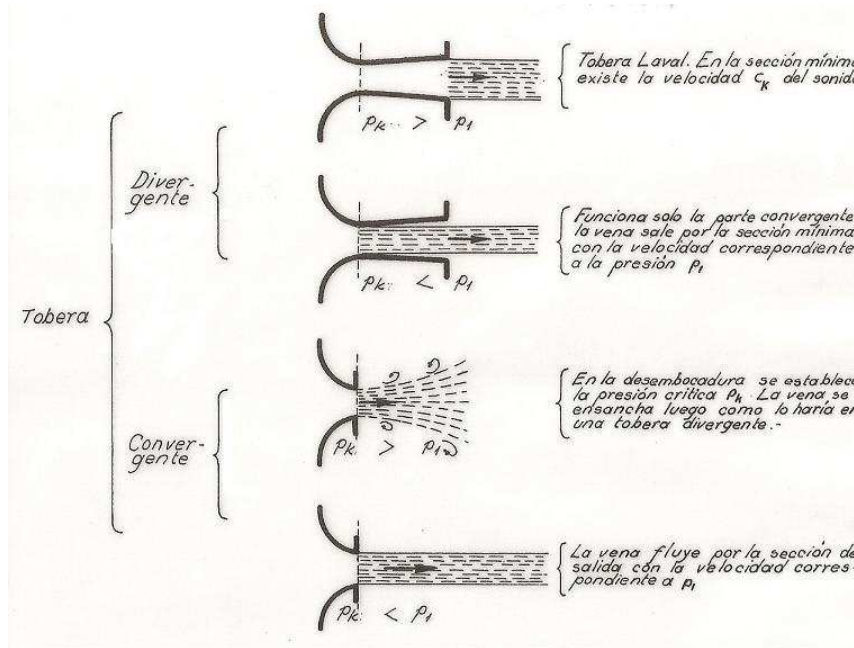
donde  $\frac{\alpha \psi}{\sqrt{2g}}$  [1] se toma de la fig.XXI con  $d$  en [mm],  $p_1$  en [ata] y  $v_1$  en [  $\frac{m^3}{kg}$  ]

Para escurrimiento de vapor sobrecalentado ( $k = 1,31$ ) y con relación de presiones menor o igual que la crítica (valor medio 0,55), el factor [1] tiene el valor 0,468 que es constante.

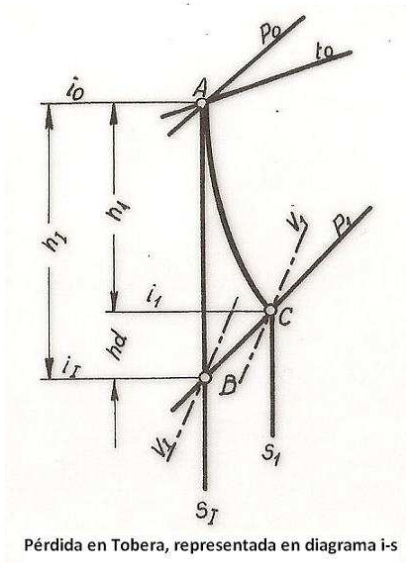
Para el caso de escurrimiento de aire ( $k = 1,41$ ) a través de boquillas normalizadas Schiller da para el factor [1] el valor 0,481 cuando la relación de presiones es menor o igual a la crítica.

Este método para medir caudales de vapor y gases bajo fuertes expansiones, es aplicable entre otros casos a los ensayos de sistemas y bombas de vacío y de turbinas de vapor.

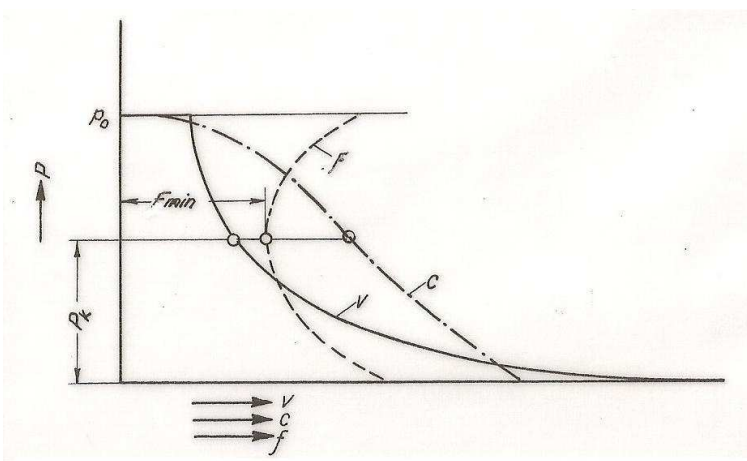
Los registros de Schiller también dan valores del factor [1] para los casos de escurrimiento de vapor a través de placas de orificio con diferentes relaciones de secciones  $m = (d/D)^2$ . Se observa en este caso que no hay una relación de presiones por debajo de la cual el factor [1] sea constante. Esto es así porque en las placas de orificio no se establece la presión crítica y por lo tanto el vapor no alcanza la velocidad del sonido.



Comportamiento del vapor en toberas convergentes y divergentes



Pérdida en Tobera, representada en diagrama i-s



Variación del volumen específico, velocidad y sección de la tobera en función de la presión