

DIÁMETRO ECONÓMICO DE TUBERÍAS EN CENTRALES TÉRMICAS

Autor: José Agüera Soriano
Universidad de Córdoba

1. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua que fluye por las tuberías destruye exergía. Ello es debido al rozamiento del flujo y al calor disipado a través del aislante que las envuelve.

Para un determinado caudal, si colocamos tubería de menos diámetro, reducimos el coste de instalación pero a costa de aumentar la velocidad del flujo, lo que origina mayor rozamiento y, en consecuencia, una mayor destrucción exérgica en la explotación. **Son pues dos intereses contrapuestos que habría que optimizar.**

2. FUNCIÓN COSTE

Para obtener el diámetro económico, buscaremos una expresión que dé el coste en función del diámetro nominal, $C(D_n)$, que contemple instalación y explotación:

$$C(D_n) = C_1(D_n) + C_2(D_n) \quad (1)$$

Igualando a cero su derivada ($dC/dD_n = 0$), se obtiene el valor del diámetro que hace mínimo dicho coste. Tomaremos un metro de tubería; cualquier longitud L que tomáramos nos valdría.

2.1. TÉRMINO $C_1(D_n)$

$C_1(D_n)$ es el importe de un metro de tubería instalada, que incluye montaje y aislamiento, beneficio industrial, proyecto, impuestos,.. (un total aproximado del 250%, que hay que ajustar en cada caso). Debido a las altas presiones y a los caudales en las tuberías principales, el espesor ε de la tubería puede llegar a ser de hasta 9 cm. A esto se une que el material (acero al carbono), su fabricación y su colocación resultan caros. Hay muchos tipos de acero al carbono [1], y en cada tubería, dependiendo de la presión y de la temperatura de trabajo resultará diferente. Por ejemplo, para la tubería del vapor principal (la que une el sobrecalentador con la turbina de alta presión) se está utilizando acero al carbono A335, P22.

En la tabla 2 [2], aparecen diámetros nominales D_n de hasta 80 pulgadas. Para cada diámetro hay diversos espesores. Uno de ellos es el estándar (STD), del que solicitaremos

el precio (para el material elegido) de una serie de diámetros (4 ó 5) que estimemos próximos al que buscamos, a los que añadiremos los gastos e impuestos antes señalados.

Por el método de mínimos cuadrados, ajustamos estos 4 ó 5 precios resultantes a la expresión potencial:

$$C_{STD}(D_n) = c_{STD} \cdot D_n^x \quad (2)$$

En la que x va a resultar entre 1 y 2.

El precio para otra tubería de igual diámetro y distinto espesor puede determinarse con bastante aproximación por la expresión,

$$C_1(D_n) = \frac{m}{m_{STD}} \cdot c_{STD} \cdot D_n^x \quad (3)$$

m_{STD} = masa del metro lineal de espesor estándar

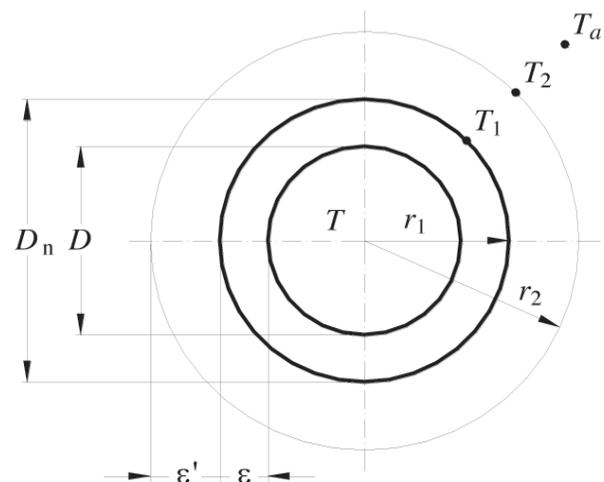
m = masa del metro lineal de igual diámetro y con el espesor que corresponda

El espesor ε de la tubería aumenta con la presión y con el diámetro, y disminuye con materiales más resistentes, o de mayor tensión σ admisible. Podría utilizarse la expresión

$$\varepsilon = B \cdot \frac{p \cdot D_n}{2 \cdot (E \cdot \sigma + Y \cdot p)}$$

En la que,

- $B = 1,125$ (coeficiente de seguridad requerido por norma)
- p = presión interior
- D_n = diámetro exterior o nominal de la tubería
- σ = tensión admisible del material conformado para tuberías
- E = factor de junta (por soldadura) que generalmente será la unidad [4]
- Y = factor del material; en general, $Y = 0,7$ para acero al carbono no aleado e $Y = 0,4$ para los aleados [5].



$$\varepsilon = 1,125 \cdot \frac{p \cdot D_n}{2 \cdot (\sigma + Y \cdot p)} \quad (4)$$

$$\varepsilon = b \cdot D_n \quad (5)$$

$$b = 1,125 \cdot \frac{p}{2 \cdot (\sigma + Y \cdot p)} \quad (6)$$

El adimensional b depende del material de la tubería y de la presión y temperatura del vapor, independiente del diámetro que buscamos, por lo que puede calcularse previamente.

El cociente m/m_{STD} de la ec.3 lo vamos a expresar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{m}{m_{\text{STD}}} &= \frac{\rho \cdot \pi \cdot (D_n^2 - D_{\text{STD}}^2)/4}{\rho \cdot \pi \cdot (D_n^2 - D_{\text{STD}}^2)/4} = \frac{D_n^2 - (D_n - 2 \cdot \varepsilon)^2}{D_n^2 - (D_n - 2 \cdot \varepsilon_{\text{STD}})^2} = \\ &= \frac{D_n^2 - (D_n^2 + 4 \cdot \varepsilon^2 - 4 \cdot \varepsilon \cdot D_n)}{D_n^2 - (D_n^2 + 4 \cdot \varepsilon_{\text{STD}}^2 - 4 \cdot \varepsilon_{\text{STD}} \cdot D_n)} = \\ &= \frac{\varepsilon \cdot D_n - \varepsilon^2}{\varepsilon_{\text{STD}} \cdot D_n - \varepsilon_{\text{STD}}^2} = \frac{b \cdot D_n^2 - b^2 \cdot D_n^2}{\varepsilon_{\text{STD}} \cdot (D_n - \varepsilon_{\text{STD}})} \end{aligned}$$

El denominador es prácticamente una función lineal de D_n . (si la ajustamos a una función potencial, el exponente resulta muy próximo a la unidad):

$$\varepsilon_{\text{STD}} \cdot (D_n - \varepsilon_{\text{STD}}) = K \cdot D_n \quad (7)$$

Definitivamente, la ec.3,

$$C_1(D_n) = \frac{m}{m_{\text{STD}}} \cdot c_{\text{STD}} \cdot D_n^x$$

podría adoptar la forma:

$$C_1(D_n) = \frac{b - b^2}{K} \cdot c_{\text{STD}} \cdot D_n^{x+1} \quad (8)$$

2.2. TÉRMINO $C_2(D_n)$

2.2.1. Consideraciones económicas

El segundo término $C_2(D_n)$ de la Ec.1, es el coste económico de la *exergía destruida* durante la vida útil de la instalación, multiplicada por el *coste exergético unitario* k del *producto vapor* ($k = 2,15$ veces el precio del combustible) [6]. El *coste económico* de la *exergía destruida* sería [6],

1. Cuando el combustible se compra en termias (carbón),

$$A = \dot{e}_d \text{ (kW)} \cdot k \cdot 0,8598 \text{ (termia/kWh)} \cdot P \text{ (u.m./termia)} \cdot h \text{ (horas/año)}$$

$$A = \dot{e}_d \cdot 2,15 \cdot 0,8598 \cdot P \cdot h \text{ u.m./año} \quad (9)$$

- A = coste anual
- \dot{e}_d = exergía destruida por segundo en kW.
- P = precio del combustible en las unidades monetarias utilizadas (u.m.)

2. Cuando el combustible se compra en kg (líquidos)

$$A = \dot{e}_d \text{ (kJ/s)} \cdot 3600 \text{ (s/h)} \cdot k \cdot \frac{P \text{ (u.m./kg)}}{H_u \text{ (kJ/kg)}} \cdot h \text{ (horas/año)} \quad (10)$$

$$A = \dot{e}_d \cdot 3600 \cdot 2,15 \cdot \frac{P}{H_u} \cdot h \text{ u.m./año}$$

- H_u kJ/kg = poder calorífico inferior del combustible.

Las anualidades, durante los t años que estimemos de vida útil, habrá por supuesto que *actualizarlas* para traerlas al momento presente, *como si de una inversión inicial se tratara*; única forma de poderlas sumar a $C_1(D_n)$:

$$C_2(D_n) = \frac{A}{1+r} + \frac{A}{(1+r)^2} + \dots + \frac{A}{(1+r)^t}$$

Si se utilizan *unidades monetarias corrientes*, la anualidad A aumentará con el tiempo; en tal caso, habría que estudiar mediante datos estadísticos de años anteriores su posible ley de variación para el futuro, mediante una extrapolación, lo que no es lo más razonable. Entendemos que es más práctico y correcto utilizar *unidades monetarias constantes*: $A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_t$; pero, a cambio, a la hora de calcular el *factor de actualización* en la expresión anterior, hemos de tomar el *interés real* en lugar del *nominal*:

$$\text{interés real} = \text{interés nominal} - \text{inflación}$$

Con ésta hipótesis, la ecuación anterior adopta la forma,

$$C_2(D_n) = \frac{A}{1+r} + \frac{A}{(1+r)^2} + \dots + \frac{A}{(1+r)^t} \quad (11)$$

$$C_2(D_n) = A \cdot \frac{(1+r)^t - 1}{(1+r)^t \cdot r} = A \cdot s$$

El factor,

$$s = \frac{(1+r)^t - 1}{(1+r)^t \cdot r}$$

es el *factor de actualización*, o la inversa del *factor de amortización*:

$$a = \frac{(1+r)^t \cdot r}{(1+r)^t - 1} \quad (12)$$

- r = tanto por uno de interés real.
- t = años de explotación previstos.

2.2.2. Exergía destruida por rozamiento del flujo

La fórmula de Darcy-Weissbach para tuberías circulares, que nos da el rozamiento del flujo, será para un metro de longitud,

$$W_r = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{V^2}{2}$$

• f = coeficiente de fricción en tuberías que habría que valorar en cada caso; pero para longitudes pequeñas, como ocurre en una central térmica, su variación es despreciable. Tomaremos el valor, $f = 0,012$.

• D = diámetro interior ($D = D_n - 2 \cdot \varepsilon$)

• V = velocidad media del flujo

Y en función del caudal másico \dot{m} (ecuación de continuidad)

$$V = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot D^2} \quad (\rho = \text{densidad})$$

$$W_r = \frac{8}{\pi^2} \cdot 0,012 \cdot \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{\dot{m}^2}{D^5} = 0,01 \cdot \frac{\dot{m}^2}{\rho^2 \cdot D^5}$$

La exergía destruida por metro de tubería a causa del rozamiento, es el producto de la temperatura kelvin T_a del medio ambiente por la entropía generada, s_g :

$$e_{d\text{roz}} = T_a \cdot s_g = T_a \cdot \frac{W_r}{T} = \frac{T_a}{T} \cdot 0,01 \cdot \frac{\dot{m}^2}{\rho^2 \cdot D^5} \quad \text{J/kg} \quad (\text{en S.I.})$$

Y para el caudal másico \dot{m} que circula por la tubería:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{d\text{roz}} &= \dot{m} \cdot e_{d\text{roz}} = 0,01 \cdot \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2 \cdot D^5} \cdot \dot{e}_{d\text{roz}} = 0,01 \cdot \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot (D_n - 2 \cdot \varepsilon)^{-5} = \\ &= 0,01 \cdot \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot (D_n - 2 \cdot b \cdot D_n)^{-5} \quad \text{W} \\ \dot{e}_{d\text{roz}} &= \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot D_n^{-5} \cdot (1 - 2 \cdot b)^{-5} \cdot 10^{-5} \quad \text{kW} \end{aligned} \quad (13)$$

2.2.3. Exergía destruida por pérdidas de calor

Podríamos calcular en principio la exergía destruida por pérdidas de calor cuando la tubería está sin aislar, y luego fijar un porcentaje (10% por ejemplo) para calcular el aislamiento.

Sin embargo, el diámetro que buscamos no va a depender de dicho aislamiento, ya que al derivar quedará anulado el término correspondiente, por no figurar en él el diámetro. En efecto, el calor disipado cuando la tubería está sin aislar sería (k = conductividad térmica de la tubería),

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{T - T_a}{\ln \frac{D_n}{D}} = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{T - T_a}{\ln \frac{D_n}{D_n - 2 \cdot \varepsilon}} = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{T - T_a}{\ln \frac{D_n}{D_n - 2 \cdot b}} \\ &= 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{T - T_a}{\ln \frac{D_n}{D_n - 2 \cdot b \cdot D_n}} = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{T - T_a}{\ln \frac{1}{1 - 2 \cdot b}} \end{aligned}$$

Sea cual fuere el diámetro. Así pues, sólo depende del tipo de material y del estado del vapor, igual que le ocurre a b .

2.3. DIÁMETRO ECONÓMICO

Teniendo en cuenta las Ecs. 11, 12, 8, 9 (si se compran termias) y 13, la Ec.1 adoptaría la forma:

$$C(D_n) = C_1(D_n) + C_2(D_n) = C_1(D_n) + \frac{A_{\text{roz}} + A_{\text{calor}}}{a}$$

$$C(D_n) = \frac{b - b^2}{K} \cdot c_{\text{STD}} \cdot D_n^{x+1} + \frac{\dot{e}_{d\text{roz}}}{a} \cdot 2,15 \cdot 0,8598 \cdot P \cdot h + \frac{A_{\text{calor}}}{a}$$

$$C(D_n) = \frac{b - b^2}{K} \cdot c_{\text{STD}} \cdot D_n^{x+1} + \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot D_n^{-5} \cdot (1 - 2 \cdot b)^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot 2,15 \cdot 0,8598 \cdot P \cdot h + \frac{A_{\text{calor}}}{a}$$

Derivamos respecto a D_n e igualamos a cero:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dD_n} &= \frac{b - b^2}{K} \cdot c_{\text{STD}} \cdot (x + 1) \cdot D_n^x - \\ &\quad - \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot 5 \cdot D_n^{-6} \cdot (1 - 2 \cdot b)^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot 2,15 \cdot 0,8598 \cdot P \cdot h + 0 = 0 \end{aligned}$$

$$D_n^{x+6} = 9,243 \cdot \frac{K/(b - b^2)}{c_{\text{STD}} \cdot (x + 1)} \cdot \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot (1 - 2 \cdot b)^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot h$$

$$D_n = \left(9,243 \cdot \frac{K/(b - b^2)}{c_{\text{STD}} \cdot (x + 1)} \cdot \frac{T_a}{T} \cdot \frac{\dot{m}^3}{\rho^2} \cdot (1 - 2 \cdot b)^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot h \right)^{1/(x+6)} \quad (\text{ec. 14})$$

Esta es la fórmula que se propone para la obtención del diámetro económico de las tuberías de Centrales Térmicas:

- D_n = diámetro nominal (m)
- K = factor ec. 7 (m)
- b = adimensional ec. 6
- c_{STD} = coeficiente económico ajustado por mínimos cuadrados (ec. 2)
- x = exponente ec. 2
- T_a = temperatura kelvin del medio ambiente
- T = temperatura kelvin del vapor
- \dot{m} = caudal másico de vapor (kg/s)
- a = factor de amortización (ec. 12)
- ρ = densidad del vapor (kg/m³)
- P = precio del combustible (u.m.)
- h = horas anuales de funcionamiento

3. CONCLUSIONES

1. El diámetro económico es independiente de la longitud L de la tubería.
2. El precio del combustible a considerar será el vigente en el momento del proyecto; no procede estudiar una posible ley de variación de precio a lo largo de la vida útil de la instalación. En lugar de ello, el tipo de interés r que apliquemos será el real:

interés real = interés nominal - inflación.

3. El exponente del paréntesis (ec. 14) es tan reducido (del orden de 0,13), que pequeñas desviaciones de los parámetros que aparecen dentro no influirán prácticamente en el resultado.
4. El diámetro económico D_n que se obtenga no será lógicamente comercial. Podríamos tomar el comercial más próximo; pero, si ello representa una diferencia clara con el calculado, podría pensarse en colocar un tramo de tubería de longitud L_1 con el diámetro D_1 por exceso, y el resto L_2 con el D_2 por defecto, de manera que resulte una tubería en serie, equivalente al diámetro teórico D_n .

- [3] ansi/asmé B31.1 power piping american national standard p16
- [4] Tabla A-2 asme B31.1 2001 p120
- [5] Internet "una guía para el diseño de tuberías", tabla 5, p6
- [6] Agüera-Soriano J. "Termodinámica Lógica y Motores Térmicos, 6ª edición mejorada". I.S.B.N. 84-86204-98-4, p296-298. Libre disposición en WEB: www.uco.es/termodinamica
- [7] Agüera-Soriano J. Libre disposición en WEB: www.uco.es/termodinamica

PARA SABER MÁS

- [1] Tabla A-2 ASME B.31.1-2001
- [2] ansi/asmé B36.10M-1985 An American National Standard

MATERIAL ADICIONAL



Ver ejercicio práctico en el vínculo web:
http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/5866_2.pdf

DYNA

SUSCRIPCIÓN A LA REVISTA DE INGENIERÍA DYNA: 22% DE DESCUENTO PARA ESTUDIANTES

¿POR QUÉ SUSCRIBIRSE A DYNA?

- Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería más prestigiosas e influyentes del mundo como lo acredita su inclusión en Journal Citation Reports (JCR) que edita anualmente Thomson-Reuters.
- El informe JCR publica anualmente los Factores de Impacto de las mejores revistas académicas a nivel internacional.

¿QUÉ SE OBTIENE CON LA SUSCRIPCIÓN?

El suscriptor recibe ó números anuales de la publicación impresa en su domicilio, más una serie de servicios de valor añadido como:

- Mediante su usuario y contraseña, a través de la página web www.revistadyna.com, tienen acceso a los artículos publicados en formato Acrobat Reader. Un motor de búsqueda tipo Google permite realizar búsquedas (por palabras clave, título, autor, fecha...) en la base de datos de artículos publicados.
- Contacto con compañeros en la comunidad de lectores por medio de foros, encuestas, cartas al director...
- Mantenerse *formado* e *informado* sobre los últimos avances y noticias en la ingeniería.
- Boletín mensual por correo electrónico.
- Alertas configurables por palabras clave sobre contenidos.

¿QUÉ PRECIO TIENE?

La suscripción anual a DYNA para estudiantes cuesta **35€** (incluido IVA) **Ahorro del 22%** sobre precio tarifa 45€.

¿CÓMO SUSCRIBIRSE?

Envía un email con tus datos de contacto a dyna@revistadyna.com, justificando que eres estudiante de la Universidad y que te acoges a la promoción especial para alumnos.



**Publicando la
actualidad en la
ingeniería desde hace
mas de 85 años**

<http://www.revistadyna.com>
dyna@revistadyna.com