



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Aspectos básicos de diseño y cálculo de redes de vapor

Apellidos, nombre	Barrera Puigdollers, Cristina ¹ (mcbapu@tal.upv.es) Betoret Valls, Noelia ¹ (noebeval@tal.upv.es) Castelló Gómez, Marisa ¹ (mcasgo@upvnet.upv.es) Pérez Esteve, Édgar ¹ (edpees@upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se describen los principales elementos constitutivos de una red de distribución de vapor: tuberías, aislamiento de tuberías, purgadores, separadores de gotas y separadores de aire. También se introducen algunos aspectos básicos relacionados con el dimensionamiento de tuberías de vapor y el cálculo del espesor de la capa de aislante, así como recomendaciones fundamentales a tener en cuenta en la instalación de las mismas.

2 Introducción

La red de distribución de vapor es el conjunto de elementos que unen el generador de vapor (caldera) y los puntos de utilización [1]. Una vez en los puntos de consumo, el vapor cede su entalpía de condensación y se convierte en agua a una temperatura similar a la del vapor saturado, que puede alimentar la caldera y reducir el consumo energético. Por otra parte, la caída de presión debida a la condensación del vapor permite que éste fluya por la instalación sin necesidad de equipos de bombeo.

La presión a la que el vapor debe distribuirse está determinada por el equipo de la planta que requiere una mayor presión y por la caída de presión debida a la resistencia al paso del fluido y a las pérdidas de calor en la tubería [2]. Dado que el volumen que ocupa el vapor por unidad de masa disminuye con la presión, será conveniente distribuir el vapor a presión elevada para reducir el tamaño de las tuberías de distribución y el espesor del aislamiento, aunque ello suponga un mayor consumo de combustible en la caldera. Luego, mediante estaciones reductoras se ajustará la presión del vapor a los requisitos de los equipos en el punto de utilización. Además del correcto dimensionamiento de las tuberías y sus aislamientos, será imprescindible disponer de accesorios y seguir unas recomendaciones generales de diseño para proporcionar vapor de buena calidad, en las condiciones de caudal y presión requeridas, y con las mínimas pérdidas de calor y atenciones de mantenimiento.

3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Identificar y describir el funcionamiento de los elementos que integran un sistema de distribución de vapor y diseñarlos en aras a obtener mejoras en la producción y en la eficiencia energética del proceso.
- Dimensionar tuberías de distribución de vapor según la velocidad del vapor o según la máxima caída de presión admisible.
- Calcular el espesor de aislante necesario para minimizar las pérdidas de calor a través de las paredes de las tuberías que distribuyen el vapor.
- Hacer algunas recomendaciones sobre la forma de instalar las tuberías que distribuyen el vapor desde la caldera hasta los puntos de consumo.

3.1 Elementos constitutivos de la red de distribución de vapor

Cualquier red de distribución de un fluido se compone de tuberías y accesorios de tubería que, en el caso del vapor, soportan elevadas presiones y temperaturas, además de presentar características frente a la abrasión. Para garantizar la seguridad de los operarios y reducir las pérdidas de calor, toda la red está provista de aislamiento térmico. Finalmente, se incluyen accesorios que garantizan la ausencia de aire y agua mezclados con el vapor, así como estaciones reductoras que reducen la presión de vapor para ajustarse a los requerimientos de los equipos.

3.1.1 Tuberías

Las tuberías que más se utilizan en las redes de distribución de vapor son de acero al carbono y se fabrican con una longitud estándar de 6 m y sin soldadura (DIN 2448), según la norma europea UNE-EN 10216-1:2014 [3]. En la tabla 1 se muestra la información técnica correspondiente a tuberías DIN 2448 de diámetro nominal 150 mm y menores, por ser los más comúnmente utilizados en las instalaciones de vapor industriales.

Tabla 1. Información técnica de tuberías DIN 2448 de diferentes medidas [4].

Ø nominal (mm)	15	20	25	32	40	65	80	100	125	150
Ø exterior (mm)	21,3	26,9	33,7	42,4	48,3	76,1	88,9	114,3	139,7	159
espesor (mm)	2	2,3	2,6	2,6	2,6	2,9	3,2	3,6	4	4,5
peso (kg/m)	0,96	1,41	2,01	2,57	2,95	5,28	6,81	9,9	13,5	17,1

La selección del tamaño adecuado de tubería se puede llevar a cabo en función de la velocidad de flujo del vapor o en función de la máxima caída de presión admisible. Sin embargo, es conveniente hacer el cálculo por ambos métodos para garantizar que no se exceden los límites. Una vez calculado el diámetro interno de la tubería, habrá que escoger en el catálogo general del fabricante la tubería cuyo diámetro interno se parezca más al valor calculado. Hay que tener presente que sobredimensionar las tuberías implica costes más elevados y mayores pérdidas de calor, lo que conlleva la formación de un mayor volumen de condensado y el empobrecimiento del vapor entregado. Por el contrario, subdimensionar las tuberías implica aumentar la velocidad del vapor y la caída de presión, lo que eleva el riesgo de erosión y ruidos por golpe de ariete, unido al riesgo de que la presión o el volumen de vapor en el punto de utilización sean insuficientes.

Dimensionar las tuberías según la velocidad del vapor implica que el diámetro interno de las tuberías de distribución (\varnothing , en m) se calcula a partir del caudal volumétrico de vapor que se transporta (Q , en m^3/s) y de la velocidad de flujo (v , en m/s) (ecuación 1). A su vez, el caudal volumétrico está relacionado con el caudal másico (M , en kg/s) y el volumen específico del vapor (V , en m^3/kg) a la presión de distribución. La experiencia demuestra que son razonables las velocidades entre 25 - 40 m/s [2].

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{M \cdot V}{v} = \frac{\pi}{4} \cdot \varnothing^2$$

Ecuación 1. Dimensionado de tuberías acorde a la velocidad del vapor.



A modo de ejemplo, para transportar 3.000 kg/h de vapor saturado a 10 bar (volumen específico igual a 0,1944 m³/kg, según tablas [5]) y a una velocidad de 20 m/s sería necesario una tubería cuyo diámetro interno fuese de 101,55 mm. Según este cálculo, se optaría por una tubería DIN 2448 de 100 mm de diámetro nominal (DN100). Para llegar a este mismo resultado es posible aplicar un método de cálculo basado en el empleo del gráfico (imagen 1).

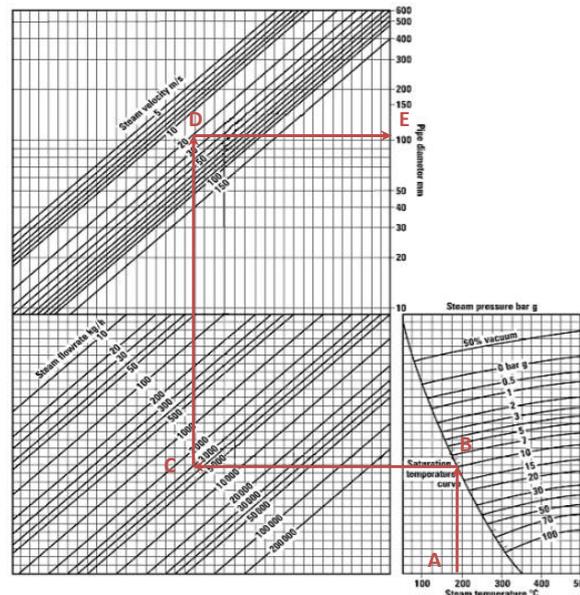


Imagen 1. Gráfico para dimensionar tuberías de distribución de vapor saturado y vapor recalentado según la velocidad de flujo [1] [2].

Dimensionar las tuberías según la caída de presión es esencial para mantener la temperatura del vapor y asegurar un adecuado intercambio de calor en el punto de utilización. Para aplicar este método de cálculo es necesario conocer la presión en el extremo de alimentación de la tubería (P_1) y la presión requerida en el punto de utilización (P_2), además de la longitud (L) y el coeficiente de fricción de la tubería (μ) (ecuación 2).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{P_1 - P_2}{L} = \frac{\mu \cdot v^2}{2 \cdot \phi \cdot V}$$

Ecuación 2. Dimensionado de tuberías acorde a la caída de presión.

La dificultad de aplicar este método de cálculo radica en determinar el factor de fricción de la tubería que, según la 3, varía con la rugosidad relativa de la tubería (ϵ/ϕ) y con el número de Reynolds (Re).

$$\frac{1}{\sqrt{\mu}} = -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{\epsilon/\phi}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\mu}} \right]$$

Ecuación 3. Expresión de la ecuación de White-Colebrook.

Sin embargo, hay numerosos gráficos, tablas e incluso reglas de cálculo para relacionar la caída de presión con el tamaño de tubería. El gráfico mostrado en la imagen 2 permite dimensionar tuberías a partir de la temperatura del



vapor, la presión, el caudal y la caída de presión. A modo de ejemplo, para transportar 20.000 kg/h de vapor recalentado a una presión de 15 bar y 300 °C, con una caída de presión de 1 bar/100 m, sería necesaria una tubería de 150 mm de diámetro nominal (DN150). Admitiendo esta misma pérdida de carga, el diámetro nominal de la tubería necesaria para transportar 3.000 kg/h de vapor saturado a 10 bar de presión y 20 m/s de velocidad disminuiría desde 100 mm (según el método de la velocidad del vapor) hasta 80 mm.

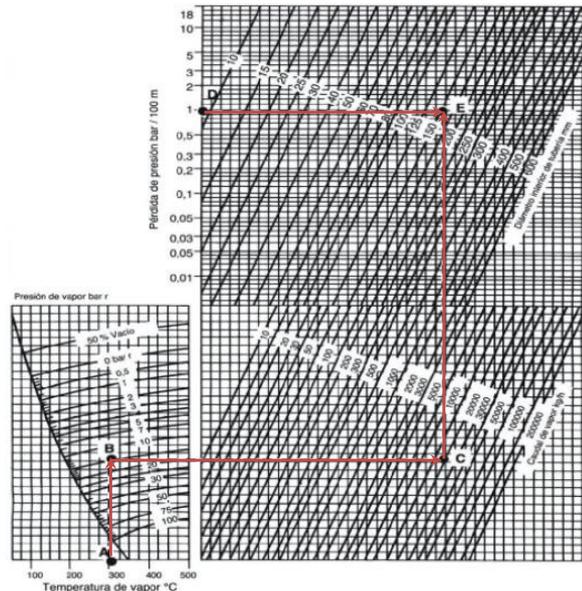


Imagen 2. Gráfico para dimensionar tuberías de distribución de vapor saturado y vapor recalentado según la caída de presión [1] [2].

Para calcular la pérdida de carga debida a los accesorios lo más habitual es realizar una aproximación mediante tablas que asignan a cada tipo de componente una longitud equivalente de tubería (L_e) del mismo diámetro que el accesorio que introduciría la misma pérdida de carga que el propio accesorio (tabla 2).

Tabla 2. Longitudes equivalentes de diversos accesorios de tubería expresadas como número de diámetros de tubería [1].

Accesorio	L_e/\varnothing
codo 45°	15
codo 90° (radio estándar)	32
codo 90° (radio mediano)	26
codo 90° (radio grande)	20
codo 90° (en escuadra)	60
codo 180°	75
codo 180° (radio mediano)	50
te (con entrada por la parte recta)	60
te (con entrada por la derivación)	90
válvula de compuerta (abierta)	7
válvula de asiento (abierto)	300
válvula angular (abierta)	170
válvula de esfera	3

Finalmente, comentar que existen aplicaciones informáticas que facilitan estos cálculos [6]. Simplemente hay que escoger el método de cálculo e introducir los datos de los que se dispone en las celdas correspondientes y en las unidades apropiadas. La pantalla resultante sería similar a la mostrada en la imagen 3.



TLV. Compañía Especialista en Vapor

Productos | Servicio | Entrenamiento & Recursos | Compañía | Contactenos

Calculadora para Ingeniería

Calculadora: Dimensionamiento de Tubería para Vapor por Caída de Presión

Introducir Datos

Unidades (Sibar)

Grado de Tubería: DIN 2448

Presión de Vapor: 13.9858 (barG)

Temperatura del Vapor [?]: 300 (°C)

Rango de Flujo del Vapor: 25000 (kg/h)

Máxima Pérdida de Presión Permisible: 1 (bar)

Longitud de la Tubería [?]: 100 (m)

Válvulas de Flujo Cerradas (ej. Globo) (Cant) [?]: 0

Válvulas de Flujo Instaladas (ej. Comp) (Cant) [?]: 0

Válvulas Check (Cant) [?]: 0

Codos (Cant): 0

Rugosidad Interna de la Tubería [?]: 0.05 (mm)

Calcular Limpiar

Resultados

Tamaño de Tubería: DN150

Diámetro Interno Tubería: 159.3 (mm)

Velocidad del Vapor: 47.3027 (m/s)

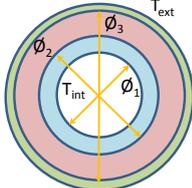
Caída de Presión: 0.641447 (bar)

Longitud Equivalente a una Tubería Horizontal: 100 (m)

Imagen 3. Ejemplo de calculadora para dimensionar tuberías de vapor.

3.1.2 Aislamiento

Para que un sistema de distribución de vapor sea lo más eficiente posible deberán reducirse al mínimo las pérdidas de calor. De ahí la necesidad de aislar las tuberías y todos los elementos calientes del sistema. Las instalaciones típicas utilizan fibra de vidrio chapada en aluminio, lana mineral chapada en aluminio y silicato de calcio. Como se puede comprobar en la ecuación 4, el cálculo del espesor de aislamiento más rentable dependerá, entre otros factores, de las pérdidas de calor por unidad de longitud de tubería (q/L , en W/m).

$$\frac{q}{L} = \frac{\pi \cdot (T_{int} - T_{ext})}{\frac{\ln(\phi_2/\phi_1)}{2 \cdot k_{tub}} + \frac{\ln(\phi_3/\phi_2)}{2 \cdot k_{ais}} + \frac{1}{\phi_3 \cdot h_{ext}}}$$


Ecuación 4. Cálculo del espesor de aislante de una tubería.

donde: T_{int} es la temperatura de la cara interna de la tubería en $^{\circ}C$; T_{ext} es la temperatura del aire ambiente en $^{\circ}C$; ϕ_1 es el diámetro interno de la tubería en m; ϕ_2 es el diámetro externo de la tubería, equivalente al diámetro interno del aislante, en m; ϕ_3 es el diámetro externo del aislante en m; k_{tub} es la conductividad térmica de la tubería en $W/m^{\circ}C$; k_{ais} es la conductividad térmica del aislante en $W/m^{\circ}C$; y h_{ext} es el coeficiente global de transferencia térmica exterior en $W/m^2^{\circ}C$ que, como se muestra en la ecuación 5, resulta de sumar el coeficiente de transmisión de calor por convección (h_{cv} , en $W/m^2^{\circ}C$) y el



coeficiente de transmisión de calor por radiación de la chapa que rodea la capa de aislante (h_r , en $W/m^2\text{°C}$).

$$h_{\text{ext}} = h_{\text{cv}} + h_r = 1,25 \cdot \sqrt[4]{\frac{(T_{\text{e_ais}} - T_{\text{ext}})^4}{\phi_3}} + \frac{T_{\text{e_ais}}^4 - T_{\text{ext}}^4}{T_{\text{e_ais}} - T_{\text{ext}}} \cdot C_r$$

Ecuación 5. Cálculo del coeficiente global de transferencia térmica exterior.

donde: $T_{\text{e_ais}}$ es la temperatura de la superficie externa de aislante en °C ; y C_r es el coeficiente de radiación de la superficie exterior ($W/m^2\text{°C}^4$).

Calcular las pérdidas de calor de una tubería puede ser muy complejo y no es el objetivo de este objeto de aprendizaje. Una solución sencilla consiste en utilizar la tabla 3, que proporciona la emisión de calor en tuberías horizontales de distintos tamaños que transportan vapor a diferentes temperaturas y están instaladas en lugares donde la temperatura ambiente oscila entre 10 y 21 °C . En caso de que la tubería estuviera aislada, las pérdidas de calor mostradas en la tabla 3 para tuberías no aisladas se reducirían en un 15%.

Tabla 3. Emisiones de calor en tuberías (q/L en W/m) [2].

Diferencia de temperatura entre vapor y aire °C	Tamaño do tubería									
	15 mm	20 mm	25 mm	32 mm	40 mm	50 mm	65 mm	80 mm	100 mm	150 mm
	W/m									
56	54	65	79	103	108	132	155	188	233	324
67	68	82	100	122	136	168	198	236	296	410
78	83	100	122	149	166	203	241	298	360	500
89	99	120	146	179	205	246	289	346	434	601
100	116	140	169	208	234	285	337	400	501	696
111	134	164	198	241	271	334	392	469	598	816
125	159	191	233	285	285	394	464	555	698	969
139	184	224	272	333	333	458	540	622	815	1 133
153	210	255	312	382	382	528	623	747	939	1 305
167	241	292	357	437	437	602	713	838	1 093	1 492
180	274	329	408	494	494	676	808	959	1 190	1 660
194	309	372	461	566	566	758	909	1 080	1 303	1 852

Nota: Emisión de calor en tuberías horizontales sin protección con temperatura ambiente entre 10 °C y 21 °C y aire en calma.

Por otra parte, tal y como se ha comentado antes para el dimensionamiento de tuberías de distribución de vapor, existe también abundancia de software que ayuda al ingeniero a calcular el espesor de aislante más rentable. Por ejemplo, utilizando el programa de cálculo de aislamientos AISLAM [7], de libre uso y propiedad del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) se obtiene que el espesor de la capa de fibra de vidrio (tipo II) que recubre la tubería de acero (DN100) que transporta vapor saturado a 10 bar y 179,9 °C ha de ser de 68 mm para que, asumiendo que la tubería discurre horizontalmente por el interior de una nave industrial con una temperatura ambiente de 15 °C , la temperatura en la pared exterior del aislante sea 30 °C . Para estas mismas condiciones, la emisión de calor en la tubería aislada valdría 160,49 W/m .

PCTaislam - Cálculo de la Transferencia Térmica de una Tubería Aislada

PROPIEDADES DE TUBO Y AISLANTE		
conductividad térmica del tubo	58 W/m·°C	Fundición y acero
conductividad térmica del aislante	0,037 W/m·°C	Fibra de vidrio, Tipo II
coeficiente de radiación superficie ext Cr	2,80E-09 W/m²·°C⁴	aluminio brillante
SITUACION DE LA TUBERIA		
posición tubería		horizontal
situación tubería		interior
velocidad del aire	0,00 m/s	
GEOMETRIA DE LA TUBERIA Y AISLANTE		
diámetro exterior tubo	114,3 mm	
espesor aislante	68 mm	
diámetro interior aislante	114,3 mm	
diámetro exterior aislante	250,3 mm	
TEMPERATURAS DE TRABAJO		
temperatura interior tubo	179,9 °C	
temperatura exterior aislante estimada	30,0 °C	
temperatura ambiente	15,0 °C	
TRANSFERENCIA TÉRMICA		
índice de tipo de flujo	0,235 m³/°C	
tipo de flujo	LAMINAR	
componente convectiva	hev	3,48 W/m²·°C
componente radiante	hr	0,29 W/m²·°C
componente exterior total	he	3,77 W/m²·°C
densidad lineal de flujo de calor	qi	44,5 W/m
temperatura pared exterior calculada	Te	30,0 °C

MENU

Imagen 4. Aplicación PCTaislam para el cálculo de aislamientos en tuberías.

3.1.3 Accesorios que garantizan la ausencia de agua

El agua presente en una red de distribución de vapor tiene dos orígenes:

- agua de alimentación de la caldera arrastrada por el vapor.
- agua condensada, que aparece cuando el vapor se enfría por debajo del punto de ebullición, bien por contacto con las paredes de las tuberías, cuando se arranca la instalación, o por cesión de energía al medio a calefactar, en el punto de utilización.

El agua en el circuito de vapor produce ruido, abrasión, golpes de ariete, etc. Para evitar su presencia se emplean:

- **separadores de gotas:** accesorios de geometría laberíntica que provocan la deposición de las gotas que arrastra el vapor. Se colocan en la salida de caldera y a la entrada de las estaciones reductoras de presión.
- **purgadores:** accesorios que permiten evacuar de forma automática los condensados formados en el circuito de vapor. Se sitúan en los puntos más bajos del circuito y se clasifican en [8]:
 - purgadores termostáticos: operan por diferencia de temperatura entre el vapor y el condensado, para lo cual el condensado debe enfriarse por debajo de la temperatura de vapor antes de ser eliminado. Pueden ser de *presión equilibrada* (si el cierre de la válvula se produce por expansión de un líquido en una pequeña cápsula) o bimetálicos (si el cierre de la válvula se produce por la dilatación en un elemento bimetálico). No aptos para vapor sobrecalentado.
 - purgadores mecánicos: operan por diferencia de densidad entre el vapor y el condensado. Pueden ser de *boya cerrada* (cuando un flotador unido a una palanca abre o cierra el orificio de salida) o de *cupeta invertida* (si la fuerza que ejerce el vapor en el fondo de una cubeta permite el cierre de la válvula de salida). Aunque requieren poco mantenimiento, no siempre proporcionan un buen asiento.
 - purgadores termodinámicos: operan por diferencia de velocidad entre el vapor (alta velocidad) y el condensado

(baja velocidad). Su funcionamiento se basa en la formación de revaporizado (mezcla de vapor y agua) al descargar el condensado caliente a presión. Son compatibles con vapor a alta presión y con vapor sobrecalentado.

3.1.4 Accesorios que garantizan la ausencia de aire

El aire aparece en las redes de distribución, sobre todo en las que trabajan de forma intermitente, como consecuencia de la contracción del fluido que acompaña a su enfriamiento. Dado su bajo calor específico y mala transmisión térmica, la presencia de aire mezclado con el vapor supone una pérdida notable de eficiencia de intercambio del vapor. Para su eliminación se usan purgadores o eliminadores de aire termostáticos instalados en un lugar donde llega la mezcla de vapor y aire, pero no el condensado [1] [2]. Además, conviene que no estén aislados para garantizar su correcto funcionamiento.

3.1.5 Filtros

Se colocan delante de cada purgador, aparato de medida, válvula reductora o válvula de control para eliminar las partículas que, arrastradas por el vapor a elevadas velocidades, ocasionan abrasiones y atascos en los equipos [1] [2]. Para evitar problemas de golpe de ariete, cuando forman parte de una línea de vapor, los filtros deben montarse con la cesta en posición horizontal.

3.1.6 Estación reductora de presión

Conjunto encargado de reducir la presión de vapor para ajustarse a los requerimientos de los equipos en el punto de utilización. Incluye una válvula reductora, antes de la cual se instala un separador de gotas, una válvula de aislamiento para cerrar el sistema y poder realizar tareas de mantenimiento, un filtro y un manómetro que indica la presión de alimentación. Para proteger el equipo y evitar cualquier exceso de presión, es conveniente montar aguas abajo un manómetro, una válvula de seguridad y una segunda válvula de aislamiento que regule la presión en condiciones sin carga [2].

3.2 Recomendaciones generales de diseño

Debido a los cambios que experimenta el fluido, el diseño de una red de vapor exige una serie de cuidados especiales en aras de evitar efectos indeseables durante su utilización [1] [2].

Por una parte, las líneas de vapor deben montarse con una inclinación 1/250 descendente en la dirección del flujo, con puntos de purga instalados a intervalos regulares (cada 30-50 m) y en los puntos bajos. Por otra parte, el modo correcto de ejecutar una derivación es de manera que la conexión tome el vapor por la parte alta de la tubería principal. De esta forma las derivaciones transportarán un vapor más seco. Para evitar la acumulación de condensados, las reducciones de diámetro deben ejecutarse con acoplamientos asimétricos (reducción excéntrica). Para absorber las dilataciones debidas al aumento de la temperatura y evitar la acumulación de condensado se emplean compensadores o liras montadas horizontalmente en el mismo plano que la tubería. Finalmente, se recomienda que la red de distribución de vapor discurra a cierta altura (≈ 4 m) sobre el suelo de la sala.



4 Cierre

En este objeto de aprendizaje hemos descrito los aspectos más relevantes de los principales elementos constitutivos de una red de distribución de vapor: hemos dimensionado tuberías y aislamientos, hemos mostrado los diferentes accesorios empleados para garantizar la ausencia de agua, aire y partículas en el vapor y hemos explicado la función de cada uno de los componentes que integran una estación reductora de presión. Finalmente, hemos recopilado algunas recomendaciones generales que exige el diseño de una red de vapor.

5 Bibliografía

- [1] Manual técnico de diseño y cálculo de redes de vapor: eficiencia energética en redes de vapor. Conserjería de Economía y Empleo de la Junta de Castilla y León. Disponible en: <https://es.slideshare.net/miguelangelgranadamejia/manual-redes-de-vapor-51952501>
- [2] Distribución de vapor: guía de referencia técnica. Cortesía de Spirax Sarco. Disponible en: https://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/tema2/distrib_vapor.pdf
- [3] Norma Española UNE-EN 10216-1:2014, de abril de 2014, por la que se establecen las condiciones técnicas de suministro de tubos de acero no aleado con características especificadas a temperatura ambiente.
- [4] Información técnica para tuberías de acero DIN 2448 (UNE-EN 10216). Disponible en: www.ibenavente.com/pdf/informacion%20tecnica.pdf
- [5] Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): tabla de presiones. Disponible en: http://www.academia.edu/7359273/Propiedades_del_agua_saturada_líquido-vapor_Tabla_de_presiones
- [6] Calculadora para el dimensionamiento de tuberías de vapor. Cortesía de TLV International, Inc. Disponible en: <https://www.tlv.com/global/LA/calculator/steam-pipe-sizing-by-velocity.html>
- [7] Software de ayuda para cálculo hidráulico y de aislamiento en redes de vapor. Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN). Disponible en: <https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100Detalle/1273563855326/1273563855326/1284165891989/Redaccion>
- [8] Selección de tipos de purgadores de vapor por aplicaciones y por condiciones de trabajo. Disponible en: <https://vaporparalaindustria.com/seleccion-tipos-de-purgadores-de-vapor-aplicaciones/>