



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Industrial
Universidad de Salamanca



TECNOLOGÍA ENERGÉTICA
ASIGNATURA DEL MÁSTER UNIVERSITARIO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA 2
Eficiencia de las instalaciones de fluidos térmicos y vapor

APUNTES Y MATERIALES PARA SEGUIR LA ASIGNATURA

CURSO 2021-2022

Norberto Redondo Melchor
Profesor Asociado
Ingeniero Industrial
Doctor por la Universidad de Salamanca

1 Fundamentos

- 1.1 Principios termodinámicos
- 1.2 Fluidos de trabajo: características y equipos
- 1.3 Medición de caudales
- 1.4 Estrategias de control

2 Optimización del uso del vapor en la industria (I)

- 2.1 Válvulas de control
- 2.2 Sistemas de distribución
- 2.3 Purgadores de condensados
- 2.4 Equipos accesorios

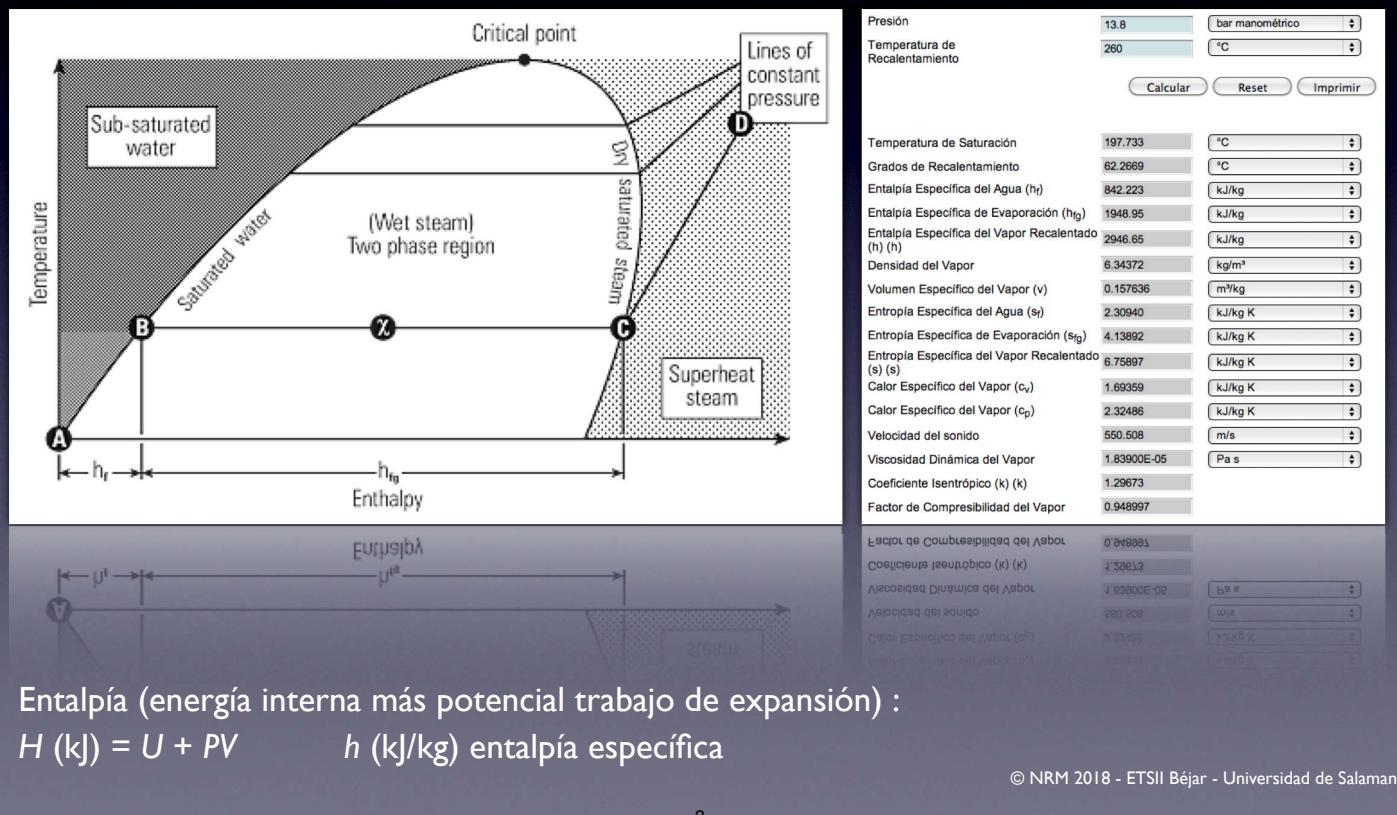
3 Optimización del uso del vapor en la industria (II)

- 3.1 Técnicas de tratamiento de condensados
- 3.2 Almacenamiento de calor en agua presurizada

4 Ejercicio práctico desarrollado

Fundamentos del uso del vapor

Datos termodinámicos: <http://www.spiraxsarco.com/resources/>



3

Fundamentos del uso del vapor

Principios termodinámicos

Zona de líquido:

$$h = h_f$$

Línea de saturación:

$$h = h_g$$

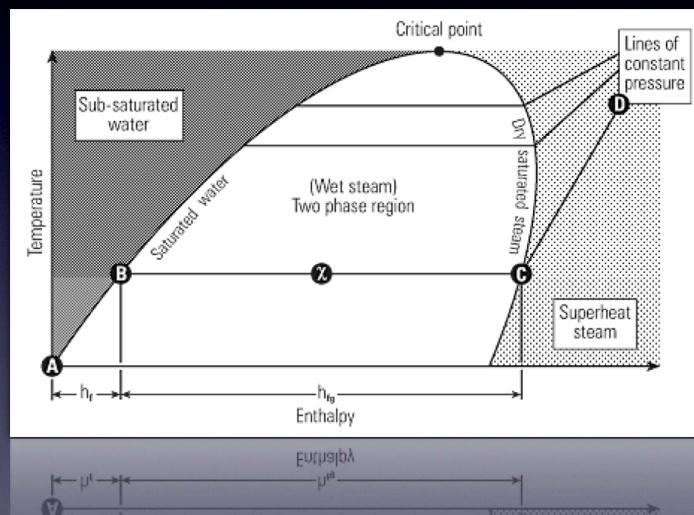
Zona de vapor:

$$h = h_g$$

Zona bifásica:

$$\text{Título de vapor } X = \frac{\text{masa de vapor (kg)}}{\text{masa de la mezcla (kg)}} (\%)$$

$$\text{Entalpía total } h = h_f + X h_{fg}$$



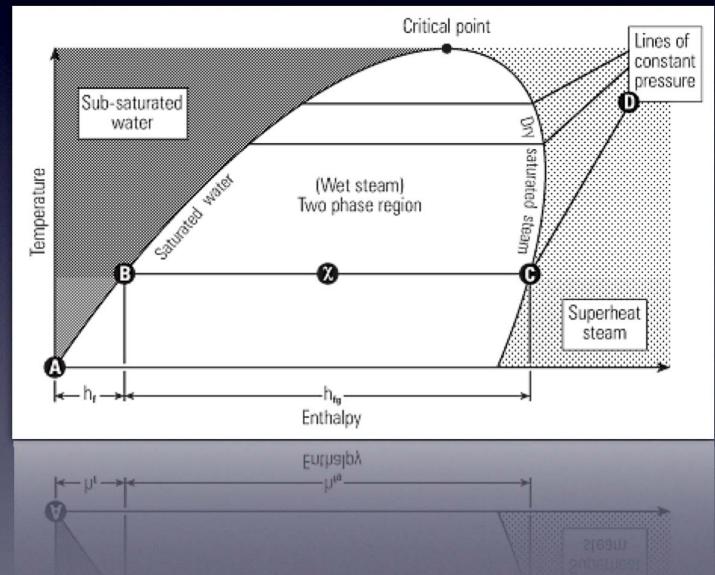
4

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Fundamentos del uso del vapor

Principios termodinámicos

Presión bar g	Temp. saturac. °C	Entalpía específica kJ/kg			Volumen vapor seco saturado m ³ /kg
		Agua hf	Bifase hfg	Vapor hg	
0	100	419	2 257	2 676	1,673
1	120	506	2 201	2 707	0,881
2	134	562	2 163	2 725	0,603
3	144	605	2 133	2 738	0,461
4	152	641	2 108	2 749	0,374
5	159	671	2 086	2 757	0,315
6	165	697	2 066	2 763	0,272



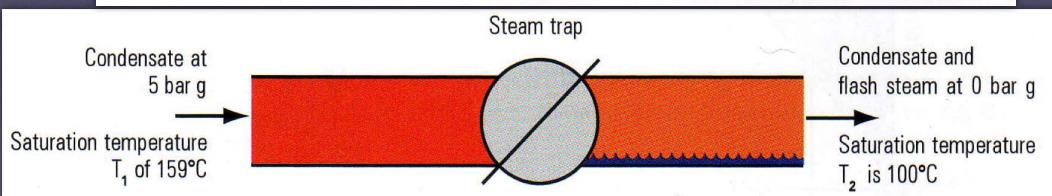
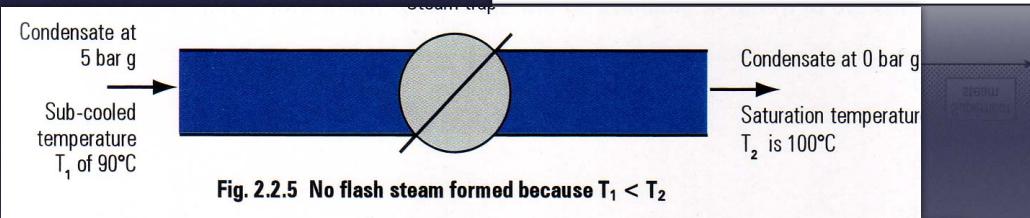
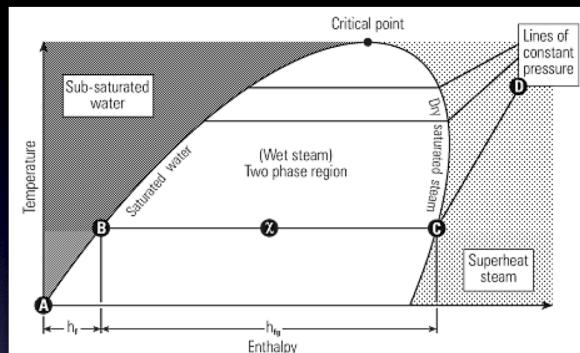
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

5

Fundamentos del uso del vapor

Características del vapor

- Principio de circulación: presiones decrecientes
- Pérdidas → aparición de condensados
- Revaporización de condensados (flash steam)



T < T_{saturated} because $T_1 < T_2$

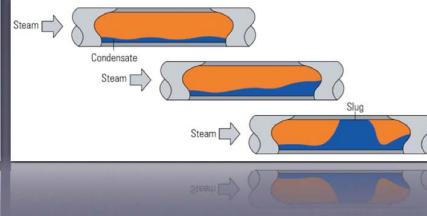
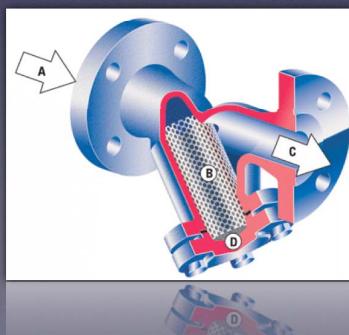
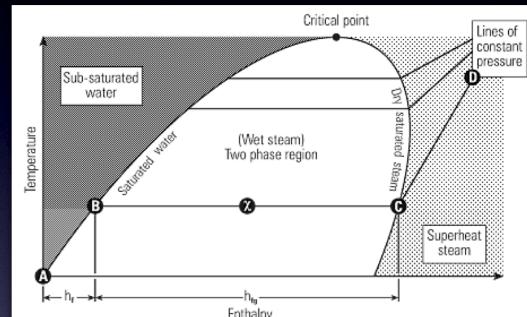
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

6

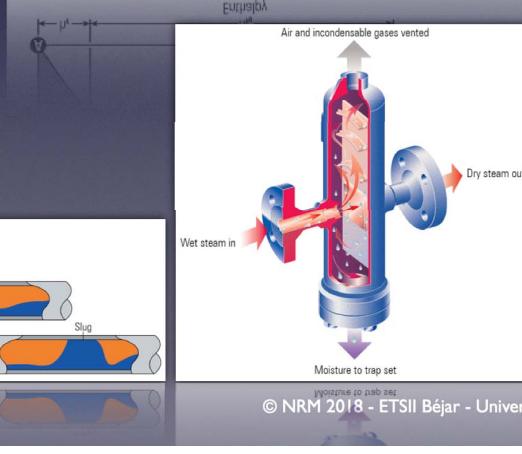
Fundamentos del uso del vapor

Características del vapor

- Calidad del vapor (título 100%)
- Sobrecalentamiento
- Purga de aire
- Purga de condensados
- Eliminación de partículas



7

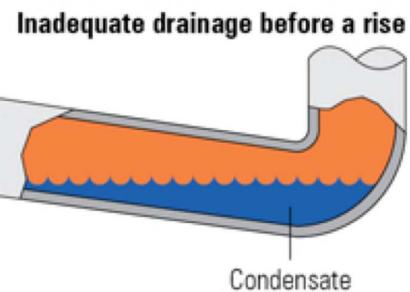
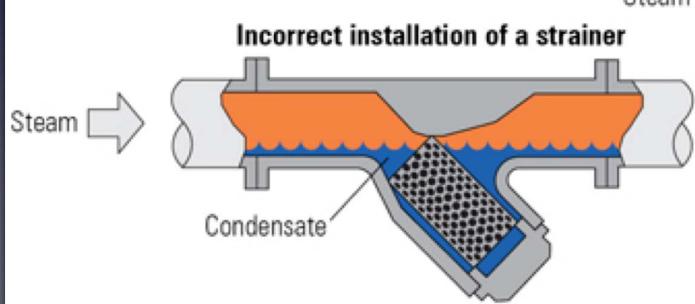
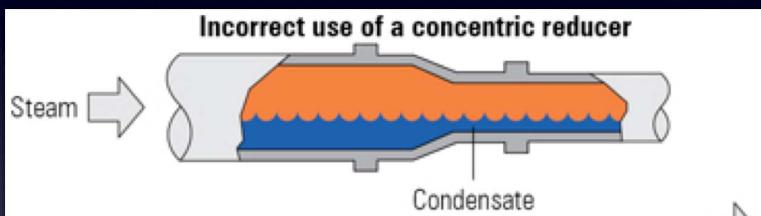
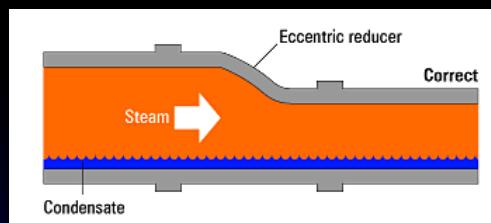


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Fundamentos del uso del vapor

Equipos

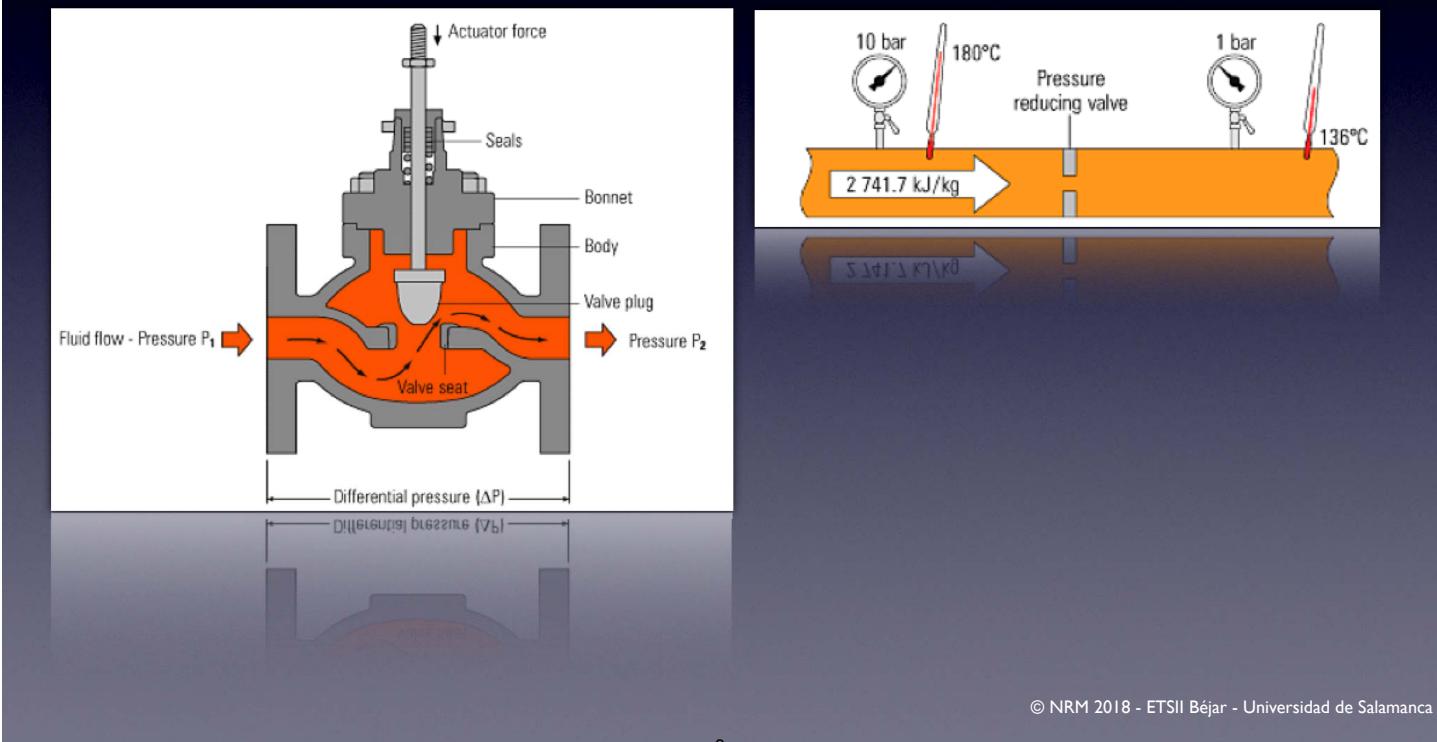
- Conducciones
 - Reducción de sección
 - Instalación de filtros
 - Montantes



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Fundamentos del uso del vapor

- Equipos
- Válvulas
 - Revaporización



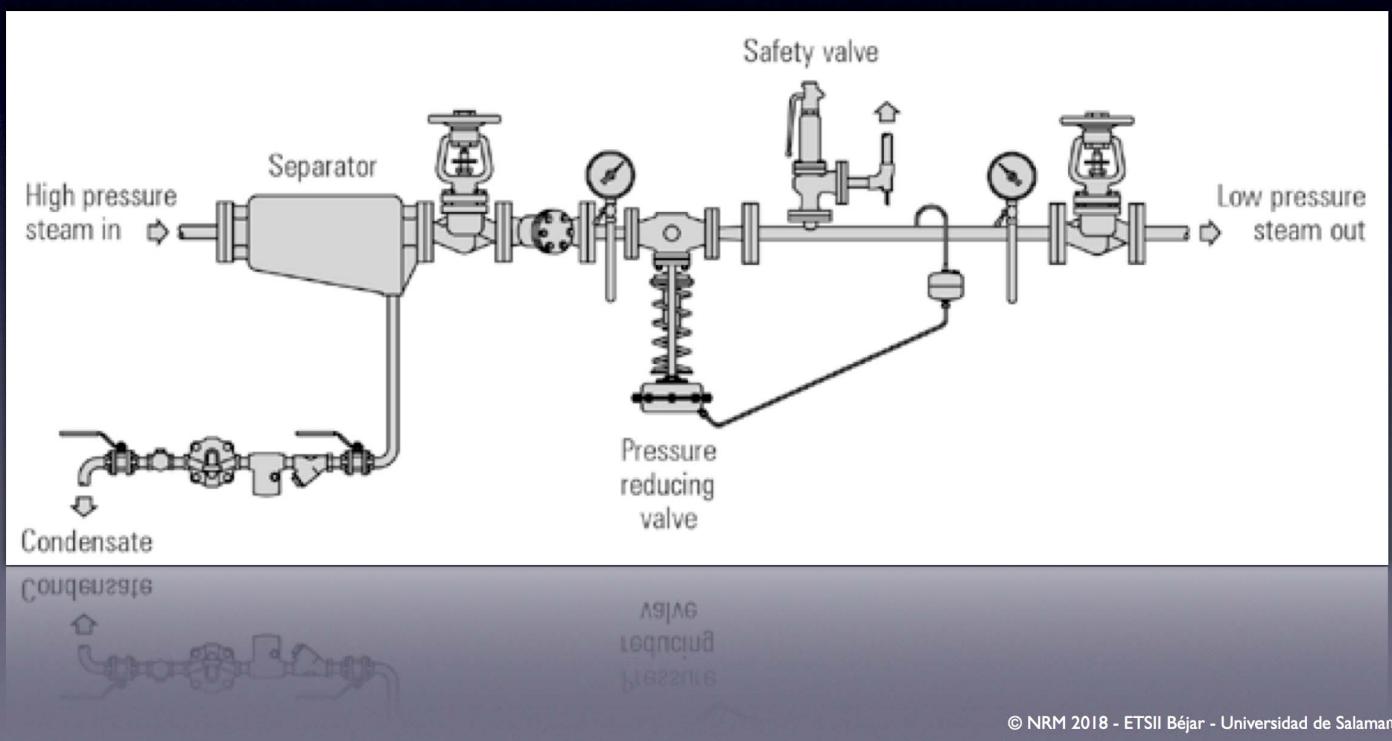
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

9

Fundamentos del uso del vapor

Equipos

Disposición normal de los componentes habituales de una instalación de vapor



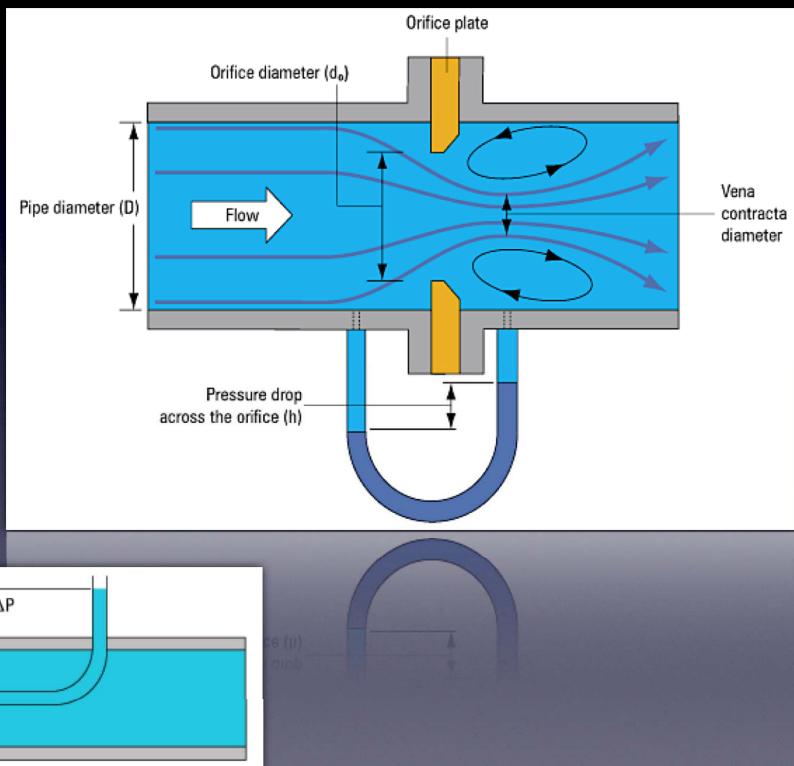
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

10

Fundamentos del uso del vapor

Medición de caudales

La pequeña diferencia de presiones causada por el orificio es proporcional a la energía cinética (velocidad) del fluido pasante



Tubo de Pitot

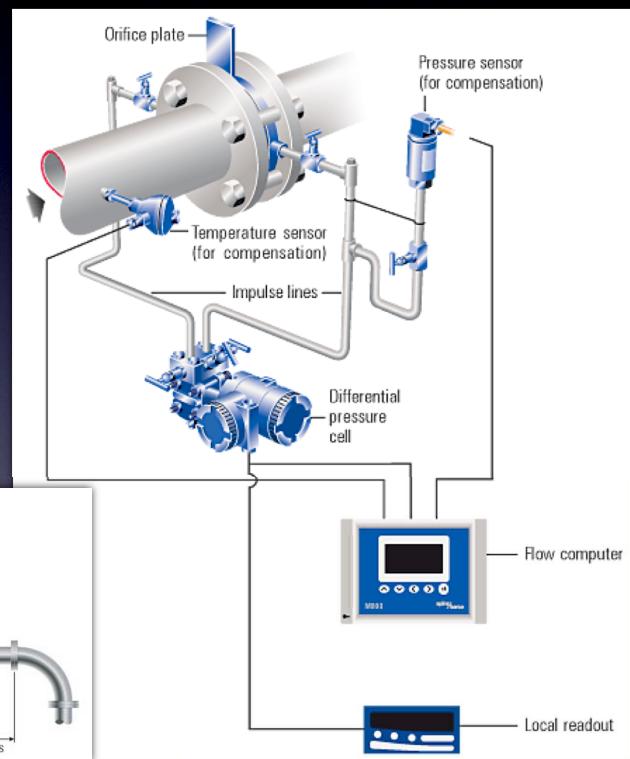
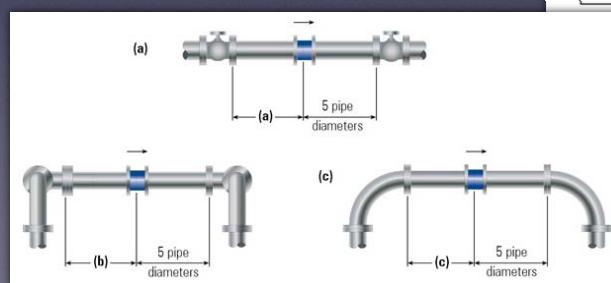
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

11

Fundamentos del uso del vapor

Medición de caudales

Sistema de medición basado en ISO 5167



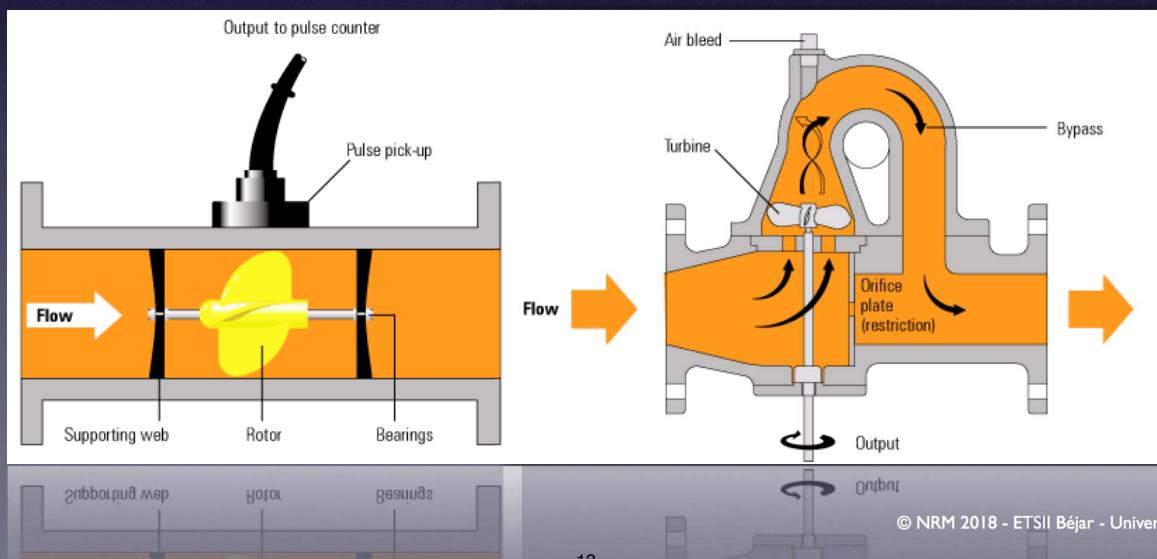
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

12

Fundamentos del uso del vapor

Medición de caudales

Medidores de turbina

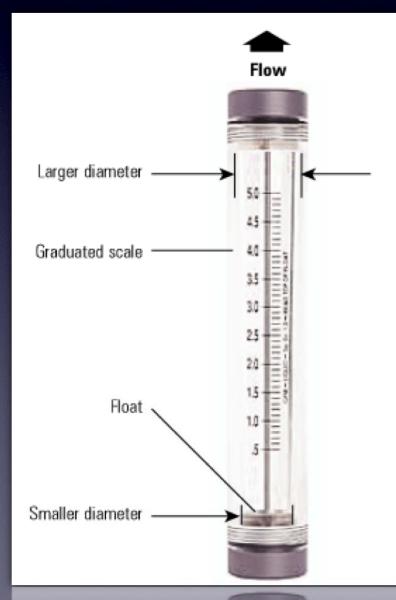
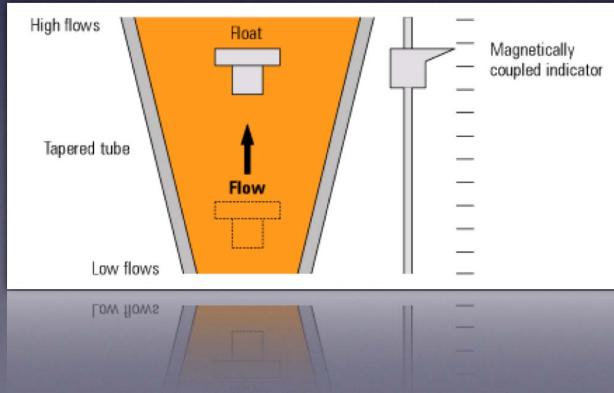


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Fundamentos del uso del vapor

Medición de caudales

Medidores de sección variable

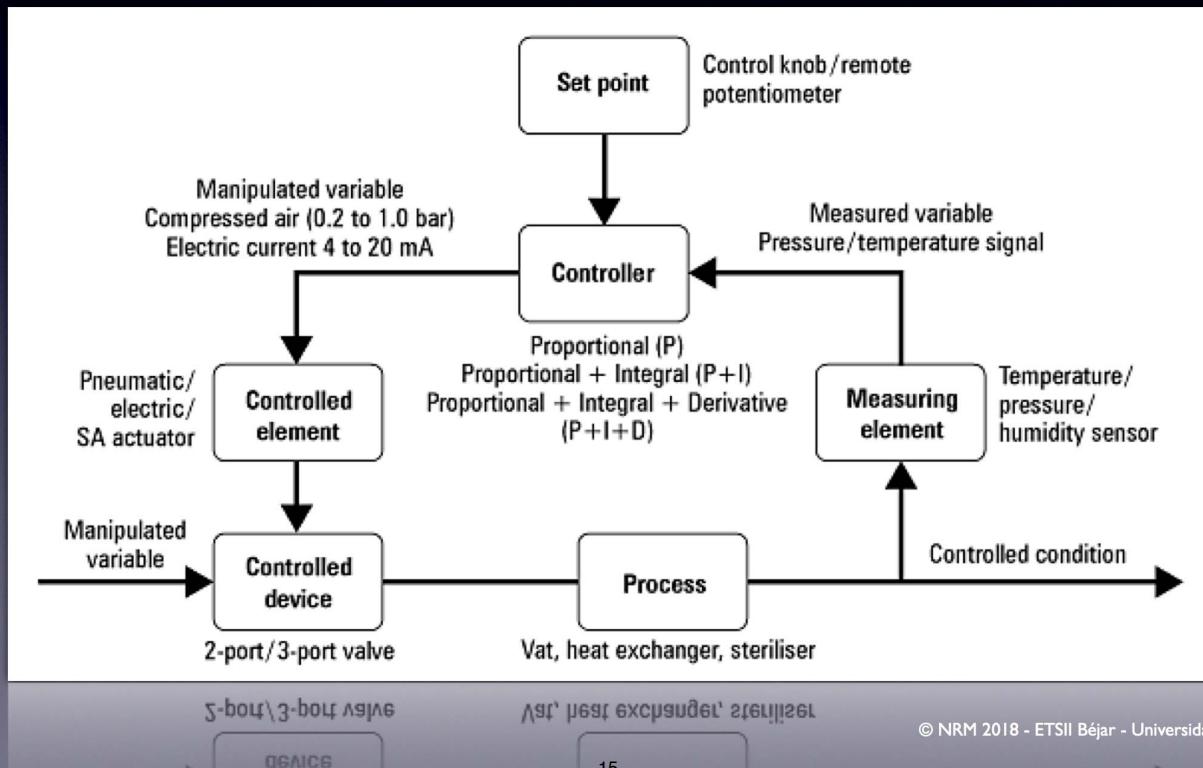


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Fundamentos del uso del vapor

Control

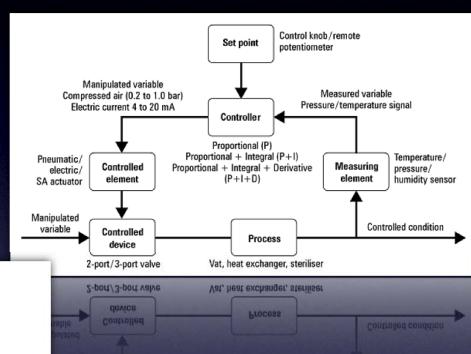
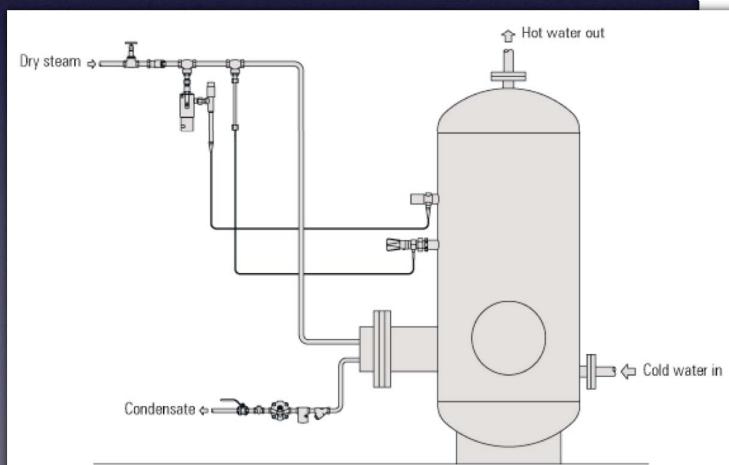
Esquema de principio de un sistema de control



Optimización del uso del fluido de trabajo (I)

Control

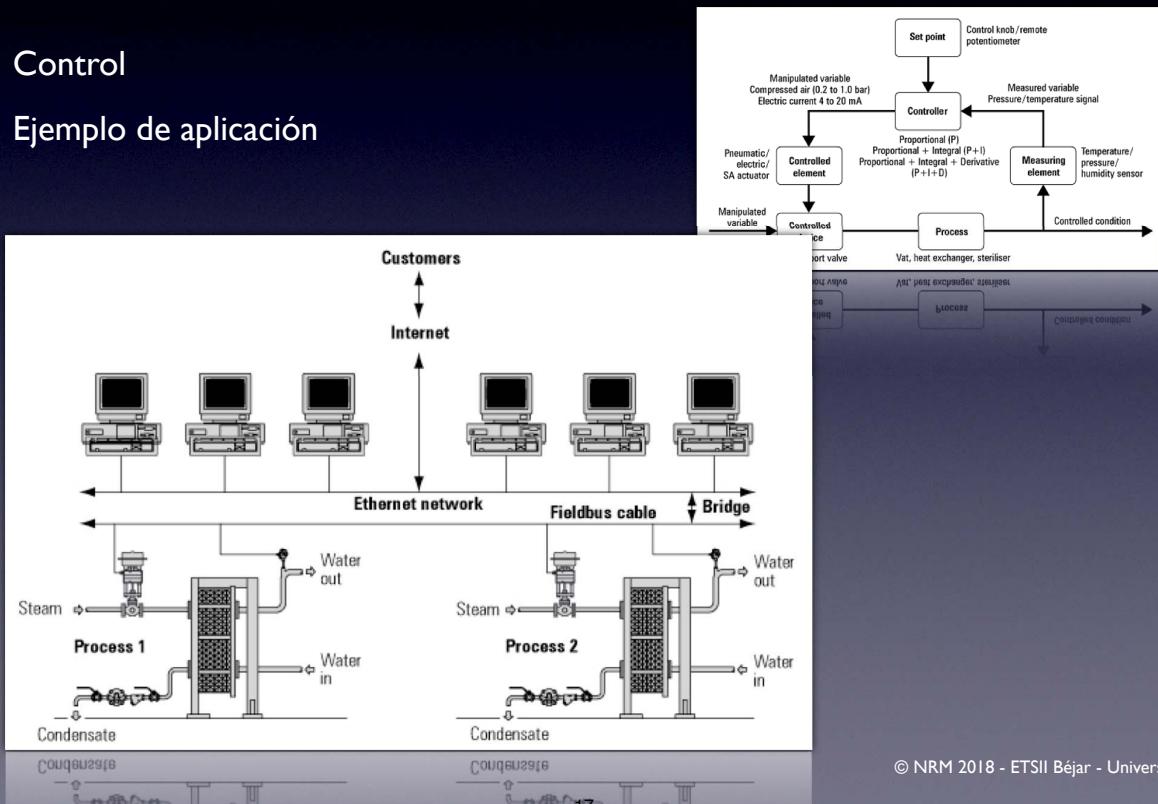
Ejemplo de aplicación



Optimización del uso del fluido de trabajo (I)

Control

Ejemplo de aplicación



I. Fundamentos

- Principios termodinámicos
- Fluidos de trabajo: características y equipos
- Medición de caudales
- Estrategias de control

2. Optimización del uso del vapor (I)

- Válvulas de control
- Sistemas de distribución
- Purgadores de condensados
- Equipos accesorios

3. Optimización del uso del vapor (II)

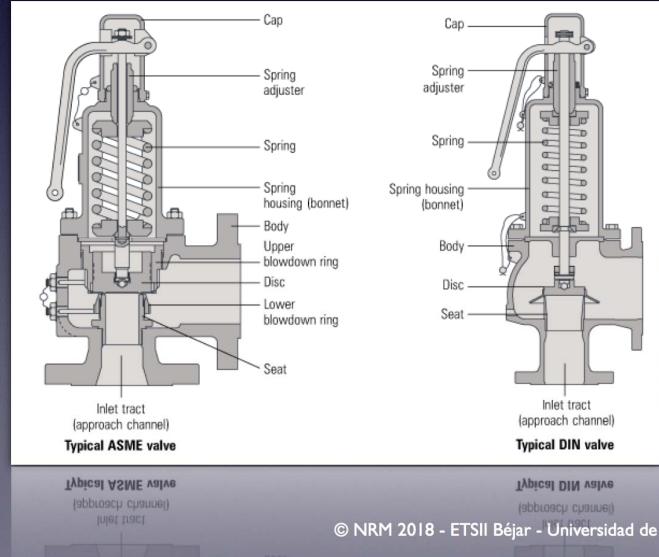
- Técnicas de tratamiento de condensados
- Almacenamiento de calor en agua presurizada

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de seguridad



Típicas válvulas de seguridad EN ISO 4126-1



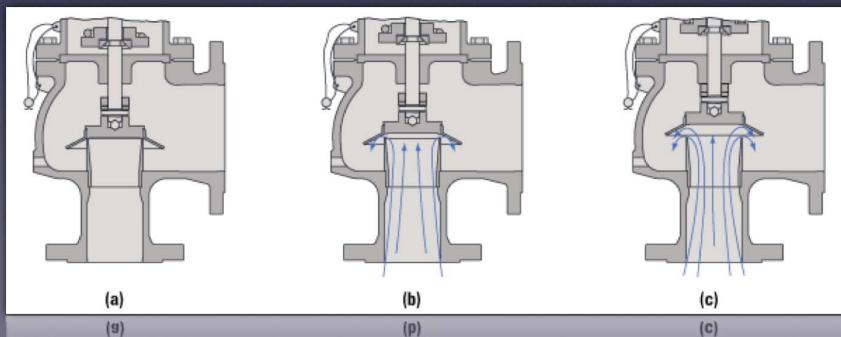
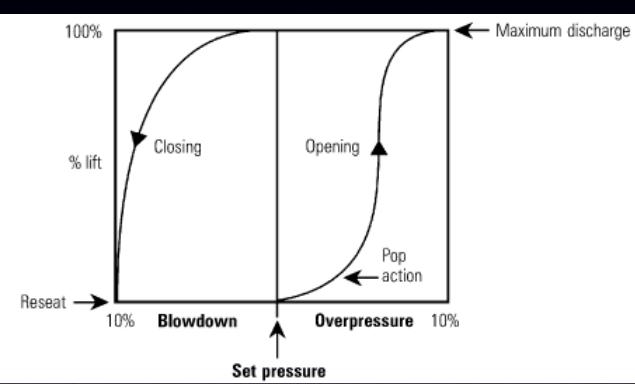
19

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de seguridad

Funcionamiento típico de una válvula de seguridad



20

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

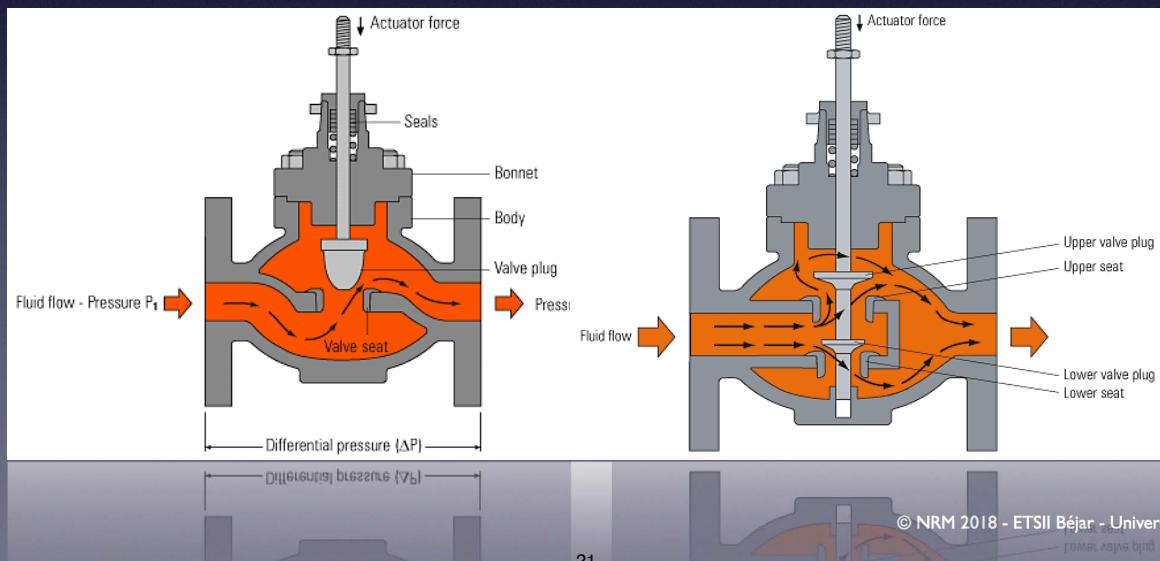
Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvulas de un asiento, tipo globo

Válvulas de doble asiento

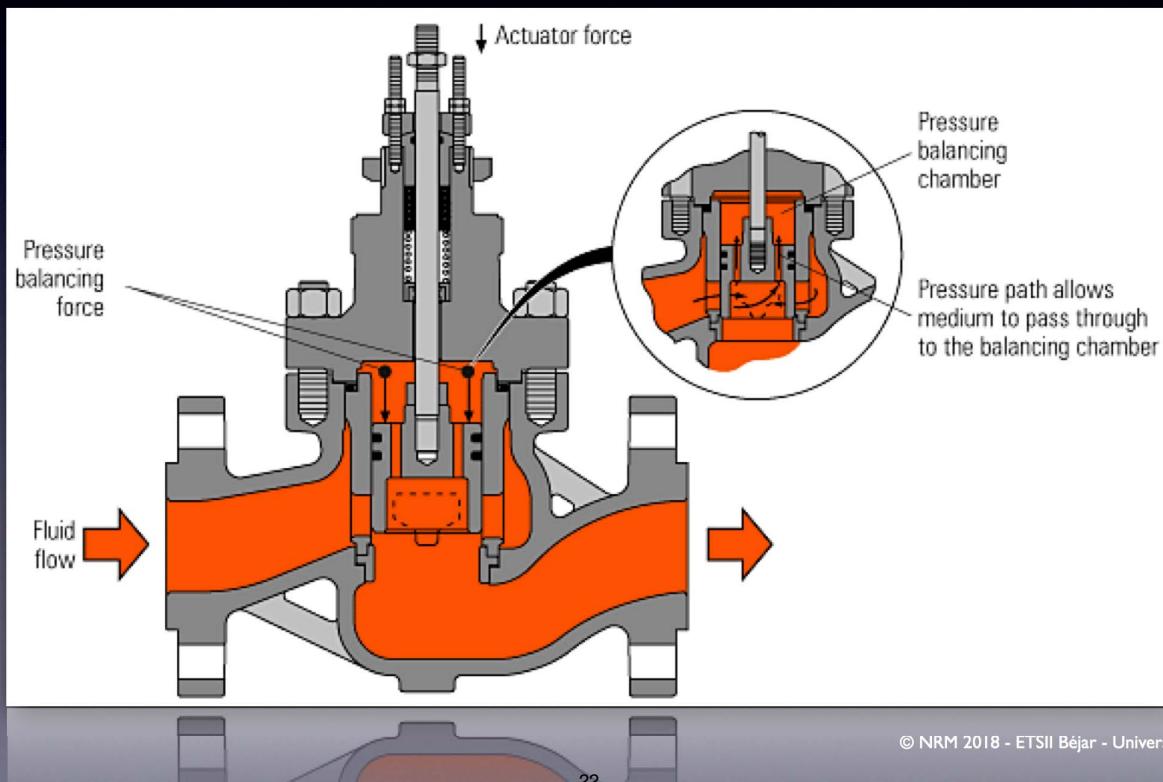
Requieren menor fuerza de cierre
Problemas de hermeticidad (0.1% fugas)



Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvula de un asiento de pistón, equilibrada, para facilitar el cierre

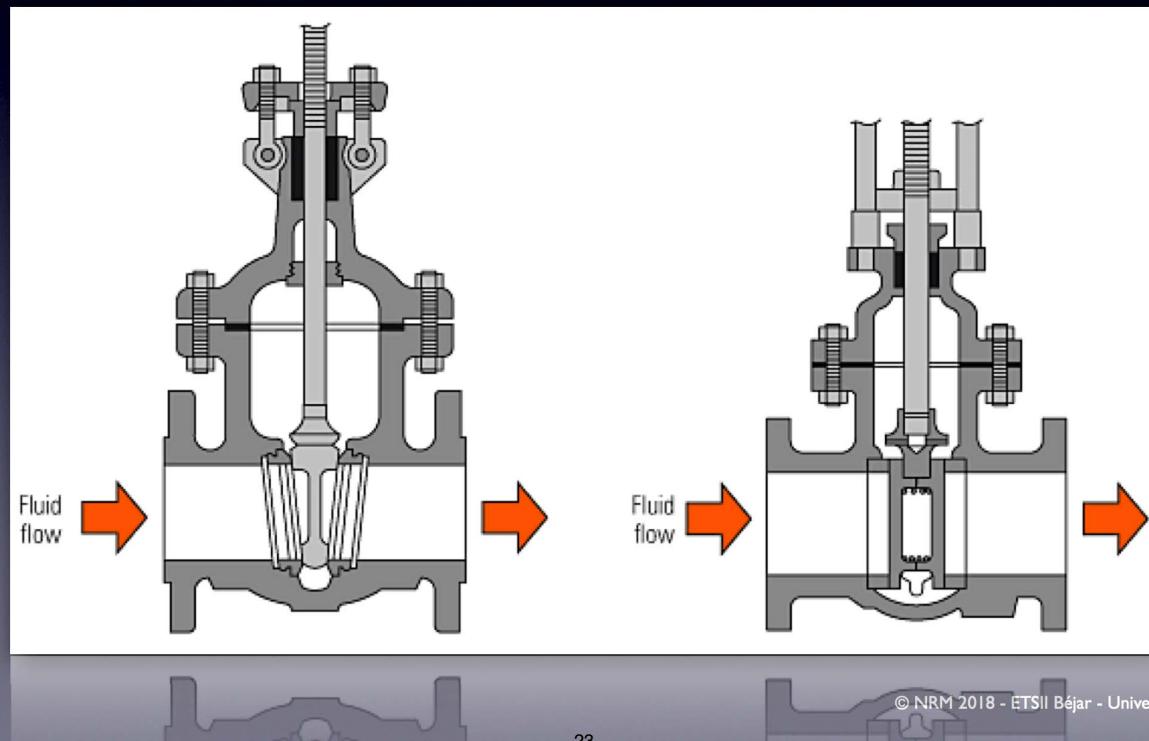


Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvula de compuerta en cuña

Válvula de compuerta paralela



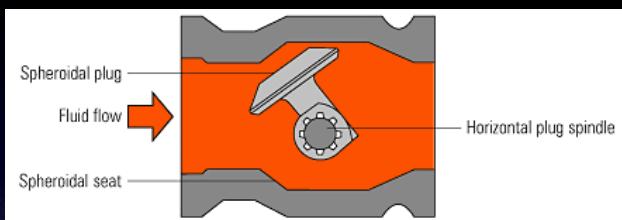
23

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

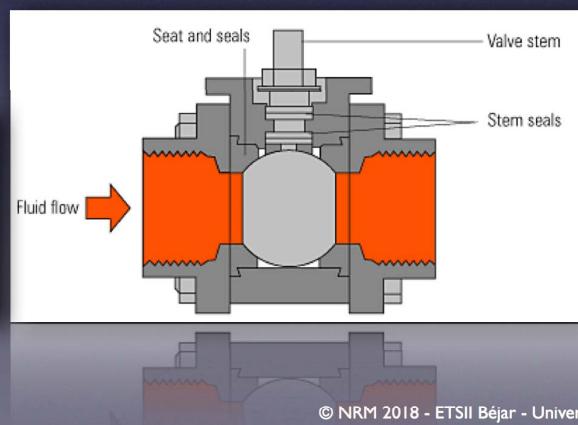
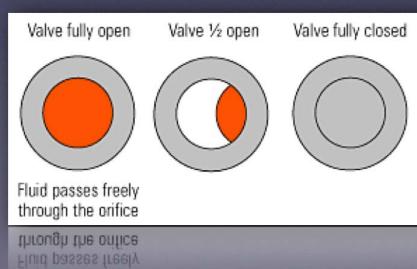
Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvula esferoide excéntrica



Válvula de bola



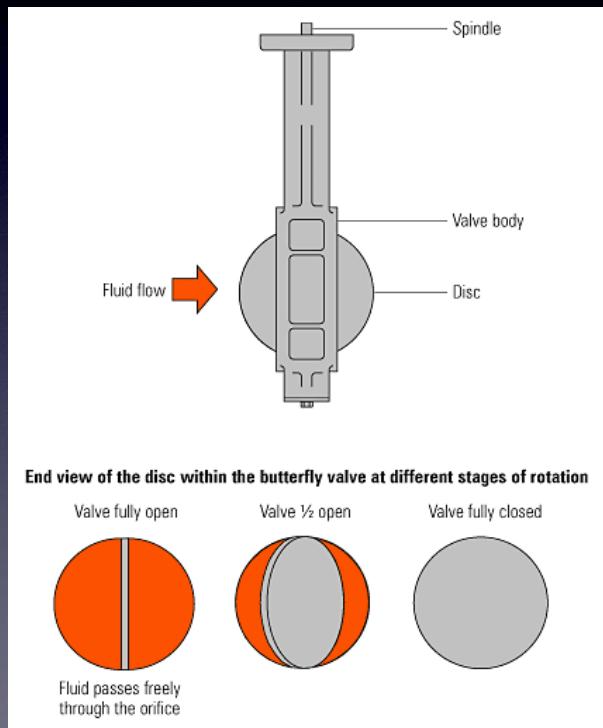
24

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvula de mariposa



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

25

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Control mediante:
- Regulación de caudal
- Regulación de presión

Combinados en el
coeficiente de flujo

Definición de diferentes coeficientes de flujo

K_v	Flujo de agua (m^3/h) entre $5^\circ C$ y $40^\circ C$ que crea una pérdida de carga de un bar
K_{vs}	Caudal (m^3/h) que en la válvula completamente abierta produce una pérdida de carga de un bar. Indica la capacidad máxima de la válvula
C_v	Flujo (galones/minuto) de agua entre $40^\circ F$ y $100^\circ F$ que crea una pérdida de carga de una libra/pulgada ² . Hay que precisar a qué galón se refiere (UK o US)
A_v	Flujo de agua (m^3/s) entre $5^\circ C$ y $40^\circ C$ que crea una pérdida de carga de un Pascal

Sizes	DN15	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100
K_{vs}	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0	63.0	100.0	160.0
	2.5	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0	63.0	100.0
	1.6	2.5	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0	63.0
	1.0	1.6	2.5	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0

J'0	J'8	S'2	4'0	8'3	10'0	J'8'0	© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca
-----	-----	-----	-----	-----	------	-------	---

26

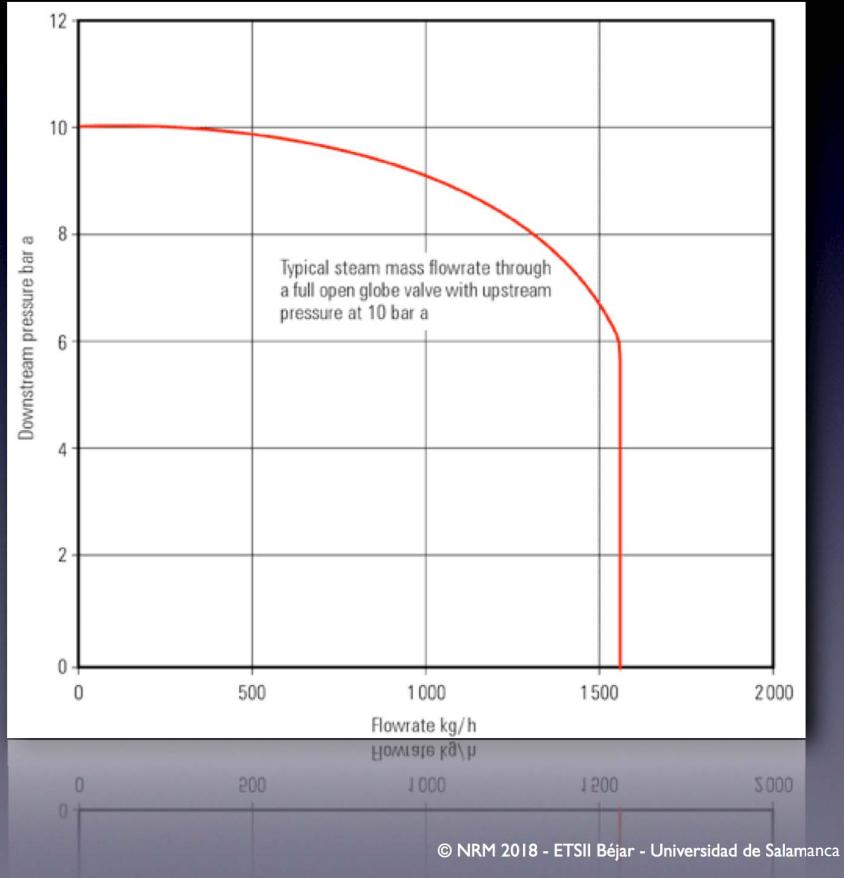
Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvulas para vapor saturado

Típica curva de presión y caudal para una válvula completamente abierta

La pérdida de carga crítica del estrangulamiento se alcanza alrededor del 58 - 60% de la presión absoluta aguas arriba de la válvula



27

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Pérdida de carga crítica en un estrangulamiento

Sección convergente:

La velocidad del vapor aumenta, luego cae la presión.

El volumen específico aumenta más despacio de lo que crece la velocidad.

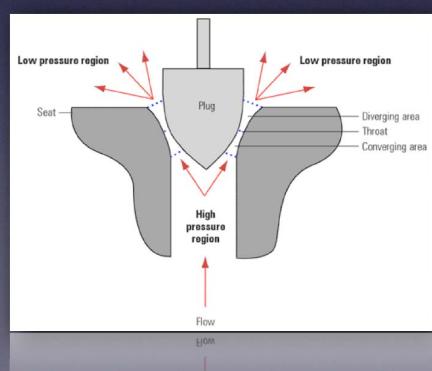
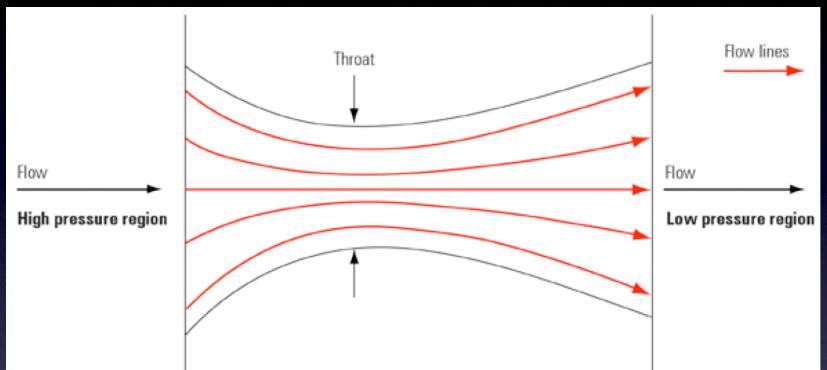
Cerca de la garganta (throat):

El volumen específico comienza a aumentar más deprisa que el aumento de velocidad.

El área de paso debería ser más grande, pero sigue decreciendo.

Garganta:

El área de paso es mínima. La velocidad no puede aumentar ya. La presión cae al mínimo. El valor en la garganta es la presión crítica (un 58% de la presión inicial).



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

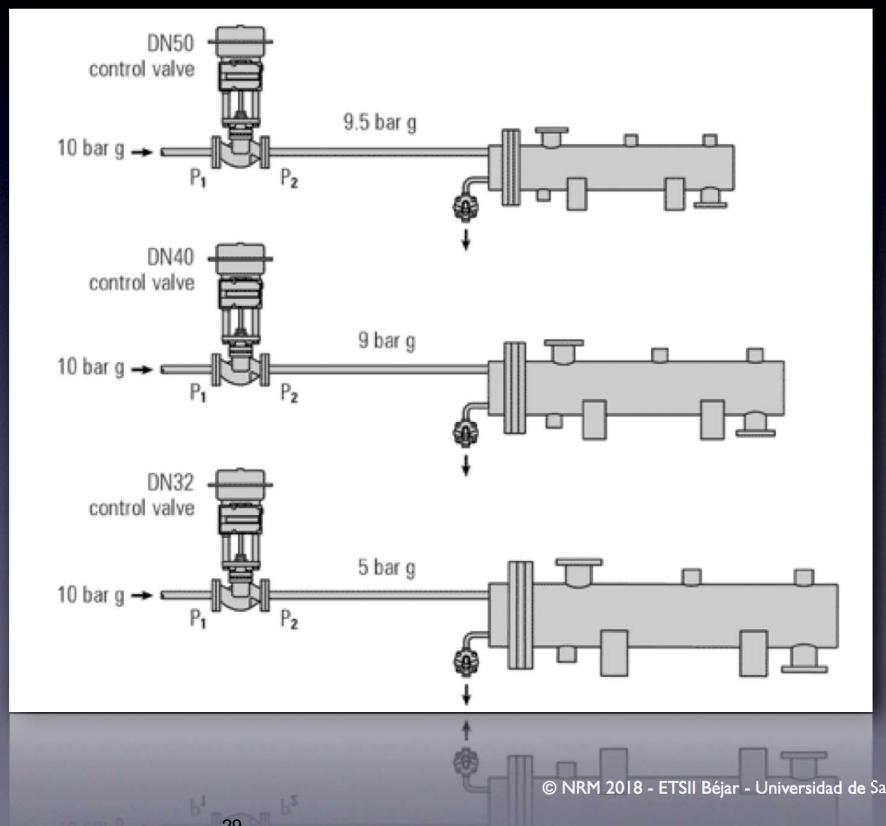
28

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvulas para vapor saturado

Efecto del calibre nominal de la válvula en la presión y temperatura del vapor para válvulas completamente abiertas



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Compromiso entre

- Pequeña pérdida de carga de la válvula completamente abierta
- Amplio rango de regulación para controlar finamente el caudal



Válvula demasiado grande:

(Ej: solo 10% de pérdida de carga completamente abierta)

Problemas:

- Pequeños movimientos producen grandes cambios de caudal
- Trabajará casi cerrada: ruido, erosión, envejecimiento prematuro
- Difícil gestión del proceso

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Ecuación rápida de selección:

1º Calcular la pérdida de carga relativa a través de la válvula completamente abierta

2º Utilizar la expresión adecuada:

$$\text{Pérdida de carga relativa} \quad c = \frac{P_1 - P_2}{P_1}$$

$$\text{Si } c < 0.42 \quad \dot{m}_s = 12 K_v P_1 \sqrt{1 - 5.67(0.42 - c)^2}$$

$$\text{Si } c \geq 0.42 \quad \dot{m}_s = 12 K_v P_1$$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

31

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Datos necesarios:

- P_1 : Presión disponible del vapor aguas arriba de la válvula

- P_2 : Presión necesaria del vapor para suministrar la potencia nominal aguas abajo de la válvula

Ejemplo:

- P_1 : 10 bar a, vapor saturado $X=96\%$
- P_2 : 5 bar a; $Q_n=500 \text{ kW}$

Cálculo del flujo másico de vapor:

- Condiciones a la entrada
- Condiciones a la salida

$$\text{Flujo vapor} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{Q_n (\text{kW})}{h_{fg(2)} (\text{kJ/kg})} \times 3600 \left(\frac{\text{s}}{\text{h}} \right)$$

con h_{fg} a P_2

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

32

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada

$$h_1 = 2\,697.15 \text{ kJ/kg}$$

Ejemplo:

- P_1 : 10 bar a, vapor saturado $X=96\%$
- P_2 : 5 bar a; $Q_n=500 \text{ kW}$

Entalpía disponible en el vapor húmedo

Entradas

Presión de Saturación y Título

Presión de Saturación: 10 bar absoluto

Título: 96 %

Calcular Reset Imprimir

Temperatura de Saturación: 179.916 °C

Entalpía Específica del Agua (h_f): 762.914 kJ/kg

Entalpía Específica de Evaporación del Vapor Húmedo: 1934.24 kJ/kg

Entalpía Específica del Vapor Húmedo (h): 2697.15 kJ/kg

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada

$$h_1 = 2\,697.15 \text{ kJ/kg}$$

Como a 5 bar a el vapor seco lleva 2 748.65 kJ/kg y no están disponibles, el vapor en (2) estará también húmedo:

$$X_2 = 2697.15 / 2748.65 = 0.98$$

Ejemplo:

- P_1 : 10 bar a, vapor saturado $X=96\%$
- P_2 : 5 bar a; $Q_n=500 \text{ kW}$

Entalpía del vapor saturado a 5 bar a

Entradas

Presión

Presión: 5 bar absoluto

Calcular Reset Imprimir

Temperatura de Saturación: 151.866 °C

Entalpía Específica del Agua (h_f): 640.418 kJ/kg

Entalpía Específica de Evaporación (h_g): 2108.23 kJ/kg

Entalpía Específica del Vapor (h_g): 2748.65 kJ/kg

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada

$$h_1 = 2\,697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida

$$\begin{aligned} h_2 &= 0.98 \times h_{fg(2)} = \\ &= 0.98 \times 2108.23 \text{ kJ/kg} = \\ &= 2\,066 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Ejemplo:

- P_1 : 10 bar a, vapor saturado $X=96\%$

- P_2 : 5 bar a; $Q_n=500 \text{ kW}$

Cálculo del flujo de vapor

$$\begin{aligned} \text{Flujo vapor} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) &= \frac{Q_n(\text{kW})}{h_{fg(2)}(\text{kJ/kg})} \times 3600 \left(\frac{\text{s}}{\text{h}} \right) = \\ &= \frac{500(\text{kW})}{2066 \text{ (kJ/kg)}} \times 3600 \left(\frac{\text{s}}{\text{h}} \right) = \\ &= 871 \text{ kg/h de vapor húmedo} \end{aligned}$$

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada

$$h_1 = 2\,697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida

$$h_2 = 2\,066 \text{ kJ/kg}$$

Ejemplo:

- P_1 : 10 bar a, vapor saturado $X=96\%$

- P_2 : 5 bar a; $Q_n=500 \text{ kW}$

Pérdida de carga válvula abierta

$$\begin{aligned} \text{Pérdida carga relativa } c &= \frac{P_1 - P_2}{P_1} = \\ &= \frac{10 - 5}{10} = 0.5 \end{aligned}$$

Como es mayor de 0.42 la selección de la válvula es

$$\dot{m}_s = 12 K_v P_1$$

$$K_v = \frac{\dot{m}_s}{12 P_1} = \frac{871(\text{kg/h})}{12 \times 10(\text{bar a})} = 7.26$$

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada (1)

$$h_1 = 2\ 697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida (2)

$$h_2 = 2\ 066 \text{ kJ/kg}$$

Coeficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

$$\text{DN}25 \text{ con } K_{vs} = 10 (>K_v)$$

Ejemplo:

- $P_1: 10 \text{ bar a, vapor saturado } X=96\%$

- $P_2: 5 \text{ bar a; } Q_n=500 \text{ kW}$

Se comprueba la velocidad del vapor:

Sección libre de la válvula = 4.9 cm^2

Volumen específico del vapor en (2) =
= $0.367\ 4 \text{ m}^3/\text{kg}$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

37

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada (1)

$$h_1 = 2\ 697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida (2)

$$h_2 = 2\ 066 \text{ kJ/kg}$$

Coeficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

$$\text{DN}25 \text{ con } K_{vs} = 10 (>K_v)$$

Se comprueba la velocidad del vapor:

Sección libre de la válvula = 4.9 cm^2

Volumen específico del vapor en (2) =
= $0.367\ 4 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$\begin{aligned} \text{Flujo volumétrico} &= \frac{\dot{m}_s}{v_{fg}} = \\ &= \frac{871(\text{kg/h})}{0.3647(\text{m}^3/\text{kg})} = \\ &= 320 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocidad de salida} &= \frac{\text{Flujo volumétrico}}{\text{Área de salida}} = \\ &= \frac{320(\text{m}^3/\text{h})}{4.9(\text{cm}^2)} 10^4 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2} \right) 3600 \left(\frac{\text{s}}{\text{h}} \right) = \\ &= 181 \text{ m/s} \end{aligned}$$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

38

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada (1)

$$h_1 = 2\ 697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida (2)

$$h_2 = 2\ 066 \text{ kJ/kg}$$

Coeficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

DN25 con $K_{vs} = 10 (> K_v)$

La velocidad del vapor a la salida es excesiva (recomendable hasta 40 m/s)

Problemas:

- Ruido inaceptable
- Erosión prematura a la salida

Solución:

Aumentar el calibre de la válvula

$$\begin{aligned}\text{Área salida requerida} &= \frac{\text{Flujo volumétrico}}{\text{Velocidad de salida}} = \\ &= \frac{320(\text{m}^3/\text{h})}{40(\text{m/s})} \frac{1}{3600}\left(\frac{\text{h}}{\text{s}}\right) = 0.002\ 22 \text{ m}^2 = 22.2 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

39

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada (1)

$$h_1 = 2\ 697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida (2)

$$h_2 = 2\ 066 \text{ kJ/kg}$$

Coeficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Para limitar la velocidad a 40 m/s se requiere una válvula DN65 (2½")

Control valve size	Outlet areas (m ²)
DN15	0.000 18
DN20	0.000 31
DN25	0.000 49
DN32	0.000 80
DN40	0.001 26
DN50	0.001 96
DN65	0.003 32
DN80	0.005 00
DN100	0.007 85
DN125	0.012 27
DN150	0.017 67
DN200	0.031 42

40

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada (1)

$$h_1 = 2\ 697.15 \text{ kJ/kg}$$

Condiciones de salida (2)

$$h_2 = 2\ 066 \text{ kJ/kg}$$

Coeficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Válvula seleccionada:

$$\text{DN}65 (2\frac{1}{2} \text{") con } K_{vs} = 10$$

Solución preferible:

Separar la fracción húmeda de (1)
Mantener la válvula inicial DN25

Razones:

- Mejor recorrido de regulación
- Pasará vapor seco: menor erosión
- El agua líquida introduce ineficiencias en la transferencia de calor
- El separador no es más caro que la diferencia de coste entre ambas válvulas

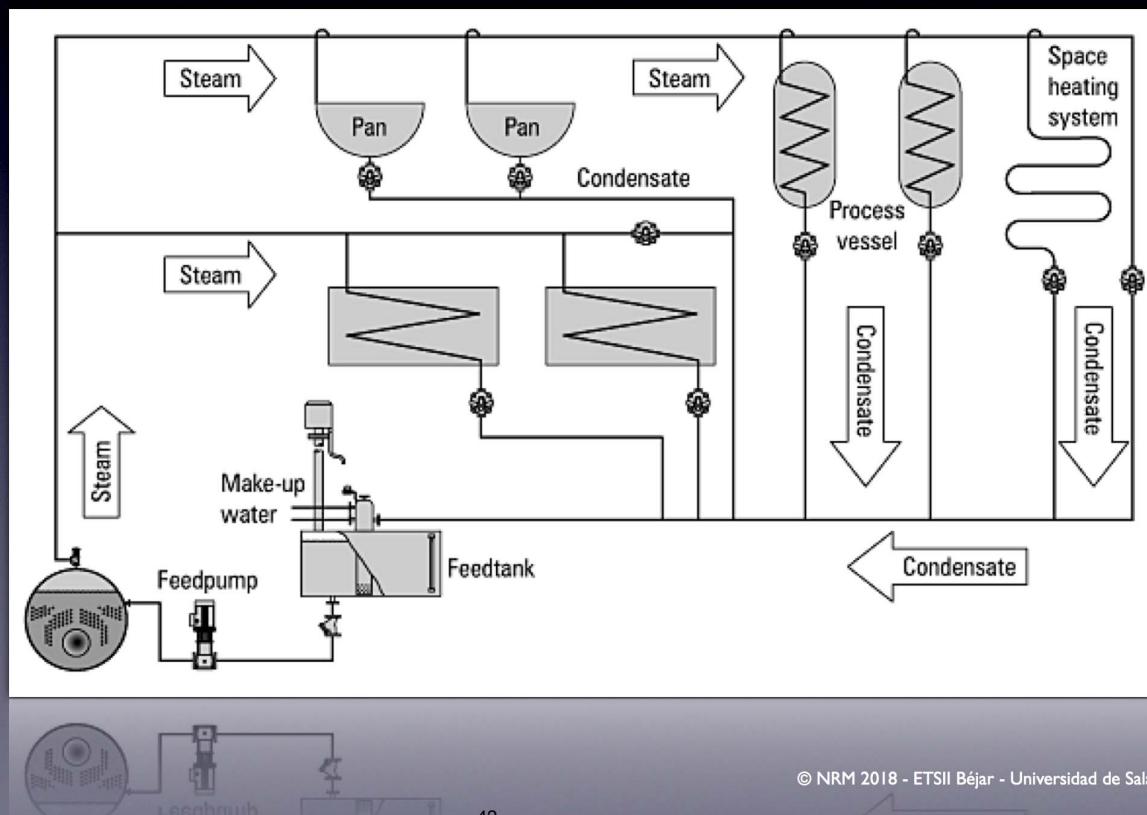
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

41

Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Sencillo sistema típico de distribución de vapor



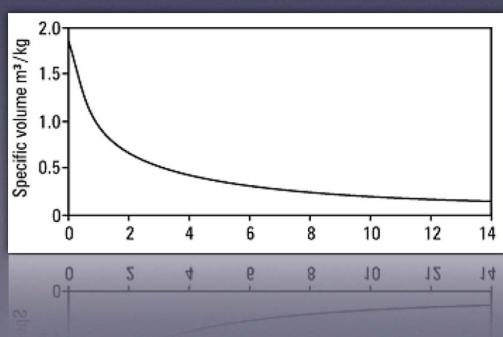
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

42

Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Volumen específico del vapor saturado en función de la presión



Presión de trabajo

Interesan presiones altas porque

- El volumen específico es menor: menores secciones
- Menores secciones: ahorro en conducciones, valvulería y equipos accesorios
- Menores secciones: ahorro en aislamiento perimetral
- Aumenta la capacidad de almacenamiento: se mejora la gestión

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

43

Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Reducción de la presión

Componentes:

Separador de vapor

Llaves separadoras primaria y secundaria

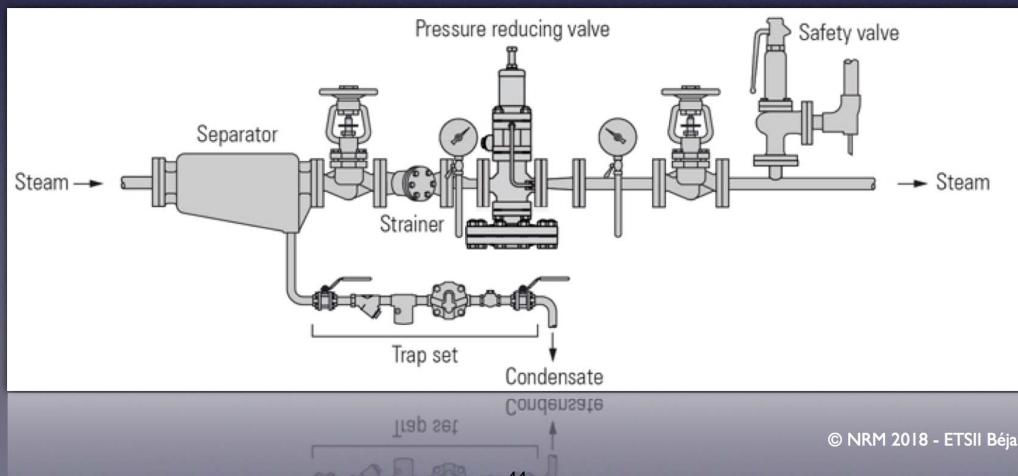
Filtro (*strainer*)

Válvula reductora de presión / válvula de control

Válvula de seguridad (*safety valve*)

Purgador de condensados

Juego de manómetros



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

44

Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Conducciones

Numerosos estándares.
El más extendido: API
(American Petroleum Institute)

- Los tubos mantienen el diámetro exterior (nominal) en mm
- Varía el espesor en función de la gama (schedule)
- El diámetro interior (bore) es el necesario en los cálculos

Nominal size pipe (mm)	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
Schedule 40	15.8	21.0	26.6	35.1	40.9	52.5	62.7	77.9	102.3	154.1
Schedule 80	13.8	18.9	24.3	32.5	38.1	49.2	59.0	73.7	97.2	146.4
Schedule 160	11.7	15.6	20.7	29.5	34.0	42.8	53.9	66.6	87.3	131.8
DIN 2448	17.3	22.3	28.5	37.2	43.1	60.3	70.3	82.5	107.1	159.3

- El material suele ser acero al carbono ANSI B16.9 A106
- Normalmente se suministra en barras de 6 m

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

45

Optimización del uso del vapor (I)

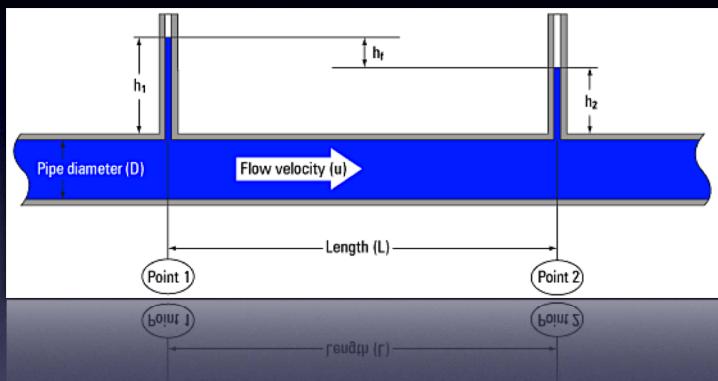
Sistemas de distribución

Conducciones

Se diseñan en función de:
- Presión (gama o schedule)
- Pérdida de carga (sección)



- Fórmula de Darcy-Weisbach (pérdida de carga)
- Fórmula de Colebrook (factor de fricción)



$$h_f = \frac{2 \lambda L u^2}{g D}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 3.48 - 1.74 \ln \left(\frac{2 k_s}{D} + \frac{9.3}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

46

Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Conducciones sobredimensionadas:

- Tuberías, válvulas, accesorios... mayores y más caros que lo necesario
- Mayores costes accesorios de instalación: soportes y aislamiento
- Mayores pérdidas de energía:
 - Más condensados: menor calidad del vapor
 - Mayor cantidad de purgadores
 - Peor rendimiento de la instalación

Conducciones infradimensionadas:

- Mayores pérdidas de carga: menor presión disponible para el proceso
- Riesgo de falta de caudal: insuficiente potencia suministrada
- Riesgo de mal funcionamiento por superior velocidad del vapor:
 - Incremento de ruidos
 - Erosión y envejecimiento prematuros
- Riesgo de rotura por golpe de ariete

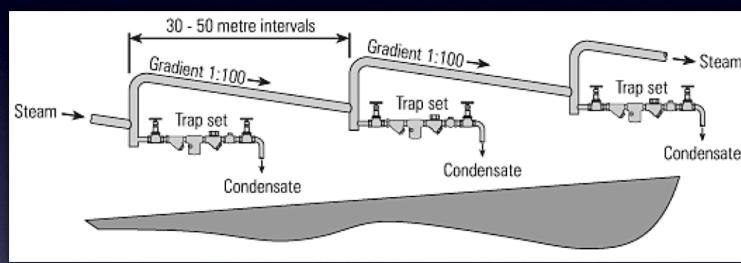
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

47

Optimización del uso del vapor (I)

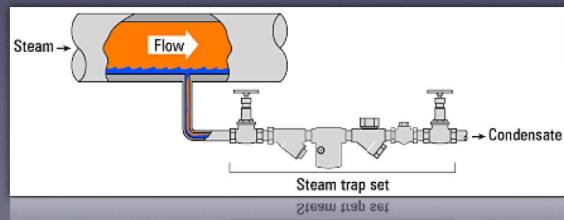
Purgadores de condensados

Típica instalación de la conducción principal



Puntos de drenaje de condensados

Demasiado pequeño



Tamaño correcto



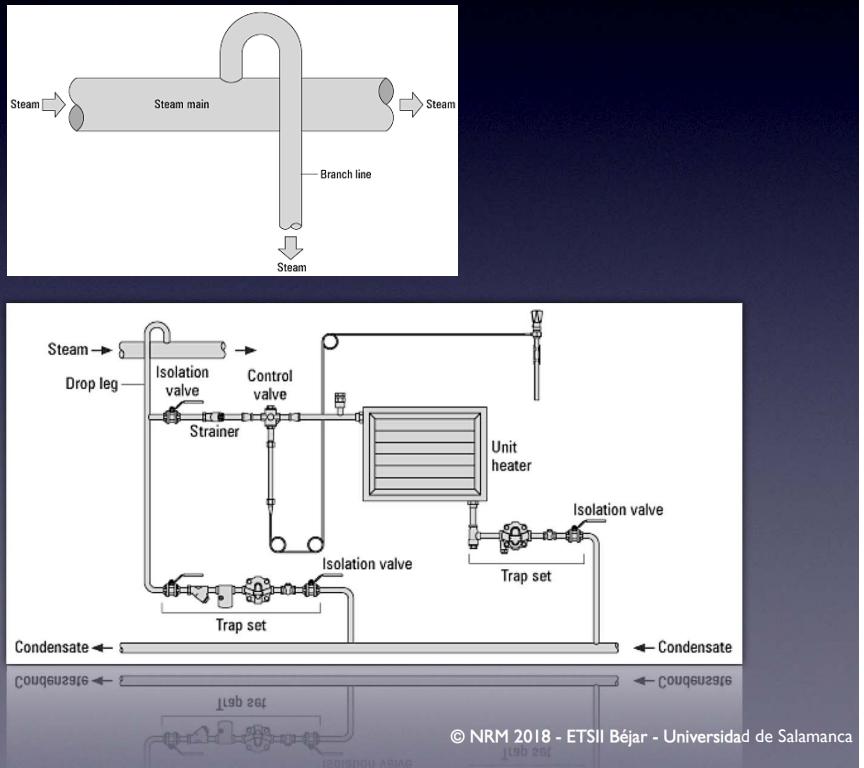
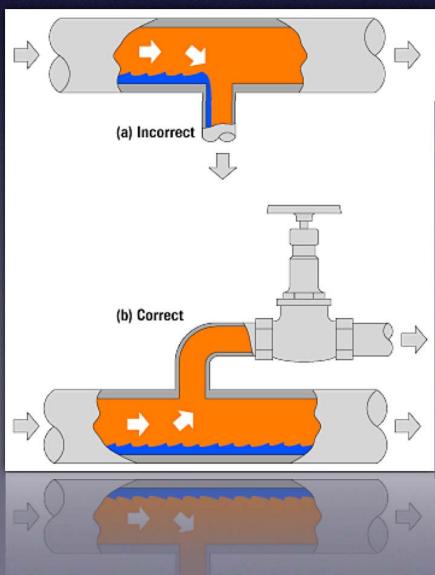
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

48

Optimización del uso del vapor (I)

Purgadores de condensados

Instalación de derivaciones

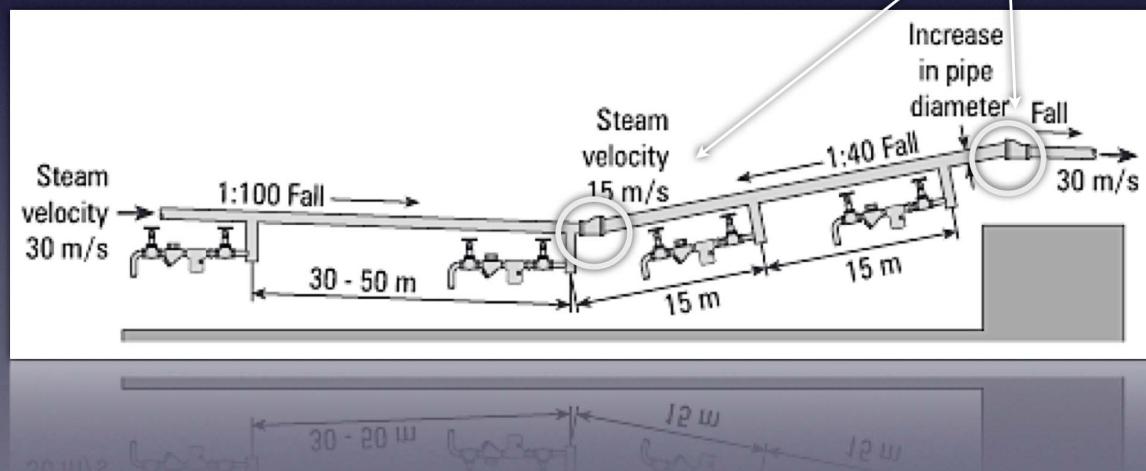
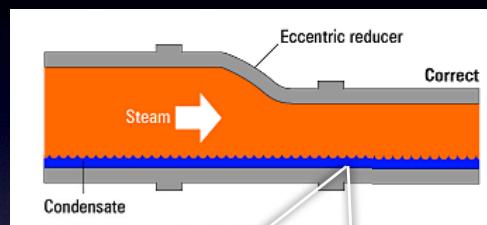


49

Optimización del uso del vapor (I)

Purgadores de condensados

Instalación de tramos ascendentes



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

50

Optimización del uso del vapor (I)

Purgadores de condensados

Tipos de purgadores



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

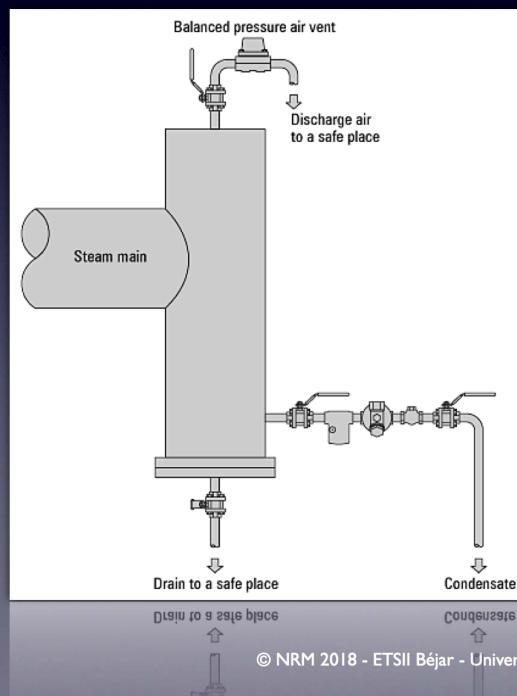
51

Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Eliminación de aire y otros gases no condensables

- Al llenado de la instalación
- Para evitar mal rendimiento del sistema:
 - Disminuye la presión (parcial) del vapor y la temperatura
 - Aísla en los intercambiadores
- Ubicaciones:
 - Al final de conducciones principales
 - En intercambiadores
 - Junto algunos purgadores
 - En lugares difíciles



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

52

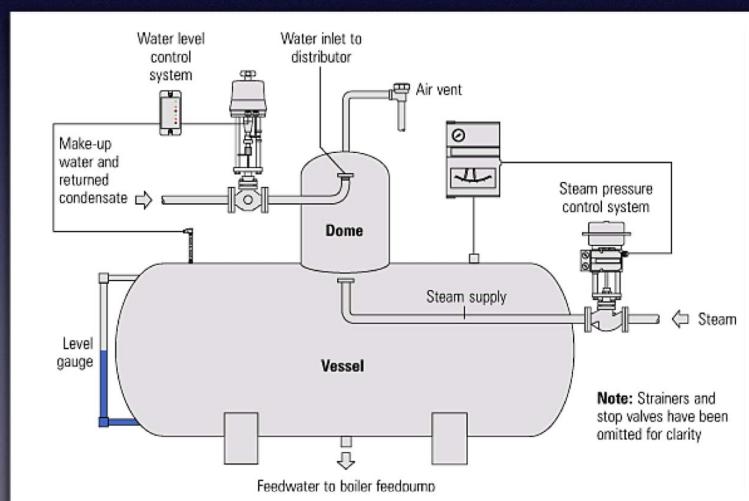
Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Eliminación de aire y otros gases no condensables

Desaireador presurizado

Finas gotas de condensado en un ambiente de vapor adquieren enseguida la temperatura de saturación, para la que la solubilidad de otros gases en el agua es cero. La mezcla de los gases liberados y vapor en exceso se purga a la atmósfera.



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

53

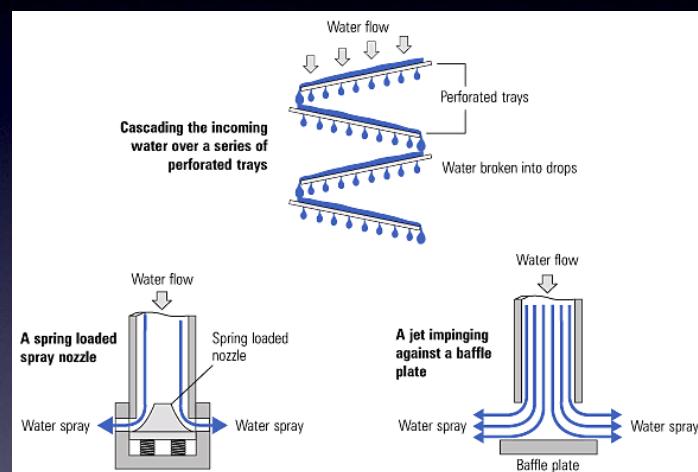
Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Eliminación de aire y otros gases no condensables

Dos métodos:

- Desaireador de bandejas de rejilla (tray)
- Desaireador por inyectores (spray)



	Tray type	Spray type
Life expectancy (years)	40	20
Turndown (maximum/minimum)	Very high	5
Cost factor	1	0.75
Typical application	Power plant	Process plant

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

54

Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Aislamiento

- El espesor óptimo depende de:
 - Coste de instalación
 - Calor transportado por el vapor
 - Tamaño de las conducciones
 - Temperatura de las conducciones
 - Humedad del entorno
 - Velocidad del viento

Se aíslan todas las partes de la conducción excepto las válvulas de seguridad.



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

55

Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Aislamiento

Formación de condensados



$$\dot{m}_s = \frac{3.6 \dot{Q}_p L f_p}{h_{fg}}$$

\dot{m}_s Tasa de condensación (kg/h)

\dot{Q}_p Pérdidas de calor (W/m)

L Longitud equivalente del tramo (m)

f_p Factor de pérdidas

h_{fg} Entalpía específica de vaporización (kJ/kg)

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

56

Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Aislamiento

Pérdidas de calor en W/m de conducciones no aisladas

Temperatura ambiente 10 - 21°C
Tubos horizontales
Sin viento

Temperature difference steam to air °C	Pipe size (DN)									
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
60	60	72	88	111	125	145	172	210	250	351
70	72	87	106	132	147	177	209	253	311	432
80	86	104	125	155	174	212	248	298	376	519
90	100	121	146	180	203	248	291	347	443	610
100	116	140	169	207	233	287	336	400	514	706
110	132	160	193	237	267	328	385	457	587	807
120	149	181	219	268	302	371	436	517	664	914
130	168	203	247	301	342	417	490	581	743	1025
140	187	226	276	337	382	464	547	649	825	1142
150	208	250	306	374	424	514	607	720	911	1263
160	229	276	338	413	469	566	670	794	999	1390
170	251	302	372	455	515	620	736	873	1090	1521
180	275	330	407	499	566	676	805	955	1184	1658
190	299	359	444	544	615	735	877	1041	1281	1800
200	325	389	483	592	681	795	951	1130	1381	1947
300	352	380	483	585	681	782	881	1130	1381	1947
400	380	320	444	544	612	732	831	1041	1281	1800
500	312	330	401	488	588	688	802	982	1181	1800

57

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Aislamiento

Ejemplo:

- Vapor saturado a 170°C (7 bar)
- 50 m conducción
- 6 m (equiv.) elementos

Condensaciones:

- Sin aislamiento: 98.3 kg/h
- Aislando la conducción: 19.32 kg/h
- Aislando todo: 9.83 kg/h



Temperature difference steam to air °C	Pipe size (DN)									
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
60	60	72	88	111	125	145	172	210	250	351
70	72	87	106	132	147	177	209	253	311	432
80	86	104	125	155	174	212	248	298	376	519
90	100	121	146	180	203	248	291	347	443	610
100	116	140	169	207	233	287	336	400	514	706
110	132	160	193	237	267	328	385	457	587	807
120	149	181	219	268	302	371	436	517	664	914
130	168	203	247	301	342	417	490	581	743	1025
140	187	226	276	337	382	464	547	649	825	1142
150	208	250	306	374	424	514	607	720	911	1263
160	229	276	338	413	469	566	670	794	999	1390
170	251	302	372	455	515	620	736	873	1090	1521
180	275	330	407	499	566	676	805	955	1184	1658
190	299	359	444	544	615	735	877	1041	1281	1800
200	325	389	483	592	681	795	951	1130	1381	1947
300	352	380	483	585	681	782	881	1130	1381	1947
400	380	320	444	544	612	732	831	1041	1281	1800
500	312	330	401	488	588	688	802	982	1181	1800

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

58

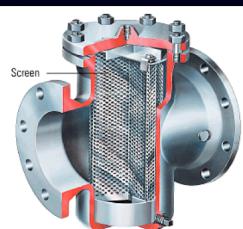
Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Filtros de rejilla



Filtro en Y

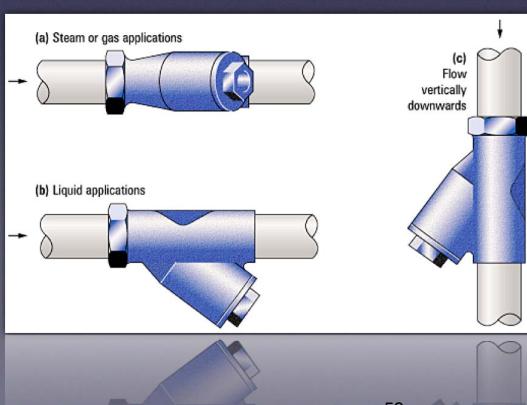


Filtro de cesta



Variantes

Para partículas visibles



Métodos de instalación correctos según el fluido a filtrar

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

59

Vapor en la industria

I. Fundamentos

- Principios termodinámicos
- Fluidos de trabajo: características y equipos
- Medición de caudales
- Estrategias de control

2. Optimización del uso del vapor (I)

- Válvulas de control
- Sistemas de distribución
- Purgadores de condensados
- Equipos accesorios

3. Optimización del uso del vapor (II)

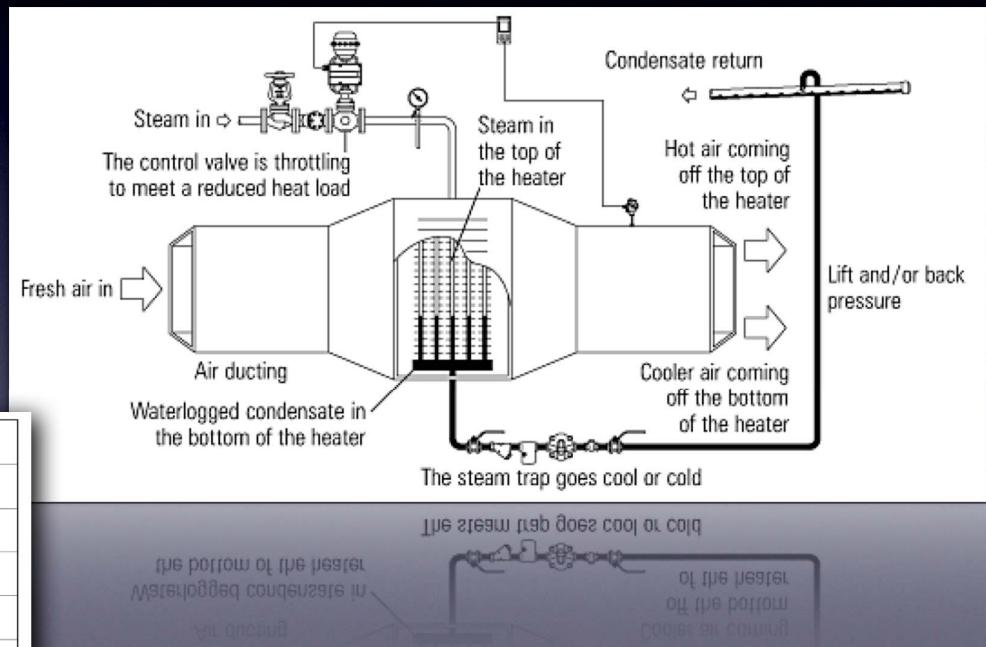
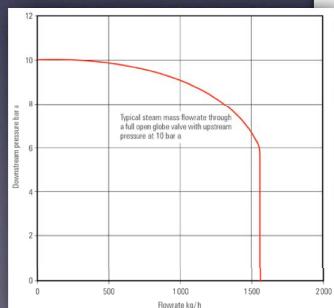
- Técnicas de tratamiento de condensados
- Almacenamiento de calor en agua presurizada

Optimización del uso del vapor (II)

Tratamiento de condensados

Evitar retenciones (stall)

Ocurre cuando la presión en el intercambiador es menor que en la línea de condensados (actuación de la válvula reguladora)



Causa corrosión y averías

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

61

Optimización del uso del vapor (II)

Tratamiento de condensados

Evitar retenciones (stall)

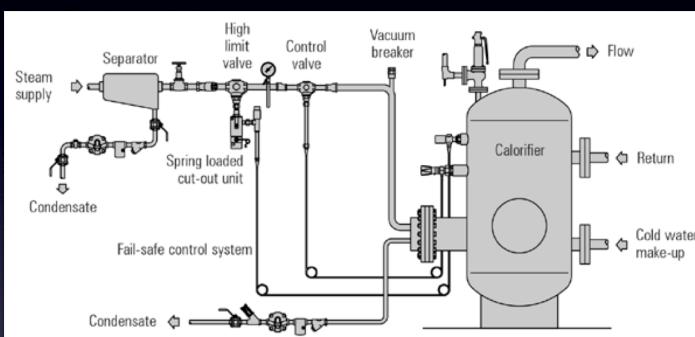
Ejemplo:

Calentador de agua

Plena carga (nominal):

Calienta agua de 40 a 60°C ($\Delta T=20^\circ\text{C}$)

Vapor a 1 bar g (120°C)



Carga a 2/3 nominal:

Calienta agua de 46.7° a 60°C ($\Delta T=20 \times 2/3=13.3^\circ\text{C}$)

Vapor a 0 bar g (100°C): retención de condensados (stall)

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

62

Optimización del uso del vapor (II)

Tratamiento de condensados

Evitar retenciones (stall)

Síntomas de retención de condensados:

- Purgadores de condensados tibios o fríos
- Fluctuaciones continuas del sistema de control
- Fluctuaciones continuas de la temperatura de salida
- Estratificación de temperaturas en el intercambiador
- Golpe de ariete en líneas de líquido
- Pérdida de potencia calorífica
- Reducción de la calidad del vapor aguas abajo
- Corrosión de intercambiadores
- Fugas en intercambiadores
- Averías en conducciones

Lugares sensibles a vigilar:

- Partes de la instalación a menos de 100°C
- Cargas muy variables
- Aparatos funcionando a bajas potencias
- Equipos delicados

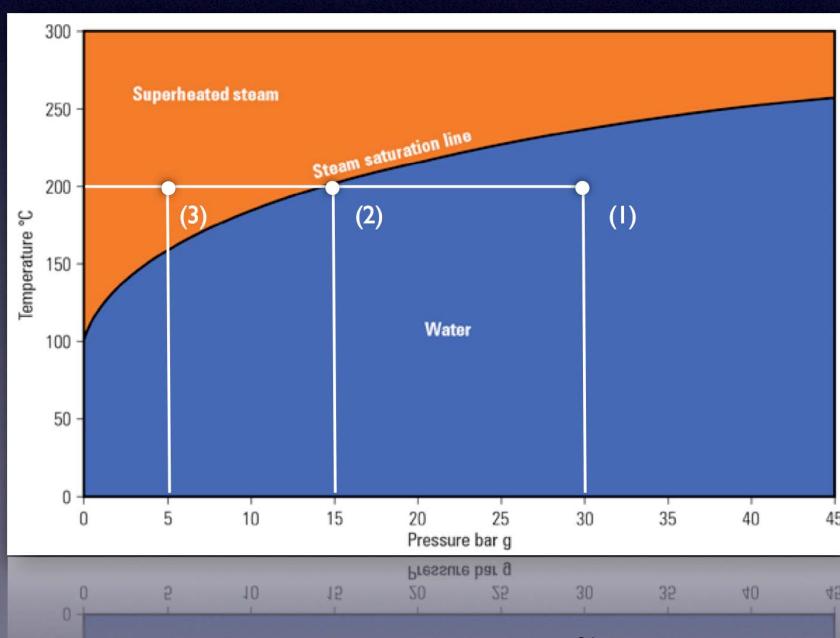
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

63

Optimización del uso del vapor (II)

Almacenamiento de calor

Principio de almacenamiento de vapor en agua presurizada



Revaporización espontánea por disminución de presión:

- (1) agua líquida a 30 bar g y 200°C
- (2) vapor saturado a 15 bar g y 200°C
- (3) vapor sobrecalentado a 5 bar y 200°C

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

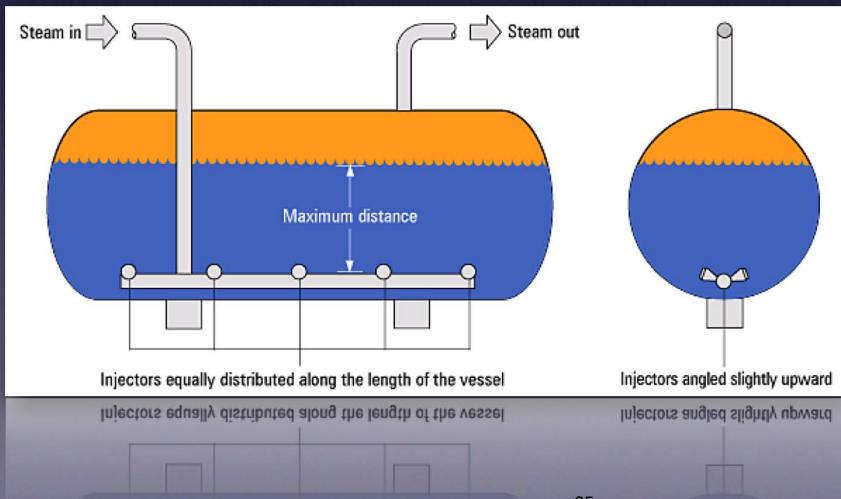
Optimización del uso del vapor (II)

Almacenamiento de calor

Agua presurizada

Tanque de almacenamiento

Inyectores de vapor



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

65

Optimización del uso del vapor (II)

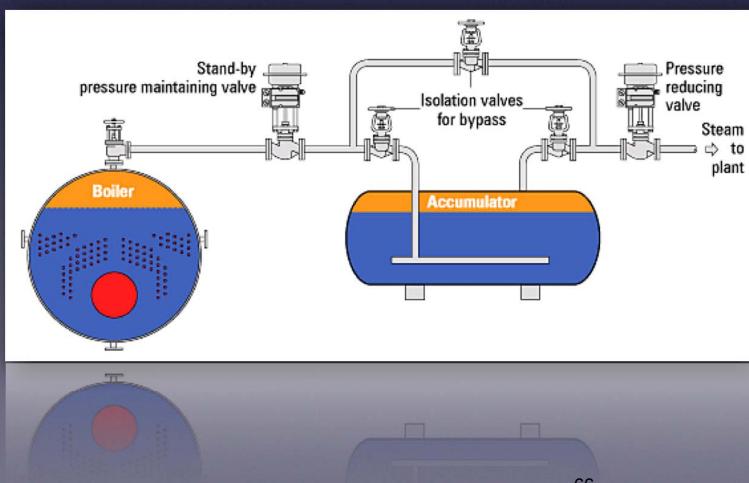
Almacenamiento de calor

Agua presurizada

Instalación típica

Características principales:

- Calidad del vapor: título próximo al 100%
- Limpieza del vapor asegurada por decantación
- No incrementa el consumo de agua (circuito cerrado)
- Incrementa la flexibilidad de la gestión



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

66

Vapor en la industria

I. Fundamentos

- Principios termodinámicos
- Fluidos de trabajo: características y equipos
- Medición de caudales
- Estrategias de control

3. Optimización del uso del vapor

(II)

- Técnicas de tratamiento de condensados
- Almacenamiento de calor en agua presurizada

Fin

2. Optimización del uso del vapor (I)

- Válvulas de control
- Sistemas de distribución
- Purgadores de condensados
- Equipos accesorios

4 EJERCICIO PRÁCTICO DESARROLLADO

Prediseño de instalación de vapor para freiduría industrial por lotes

Esquema de principio general

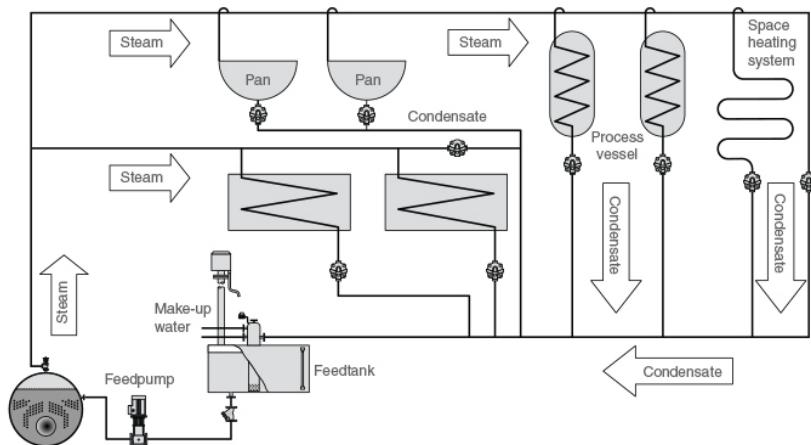


Fig. 10.1.1 A typical basic steam circuit

Disposición típica de un sistema regulador de presión

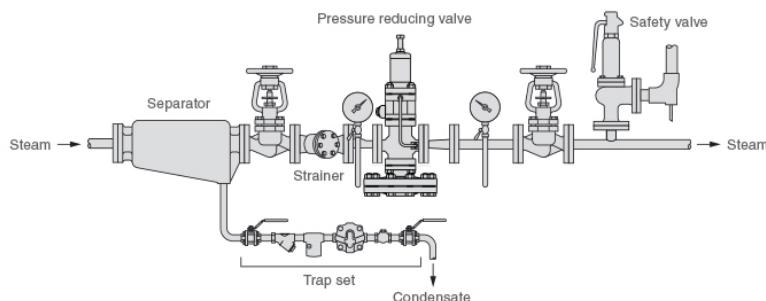
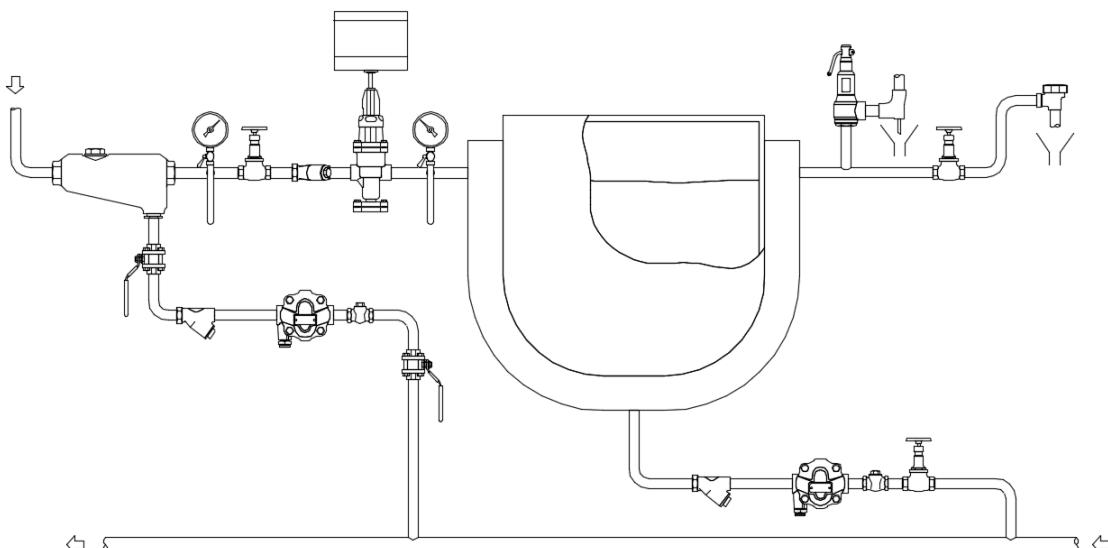


Fig. 10.1.3 Typical pressure reducing valve station

Freidora encamisada



DATOS INICIALES

Patatas por lote (kg)	125
Calor específico del agua líquida (kJ/(kg°C))	4,186
Calor latente de vaporización del agua (kJ/kg)	2260
Porcentaje de humedad a la entrada (kg/kg)	85%
Temperatura a la entrada (°C)	13
Porcentaje de humedad a la salida (kg/kg)	35%
Porcentaje de aceite absorbida (mg/kg) ??	400

Calor específico del aceite (kJ/(kg°C))	2,05
Densidad del aceite (kg/m ³)	985
Temperatura inicial del aceite (°C)	16,5
Temperatura de consigna para el aceite (°C)	185
Tiempo de precalentamiento (min)	25
Tiempo de proceso por lote (min)	20
Capacidad de la sartén (L)	800
Rendimiento de la sartén	83%

<http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Tables/saturated-steam.aspx>

PARÁMETROS DE VAPOR

	0	1	2	3
Tipo de vapor				
Presión de saturación (bar)	0	6,0	8,0	10,0
Temperatura de saturación (°C)	100	165,0	175,4	184,1
Entalpía específica del agua hf (kJ/kg)	419,1	696,8	742,3	780,8
Entalpía específica de vaporización hfg (kJ/kg)	2256,7	2065,5	2030,25	1999,4
Entalpía específica del vapor hg (kJ/kg)	2675,8	2762,3	2772,6	2780,2
Densidad del vapor (kg/m ³)	0,5975	3,67259	4,66013	5,64194
Viscosidad dinámica del vapor (kg/(m s) x10 ⁻⁵)	1,2268	1,4510	1,5487	1,1671

CONDICIONES DE DISEÑO

Tipo de vapor producido	2
Presión de saturación (bar)	8,0
Temperatura de saturación (°C)	175,4

$$\dot{Q}_{vapor} \left(\text{kW} \right) = \frac{c_p \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \right) \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) V \left(\text{m}^3 \right) \Delta T \left(\text{°C} \right)}{\eta / 100 \times t \left(\text{min} \right) \left(\frac{60 \text{ s}}{\text{min}} \right)}$$

$$\dot{m}_{vapor} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{\dot{Q} \left(\text{kW} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \right)}{\Delta h_{fg} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}$$

TRANSITORIO 1º: CALENTAMIENTO DE LA SARTÉN

Energía teórica necesaria (MJ)	272,2
Energía a aportar a la sartén (MJ)	329,9
Tiempo de calentamiento (min)	25
Potencia a aportar en vapor (kW)	220

Entalpía específica disponible (kJ/kg)	2772,6
Entalpía específica del condensado (kJ/kg)	742,3
Salto entálpico específico (kJ/kg)	2030,3
Flujo de vapor (kg/h)	390

TRANSITORIO 2º: FREÍR UN LOTE

Energía teórica para elevar a 100°C (MJ)	38,7
Energía de vaporización (MJ)	141,3
Energía a aportar a la sartén (MJ)	218,1
Tiempo de proceso por lote (min)	20
Potencia a aportar en vapor (kW)	182
Entalpía específica disponible (kJ/kg)	2772,6
Entalpía específica del condensado (kJ/kg)	742,3
Salto entálpico específico (kJ/kg)	2030,3
Flujo de vapor (kg/h)	322

DISEÑO DE CONDUCCIONES

[http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/
Steam-Engineering-Tutorialssteam-distribution/pipes-and-pipe-sizing.aspx](http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorialssteam-distribution/pipes-and-pipe-sizing.aspx)

TUBO DE ACERO SOLDADO DIN 2440 serie MEDIA - COTAIN

TUBO DE ACERO SIN SOLDADURA DIN 2448 espesor típico

Denominac.	Øext (mm)	Esp. (mm)	Øint (mm)	Rug. (mm)
1/2" DN15	21,3	2,65	16	0,045
3/4" D20	26,9	2,65	21,6	0,045
1" DN25	33,7	3,25	27,2	0,045
1 1/4" DN32	42,4	3,25	35,9	0,045
1 1/2" DN40	48,3	3,25	41,8	0,045
2" DN50	60,3	3,65	53	0,045
2 1/2" DN65	76,1	3,65	68,8	0,045
3" DN80	88,9	4,05	80,8	0,045
3 1/2" DN90	101,6	4,05	93,5	0,045
4" DN100	114,3	4,50	105,3	0,045
5" DN125	139,7	4,85	130	0,045

Debe utilizarse tubo de acero al carbono sin soldadura
según DIN 2448/1629 EN 10216-1 (válido hasta 300°C)
y un espesor acorde con la presión

Espesor de pared según PRESIÓN

El espesor de la pared e es el resultado de sumar el espesor teórico e_0 el suplemento e_1 debido a la tolerancia de la pared del tubo y el suplemento e_2 para contrarestar corrosión y desgaste.

$$P = \frac{200 \cdot V \cdot \frac{K}{S} \cdot e_0}{D}$$

$$e_0 = \frac{D \cdot P}{200 \cdot V \cdot \frac{K}{S}}$$

$$e_0 = e_0 + e_1 + e_2$$

P = Máxima presión interna de la materia de paso (kp/cm²)

D = Diámetro exterior del tubo (mm)

e_0 = Espesor de pared teórico (mm)

e_1 = Suplemento para la compensación de las tolerancias (mm)

e_2 = Suplemento para la corrosión y desgaste (mm)

V = Valencia del cordón de soldadura longitudinal ó helicoidal (V=1 para tubos sin soldadura)

K = Límite de fluencia o elástico (kp/mm²)

S = Coeficiente de seguridad (1,5 a 2,5 en función del tipo de aplicación)

Límite elástico habitual (espesores hasta 16 mm)

100°C	175 MPa	17,5 kp/mm ²
150°C	165 MPa	16,5 kp/mm ²
200°C	150 MPa	15,0 kp/mm ²
250°C	130 MPa	13,0 kp/mm ²

Ejemplo (200°C):

D (mm)=	60,3
P (kp/cm ²) =	25
c. s =	2,5
e_0 (mm) =	1,256

<https://beta.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-distribution/pip es-and-pipe-sizing>

DISEÑO BASADO EN PÉRDIDAS DE CARGA

Longitud real de la conducción L (m)	15	(Desde la válvula reguladora hasta el receptor)
Incremento por accesorios	20%	
Longitud equivalente de la conducción Le (m)	18	
ΔP máx en la conducción (bar)	0,2	

Factor de pérdida de carga (PDF):

Presión inicio (bar g)	13,0	(Las tablas están al final)
Presión final (bar g)	12,8	
F1 (tabla 10.2.5) para Presión inicio	166,5	
F2 (tabla 10.2.5) para presión final	161,92	
PDF teórico (F1-F2)/Le	0,254	
PDF adoptado (tabla 10.2.6)	0,250	Elegir por debajo del valor teórico
Flujo de vapor necesario (kg/h)	390	
\varnothing_{int} mínimo nominal (mm) (tabla 10.2.6)	32	

Capacidad máxima (kg/h) 447,9 Cumple
Conducción adoptada (DIN 2448) 1 1/4" DN32

Volumen específico (m³/kg) 0,21459

Diámetro interior (mm) 35,9

Velocidad vapor (m/s) 22,97

$$v_{vapor} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\dot{m}_{vapor} \left(\frac{kg}{h} \right)}{3600 \left(\frac{s}{h} \right)} v_g \left(\frac{m^3}{kg} \right) \times 4 \pi D^2 (m^2)$$

PRODUCCIÓN DE VAPOR

Presión requerida en el receptor (bar) abs	9,0
Pérdida carga crítica válvula reguladora	42%
Presión previa válvula (bar) abs	12,8
ΔP máx en la conducción (bar)	0,2
Consigna presión teórica caldera (bar)	13,0
Δ Margen precaución (5%) (bar)	0,6
Consigna presión caldera (bar) abs	14,0
Consigna presión deseada caldera (bar)	13,0

ELECCIÓN DE LA VÁLVULA REGULADORA

Sizes	DN15	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100
K_{vs}	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0	63.0	100.0	160.0
	2.5	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0	63.0	100.0
	1.6	2.5	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0	63.0
	1.0	1.6	2.5	4.0	6.3	10.0	16.0	25.0	36.0

Válvula elegida (DN)	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50
Flujo de vapor (kg/h)	322	322	322	322	322
Volumen específico vapor (m ³ /kg)	0,21459	0,21459	0,21459	0,21459	0,21459
Flujo volumétrico vapor (m ³ /h)	69,2	69,2	69,2	69,2	69,2
Apertura de paso (cm ²)	3,1	4,9	8,0	12,6	19,6
Velocidad salida vapor (m/s)	62,0	39,2	24,0	15,2	9,8
Velocidad máxima salida vapor (m/s)	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Verificación velocidad salida	Pequeña !!	OK	OK	OK	OK
Consigna presión efectiva caldera (bar)	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
Presión requerida en el receptor (bar)	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
ΔP requerida (bar)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Pérdida carga relativa (%)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38

	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50
Válvula elegida (DN)					
Coeficiente válvula Kv teórico (m ³ /h)	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07
Coeficiente válvula Kvs (m ³ /h)	2,5	2,5	4	6,3	10
Rango trabajo (abierta toda) (%)	82,93%	82,93%	51,83%	32,91%	20,73%
Verificación presión caldera	Aumentar	Aumentar	Ok	Ok	Ok