



# Vapor en la industria

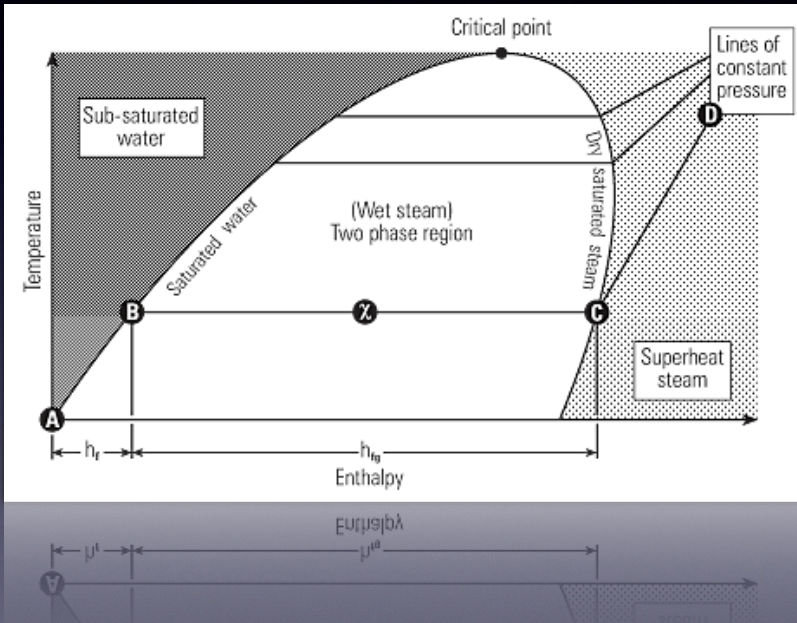
Norberto Redondo Melchor  
Doctor Ingeniero Industrial

## Vapor en la industria

1. 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

# Fundamentos del uso del vapor

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



Presión	13.8	bar manométrico
Temperatura de Recalentamiento	260	°C
[Calcular] [Reset] [Imprimir]		
Temperatura de Saturación	197.733	°C
Grados de Recalentamiento	62.2669	°C
Entalpía Específica del Agua ( $h_f$ )	842.223	kJ/kg
Entalpía Específica de Evaporación ( $h_{fg}$ )	1948.95	kJ/kg
Entalpía Específica del Vapor Recalentado ( $h$ )	2946.85	kJ/kg
Densidad del Vapor	6.34372	kg/m <sup>3</sup>
Volumen Específico del Vapor ( $v$ )	0.157636	m <sup>3</sup> /kg
Entropía Específica del Agua ( $s_f$ )	2.30940	kJ/kg K
Entropía Específica de Evaporación ( $s_{fg}$ )	4.13892	kJ/kg K
Entropía Específica del Vapor Recalentado ( $s$ )	6.75897	kJ/kg K
Calor Específico del Vapor ( $c_v$ )	1.69359	kJ/kg K
Calor Específico del Vapor ( $c_p$ )	2.32486	kJ/kg K
Velocidad del sonido	550.508	m/s
Viscosidad Dinámica del Vapor	1.83900E-05	Pa s
Coefficiente Isentrópico ( $k$ )	1.29673	
Factor de Compresibilidad del Vapor	0.948997	

Entalpía (energía interna más potencial trabajo de expansión) :

$$H \text{ (kJ)} = U + PV \quad h \text{ (kJ/kg)} \text{ entalpía específica}$$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

Principios termodinámicos

Zona de líquido:

$$h = h_f$$

Línea de saturación:

$$h = h_g$$

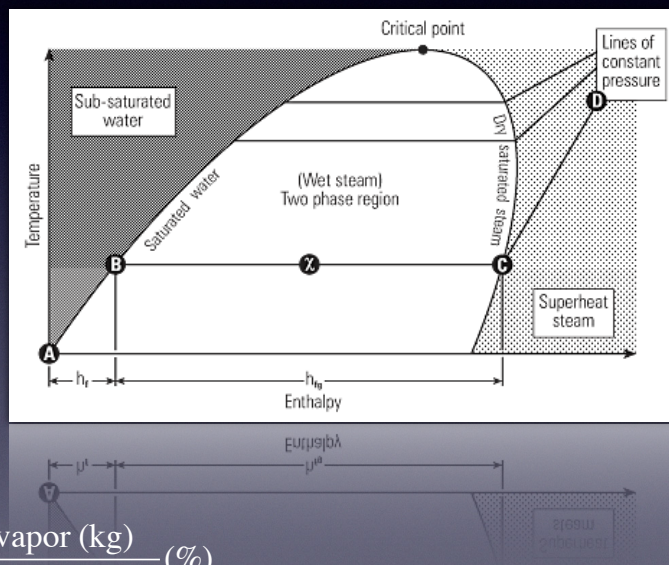
Zona de vapor:

$$h = h_g$$

Zona bifásica:

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

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

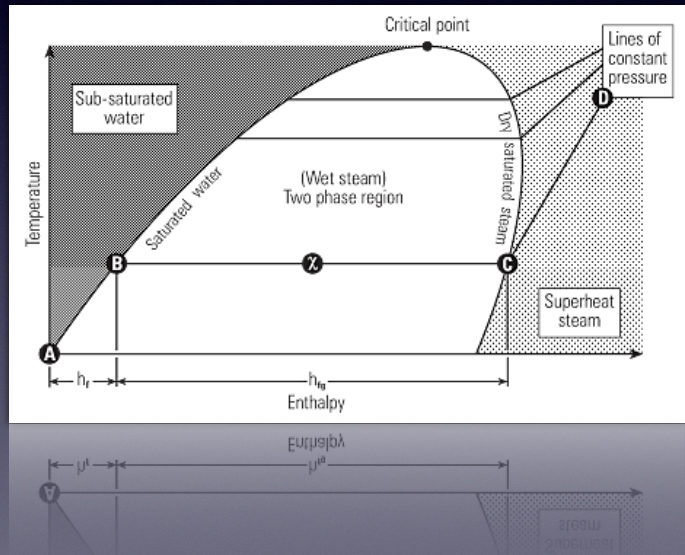


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

## Principios termodinámicos

Presión bar g	Temp. saturac. °C	Entalpía específica kJ/kg			Volumen vapor seco saturado m³/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

# Fundamentos del uso del vapor

## Características del vapor

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

Porcentaje de vaporización (%) =  $\frac{h_{f1} - h_{f2}}{h_{fg2}} \times 100$   
instantánea

Ejemplo:

Agua líquida a 5 bares:  $h_{f1} = 671 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Agua despresurizada:  $\left\{ \begin{array}{l} h_{f2} = 419 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ h_{fg2} = 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{array} \right.$

Vaporización instantánea (%) =  $\frac{671 - 419}{2257} \times 100 = 11,2\%$

0,112 kg de vapor por cada kg de agua líquida

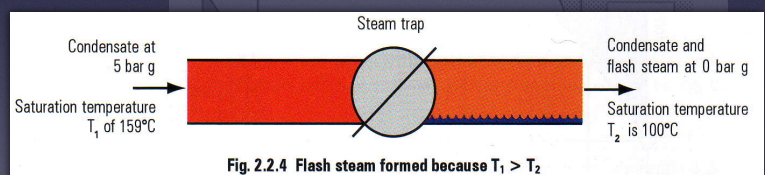
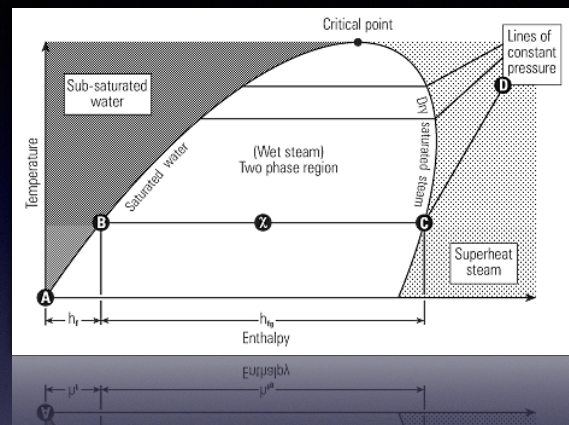


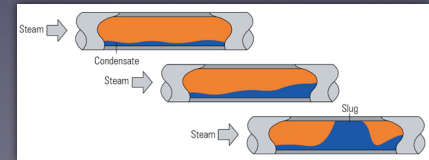
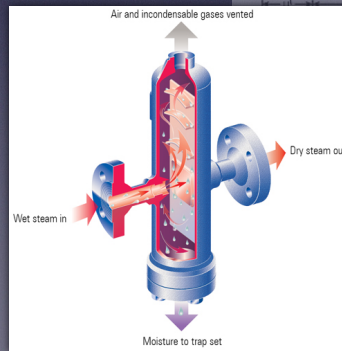
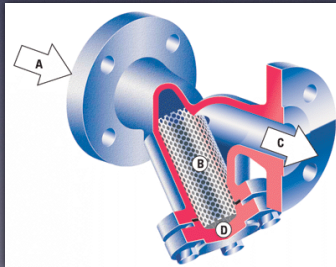
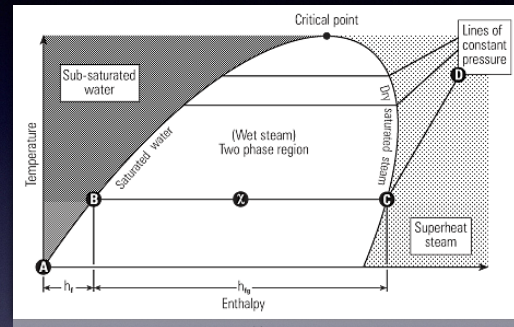
Fig. 2.2.4 Flash steam formed because  $T_1 > T_2$

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

## Características del vapor

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

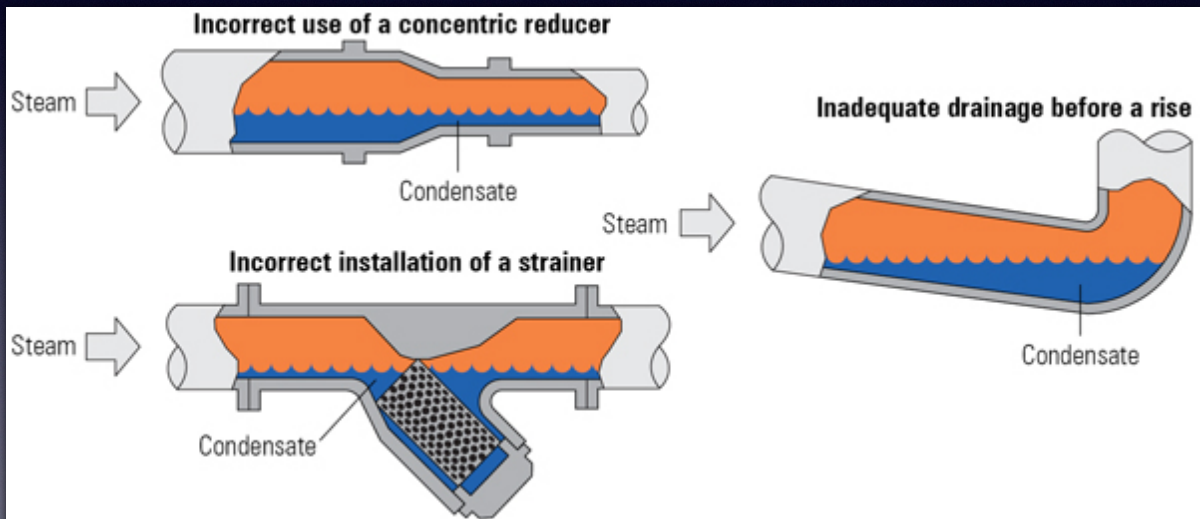
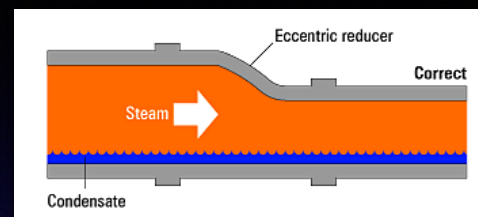


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

## Equipos

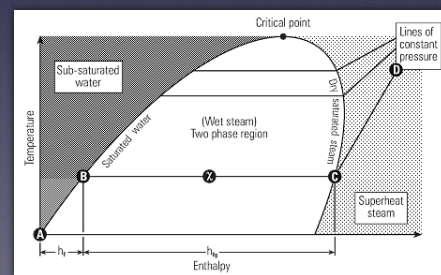
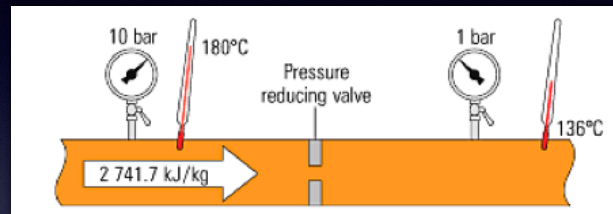
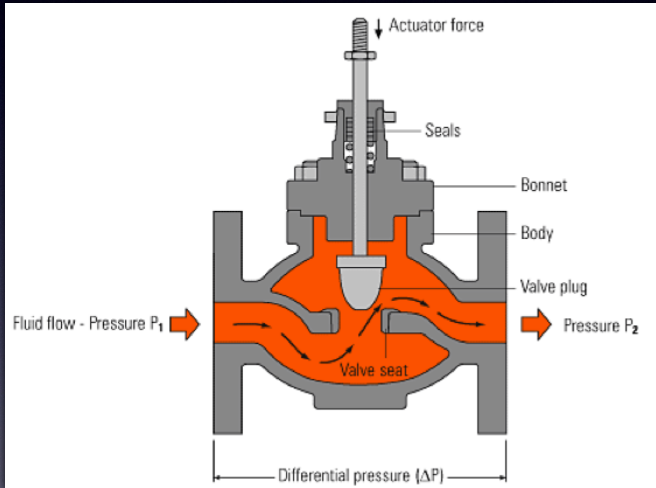
- Conducciones
- Reducción de sección
- Instalación de filtros
- Montantes



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

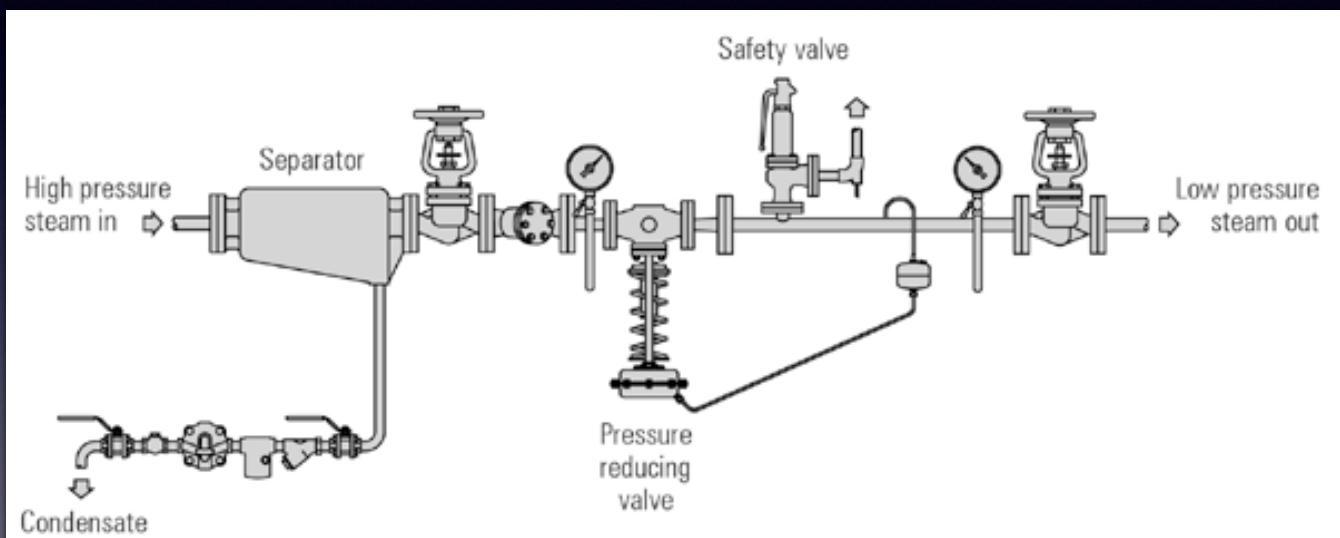
- Equipos
- Válvulas
  - Revaporización



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

- Equipos
- Disposición normal de los componentes habituales de una instalación de vapor



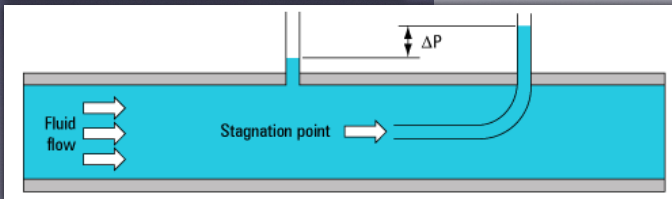
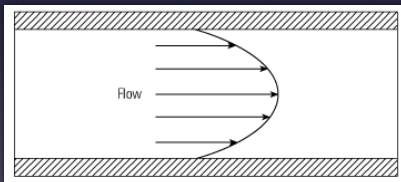
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

## Medición de caudales

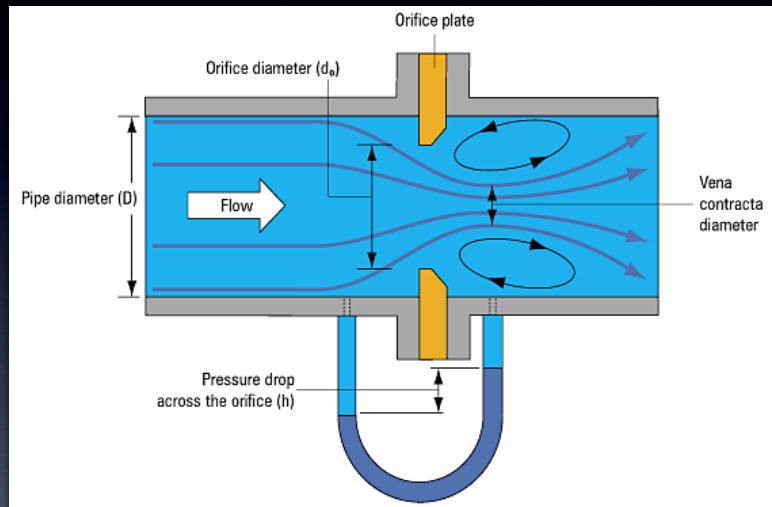
Bernoulli:

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



Tubo de Pitot  
En. cinética -> En. potencial  
(+Δ altura)

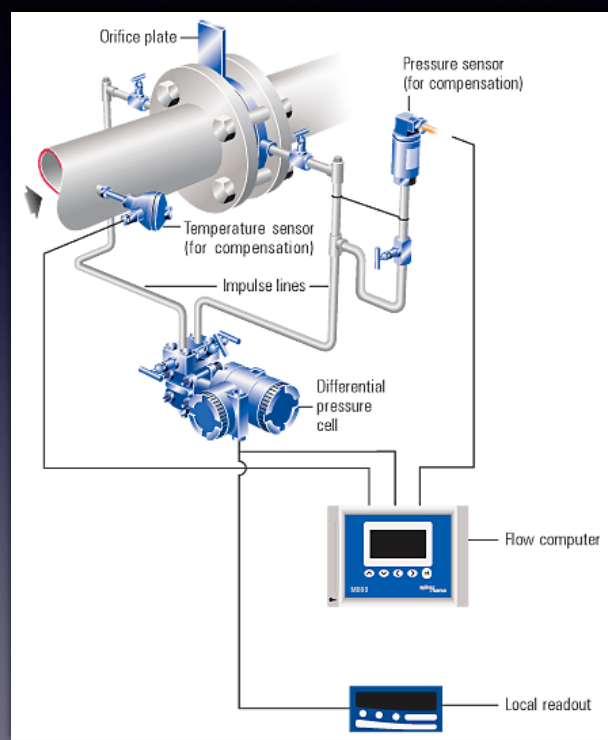
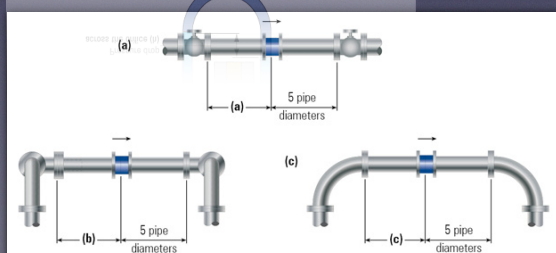
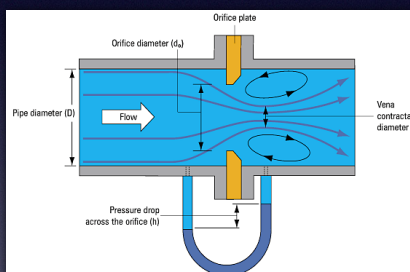
## Caudalímetro de orificio



# Fundamentos del uso del vapor

## Medición de caudales

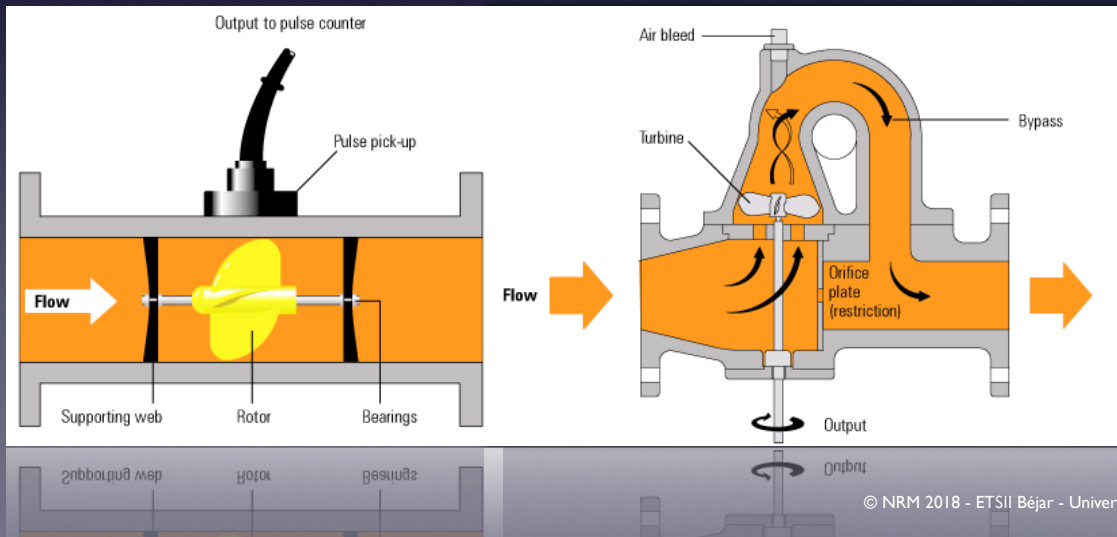
### Sistema de medición basado en ISO 5167



# Fundamentos del uso del vapor

## Medición de caudales

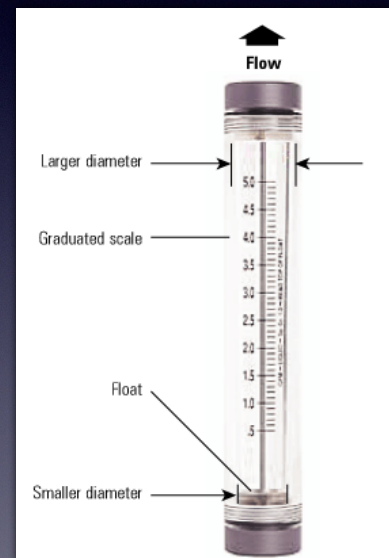
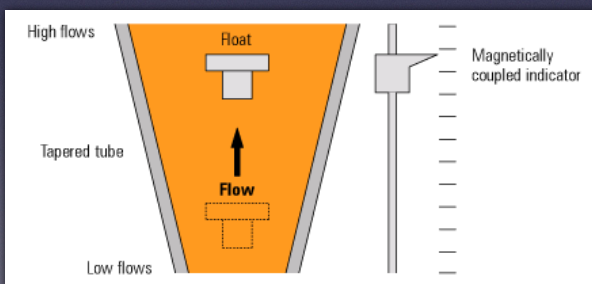
### Medidores de turbina



# Fundamentos del uso del vapor

## Medición de caudales

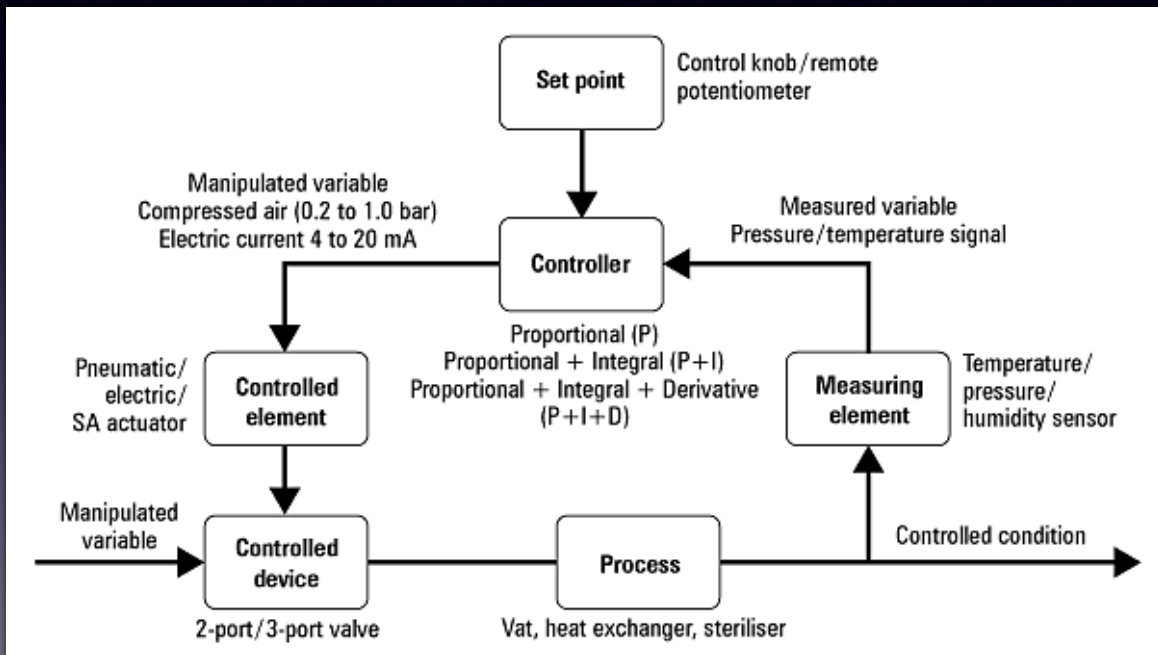
### Medidores de sección variable



# Fundamentos del uso del vapor

Control

Esquema de principio de un sistema de control



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

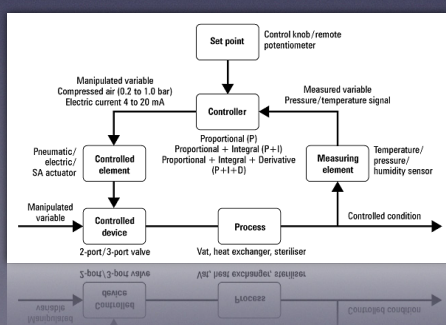
Control

Software

## Arduino PID - Guía de uso de la librería

Traducción del trabajo de Brett Beauregard:  
<http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>

<http://brettbeauregard.com/blog/wp-content/uploads/2012/07/Gu%C3%ADa-de-uso-PID-para-Arduino.pdf>

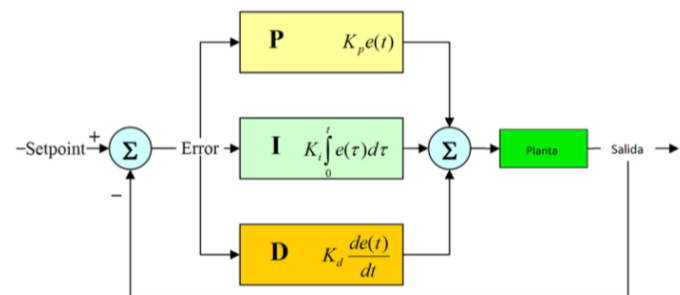


### La ecuación del PID:

De la documentación existente sobre sistemas de control, podemos destacar la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Para tener una idea más clara, recurrimos al siguiente diagrama



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Fundamentos del uso del vapor

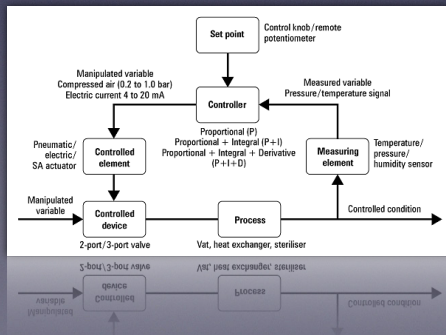
Control

## Arduino PID - Guía de uso de la librería

Traducción del trabajo de Brett Beauregard:

<http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>

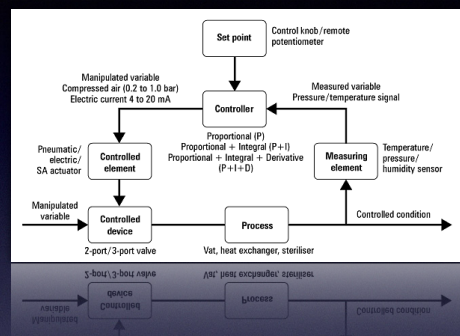
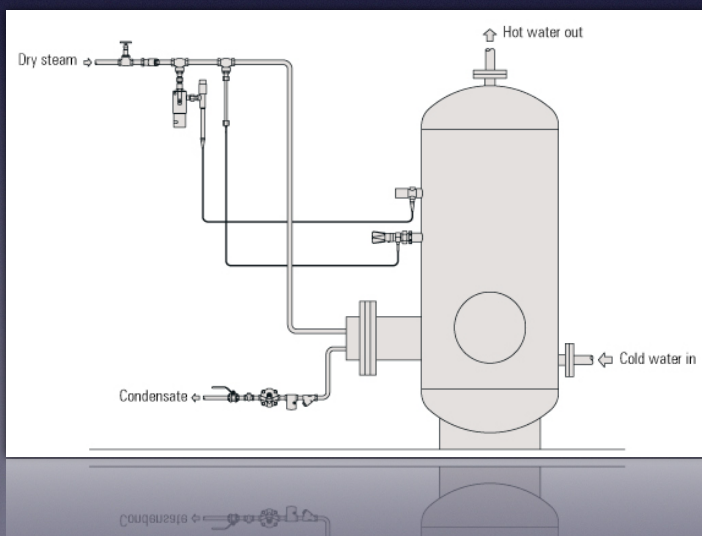
Coding Laboratory



# Optimización del uso del fluido de trabajo (I)

Control

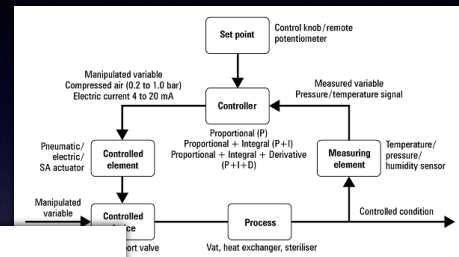
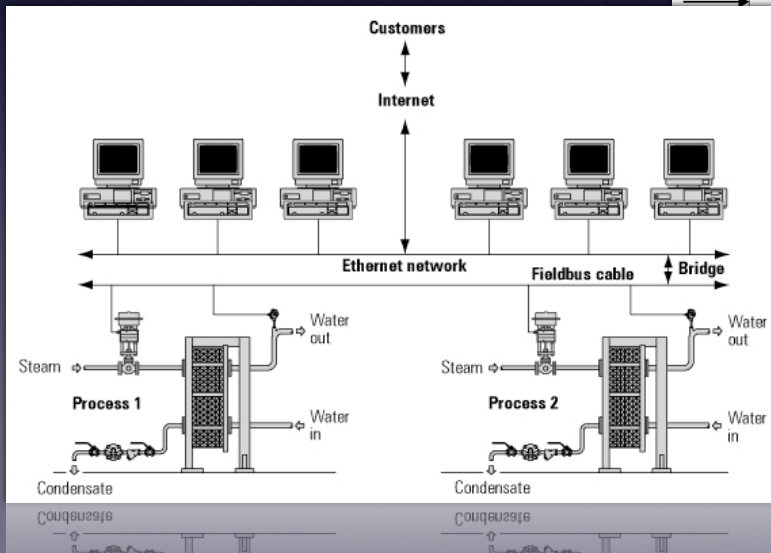
Ejemplo de aplicación



# Optimización del uso del fluido de trabajo (I)

Control

Ejemplo de aplicación



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

## Vapor en la industria

### 1. 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)

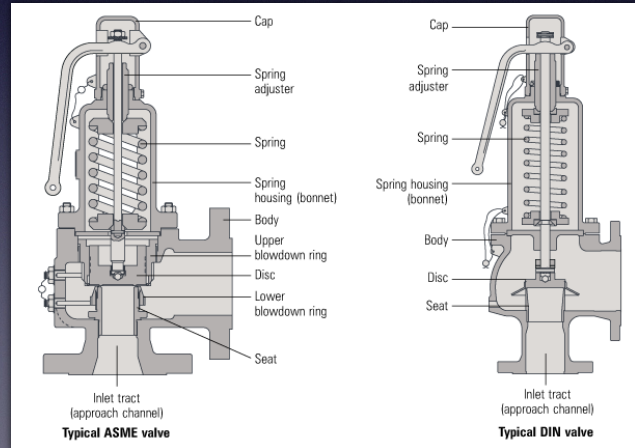
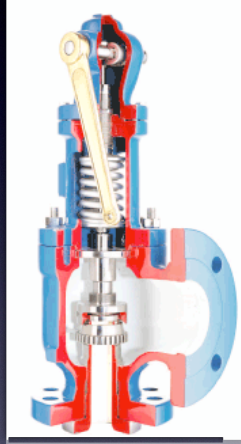
- Técnicas de tratamiento de condensados
- Almacenamiento de calor en agua presurizada

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de seguridad

Típicas válvulas de seguridad EN ISO 4126-1

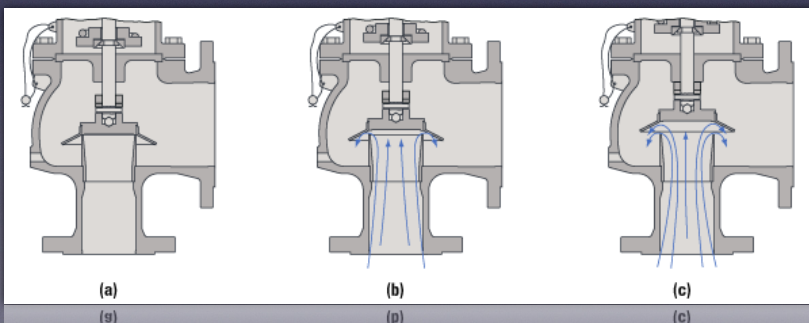
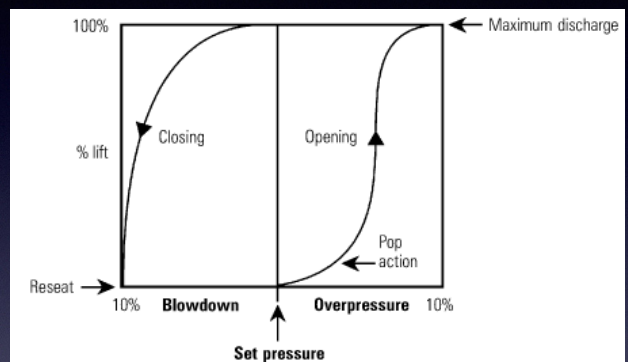


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de seguridad

Funcionamiento típico de una válvula de seguridad



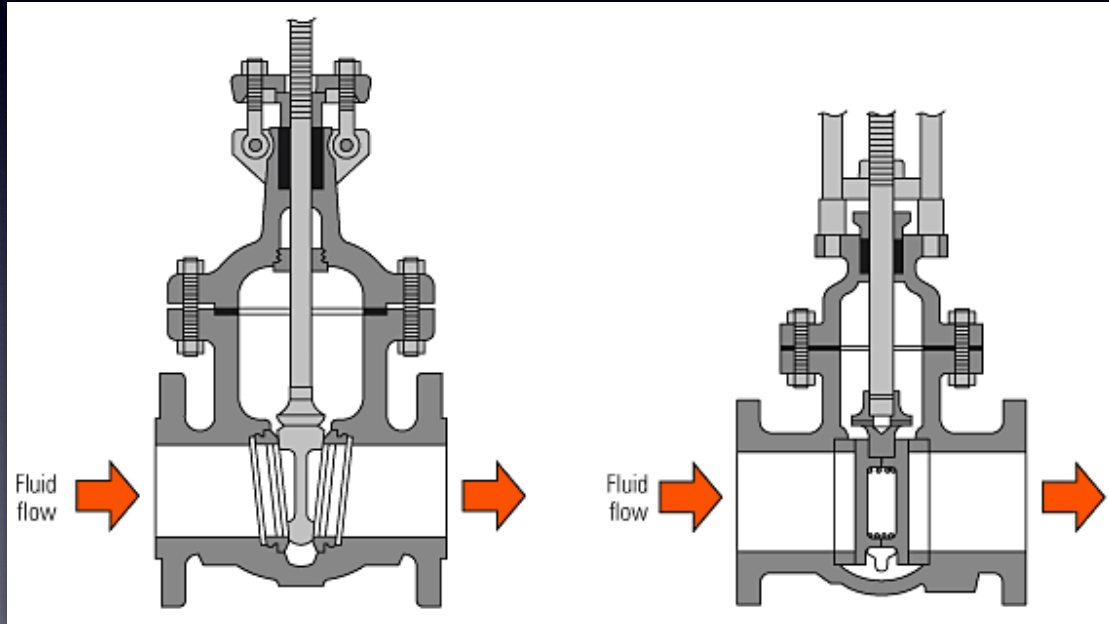
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de paso

Válvula de compuerta en cuña

Válvula de compuerta paralela

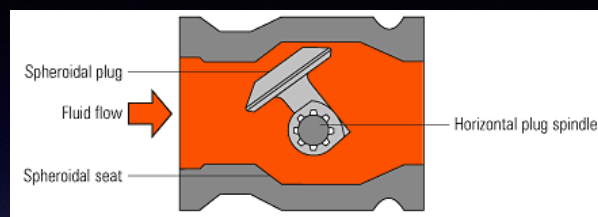


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

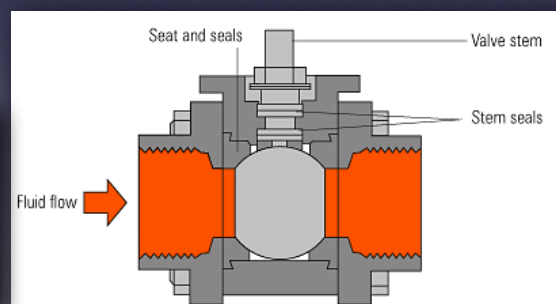
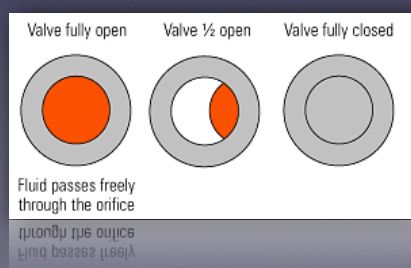
# Optimización del uso del vapor (I)

Válvula esferoide excéntrica

Válvulas de paso



Válvula de bola

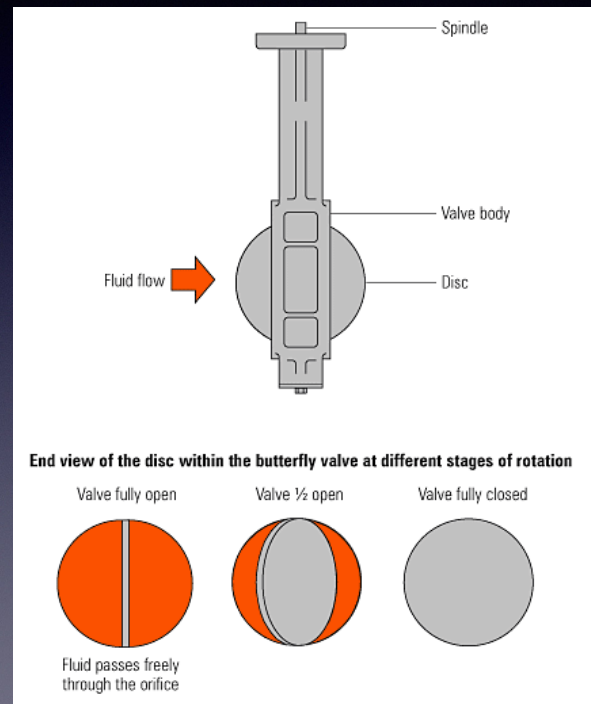


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de paso

Válvula de mariposa



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

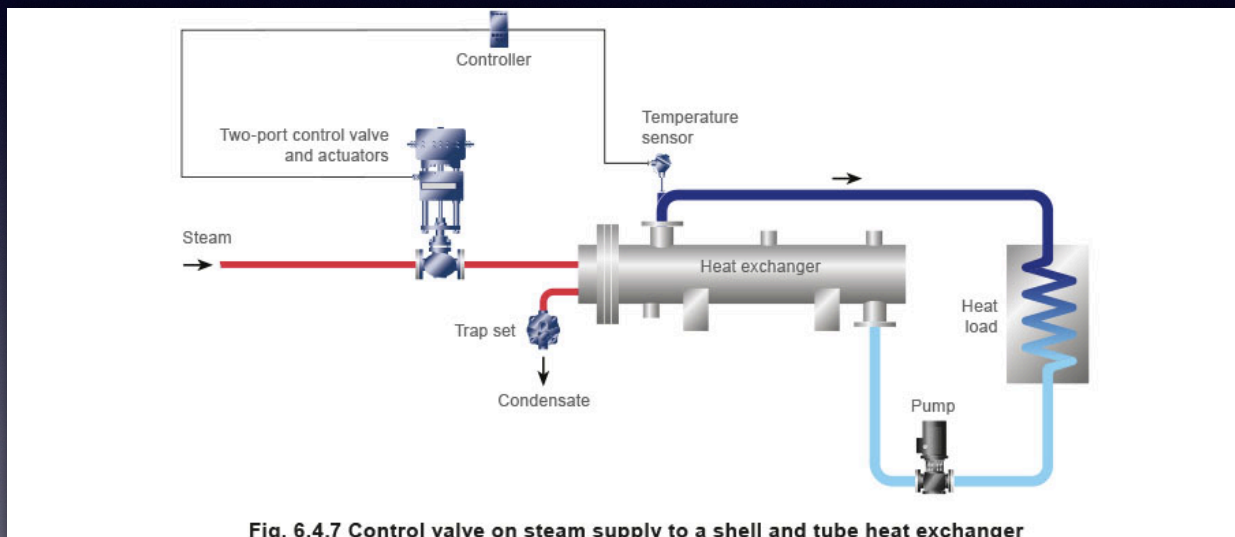


Fig. 6.4.7 Control valve on steam supply to a shell and tube heat exchanger

Fig. 6.4.7 Control valve on steam supply to a shell and tube heat exchanger

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

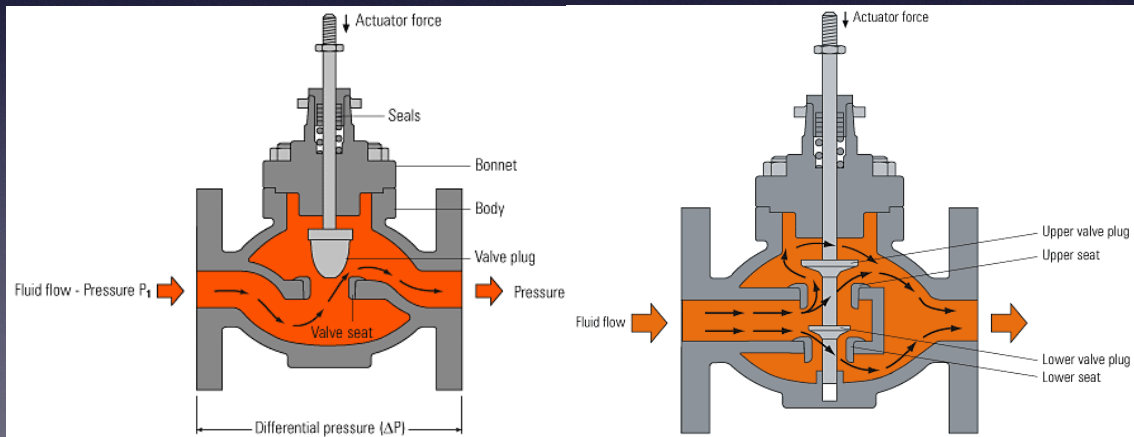
# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvulas de doble asiento

Válvulas de un asiento, tipo globo

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

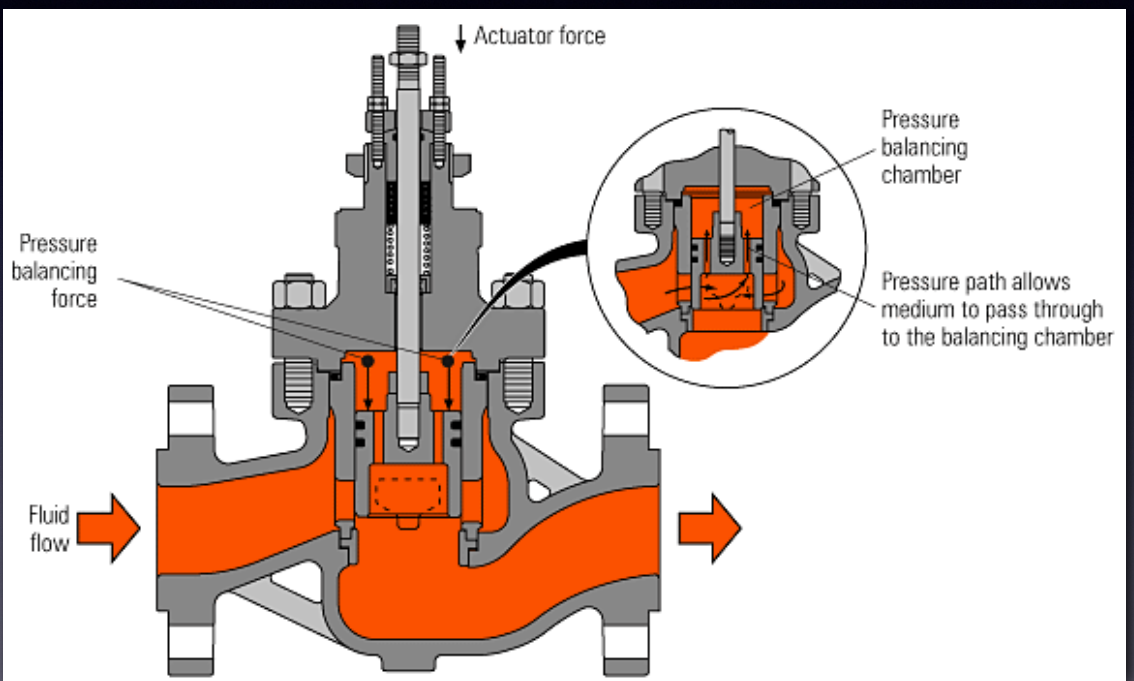


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

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



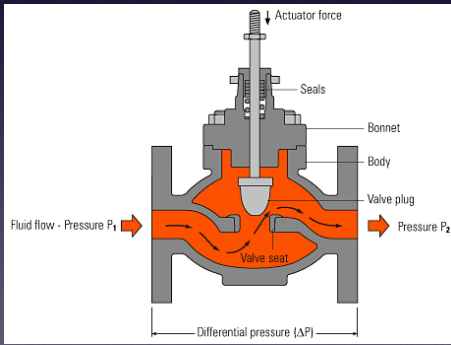
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

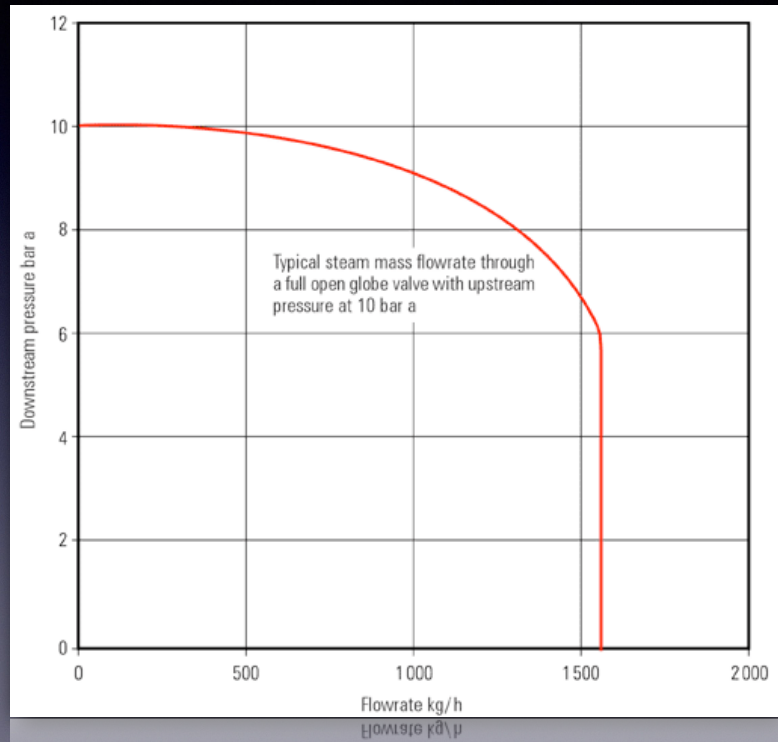
## Válvulas de control

### 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



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# 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.

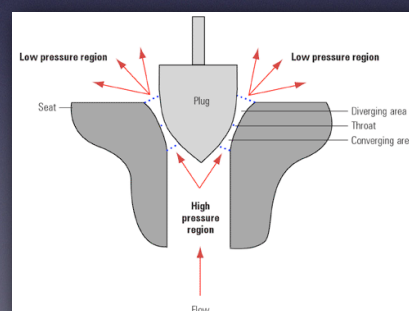
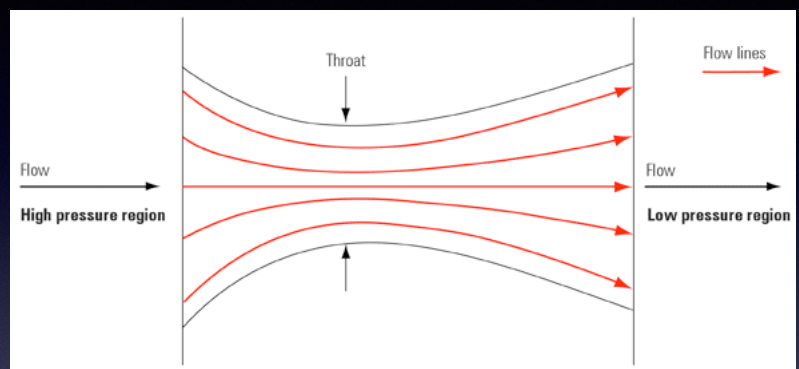
#### Cerca de la garganta (throat):

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 porque la sobrecompensa el aumento en el volumen específico a causa de la poca presión. La presión es pues la mínima posible ya. El valor en la garganta es la presión crítica (un 58% de la presión inicial).



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# 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 <sup>3</sup> /h) entre 5°C y 40°C que crea una pérdida de carga de un bar
$K_{vs}$	Caudal (m <sup>3</sup> /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°F y 100°F que crea una pérdida de carga de una libra/pulgada <sup>2</sup> . Hay que precisar a qué galón se refiere (UK o US)
$A_v$	Flujo de agua (m <sup>3</sup> /s) entre 5°C y 40°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

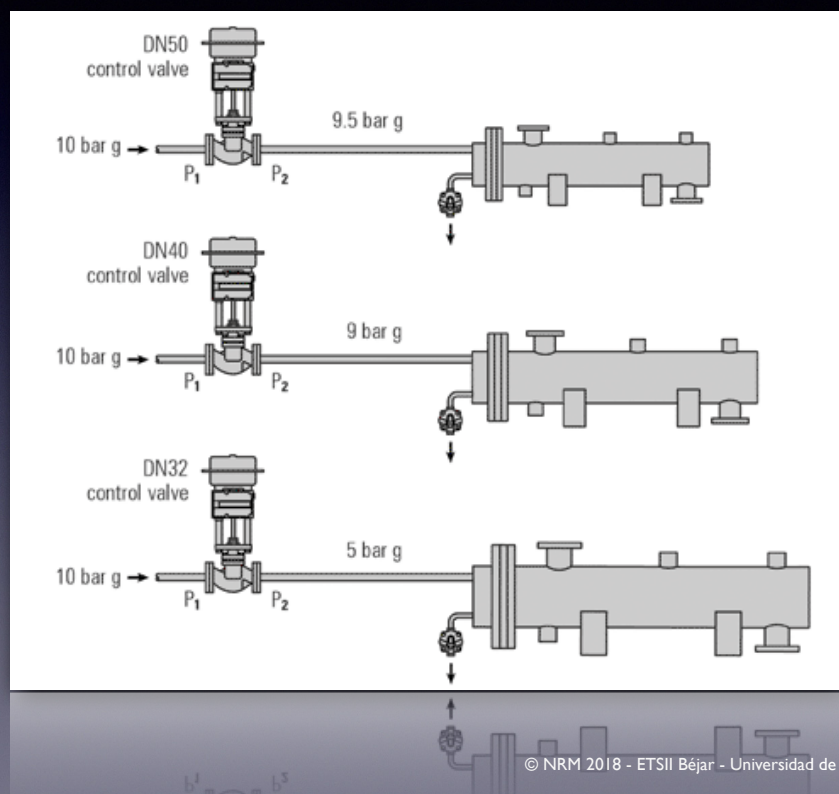
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Válvulas para vapor saturado

Diferentes tamaños de intercambiador requeridos por válvulas de diferente calibre para un mismo flujo másico



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

## Válvulas de control

### Selección de una válvula de control

#### Compromiso entre

- Pérdida de carga de la válvula en torno al punto de trabajo
- Amplio rango de regulación para controlar finamente el caudal



#### Válvula demasiado grande:

(Ej: solo 10% de pérdida de carga dando ya el caudal necesario)

#### Problemas:

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

# 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:

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

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

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

# 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;  $Q_n=500$  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  $P_2$  (\*)

(\*) Del vapor saturado solo puede aprovecharse la entalpía  $h_{fg}$ , que es la disponible hasta que el vapor cediendo su calor condensa completamente

# Optimización del uso del vapor (I)

Válvulas de control

Selección de una válvula de control

Condiciones de entrada

$$h_1 = 2697.15 \text{ kJ/kg}$$

Ejemplo:

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

-  $P_2$ : 5 bar a;  $Q_n=500$  kW

Entalpía disponible en el vapor húmedo

Entradas	
Salida	<input checked="" type="radio"/> valor individual <input type="radio"/> tabla
Presión de Saturación	10 bar absoluto
Título	96 %
<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="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
Entalpía Específica del Vapor Húmedo ( $h$ )	2697.15 kJ/kg

# 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 en (1), 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	5	bar absoluto
Salida			
Presión			
Temperatura de Saturación	151.866	°C	
Entalpía Específica del Agua ( $h_f$ )	640.418	kJ/kg	
Entalpía Específica de Evaporación ( $h_{fg}$ )	2108.23	kJ/kg	
Entalpía Específica del Vapor ( $h_g$ ) ( $h_g$ )	2748.65	kJ/kg	
Entalpía Específica del Vapor ( $h_g$ ) ( $h_g$ )	2748.65	kJ/kg	
Entalpía Específica del Vapor ( $h_g$ ) ( $h_g$ )	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

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

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

© 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)

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

Coefficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

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

Ejemplo:

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

Se comprueba la velocidad del vapor:

Sección libre de la válvula = 4.9 cm<sup>2</sup>

Control valve size	Outlet areas (m <sup>2</sup> )
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

© 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)

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

Coficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

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

Ejemplo:

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

Se comprueba la velocidad del vapor:

$$\text{Sección libre de la válvula} = 4.9 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen específico del vapor en (2)} = 0.3674 \text{ m}^3/\text{kg}$$

© 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 (1)

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

Condiciones de salida (2)

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

Coficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

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

Se comprueba la velocidad del vapor:

$$\text{Sección libre de la válvula} = 4.9 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen específico del vapor en (2)} = 0.3674 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Flujo volumétrico} = \dot{m}_s v_{fg} =$$

$$= 871 (\text{kg/h}) \cdot 0.3674 (\text{m}^3/\text{kg}) =$$

$$= 320 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidad de salida} = \frac{\text{Flujo volumétrico}}{\text{Área de salida}} =$$

$$= \frac{320 (\text{m}^3/\text{h})}{4.9 (\text{cm}^2)} \cdot 10^4 \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2} \right) \frac{1}{3600} \left( \frac{\text{h}}{\text{s}} \right) =$$

$$= 181 \text{ m/s}$$

© 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)

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

Coefficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Se selecciona inicialmente una válvula

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

La velocidad del vapor HÚMEDO a la salida es excesiva (recomendable hasta 40 m/s ó 200 m/s vapor seco)

Problemas:

- Ruido inaceptable
- Erosión prematura a la salida

Solución:

Aumentar el calibre de la válvula

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

# 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)

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

Coefficiente 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 <sup>2</sup> )
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

# 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)

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

Coefficiente de la válvula

$$K_v = 7.26$$

Válvula seleccionada:

DN65 (2½") con  $K_{vs} = 10$

Solución preferible:

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

Razones:

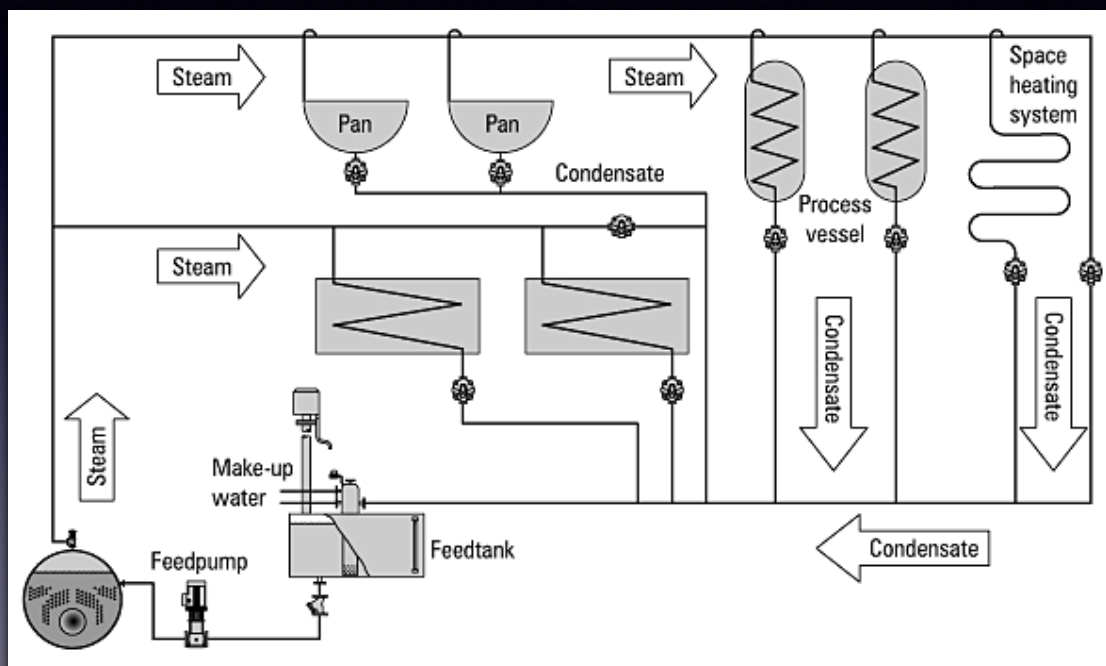
- Mejor recorrido de regulación
- Pasará vapor seco: menor erosión
- El agua líquida introduce ineficiencias en la transferencia de calor
- El separador no es más caro que la diferencia de coste entre ambas válvulas

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

## Sistemas de distribución

Sencillo sistema típico de distribución de vapor



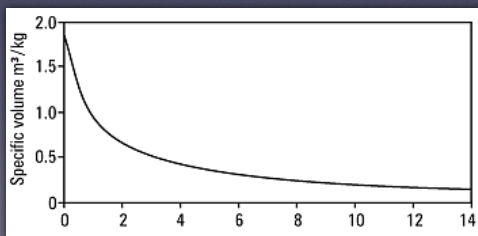
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Presión de trabajo

Volumen específico del vapor saturado en función de la presión



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

# Optimización del uso del vapor (I)

Sistemas de distribución

Reducción de la presión

Componentes:

Separador de vapor

Llaves separadoras primaria y secundaria

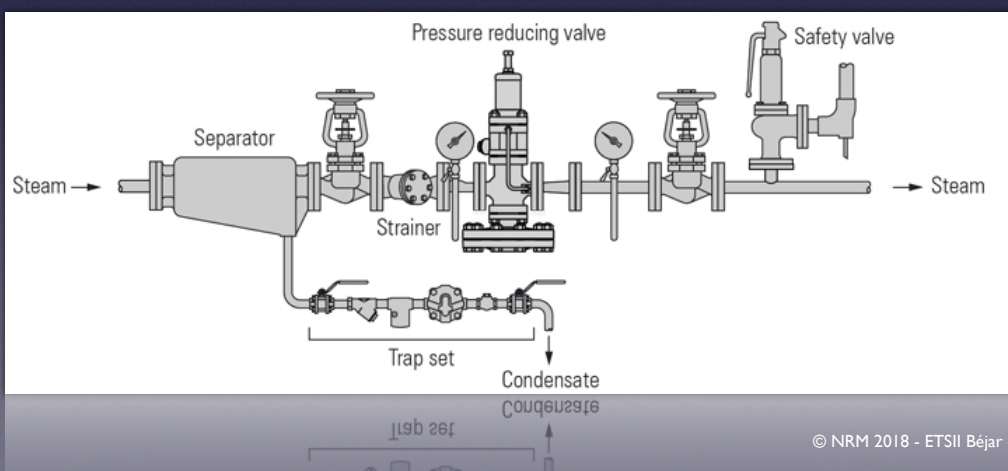
Filtro (*strainer*)

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

# 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

# Optimización del uso del vapor (I)

## Sistemas de distribución

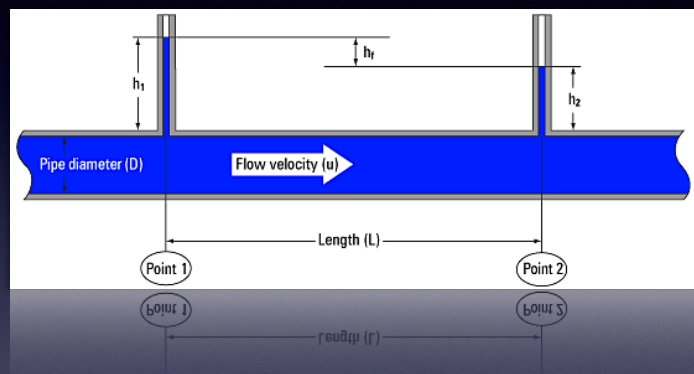
### Conducciones

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

# 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:

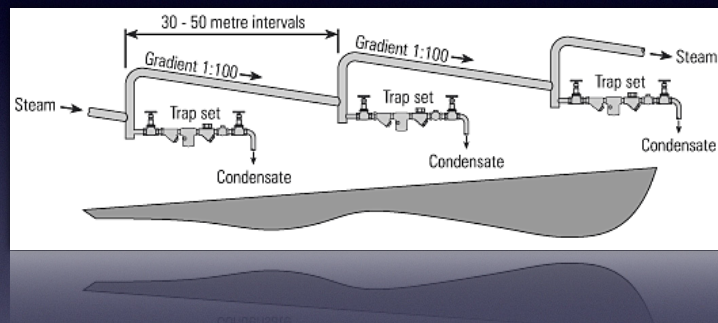
- Mayores pérdidas de carga: menor presión disponible para el proceso
- Riesgo de falta de caudal: insuficiente potencia suministrada
- Riesgo de mal funcionamiento por superior velocidad del vapor:
  - Incremento de ruidos
  - Erosión y envejecimiento prematuros
- Riesgo de rotura por golpe de ariete

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

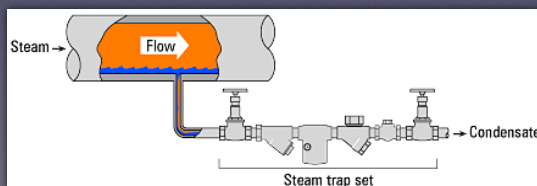
## Purgadores de condensados

### Típica instalación de la conducción principal

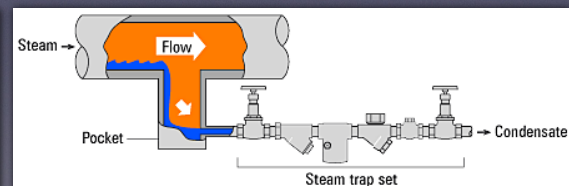


### Puntos de drenaje de condensados

#### Demasiado pequeño



#### Tamaño correcto

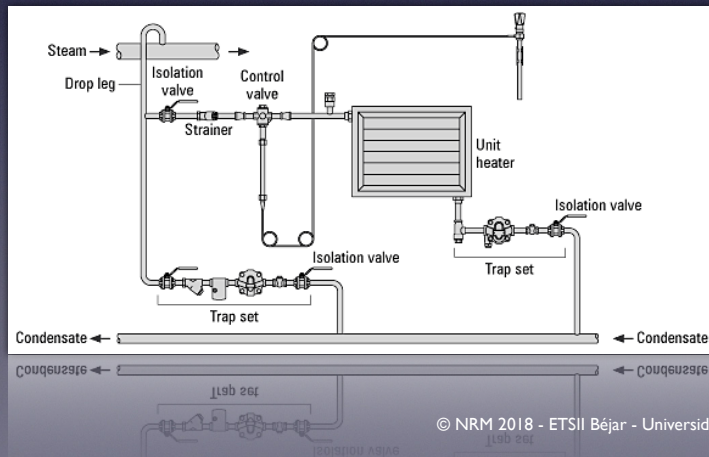
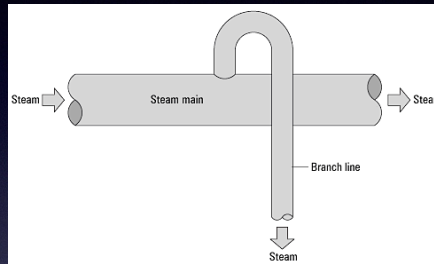
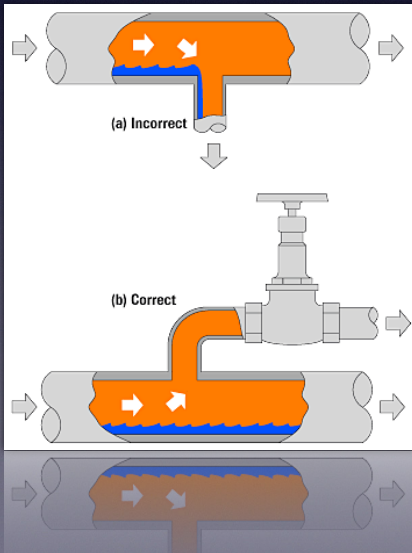


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Purgadores de condensados

Instalación de derivaciones

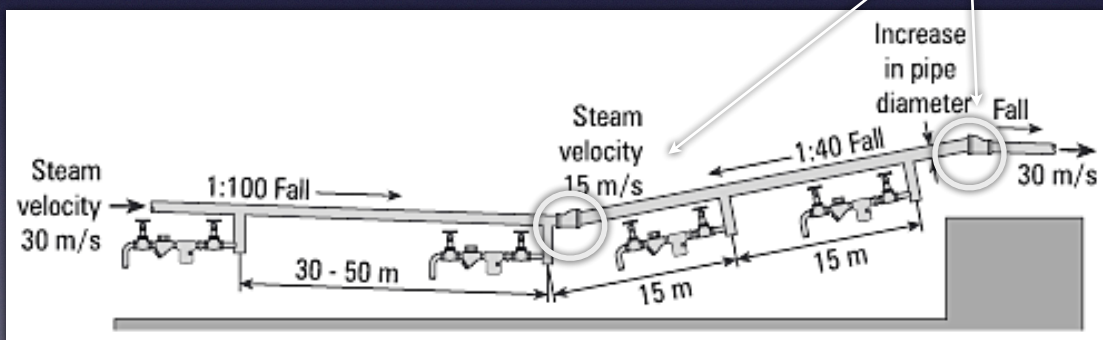
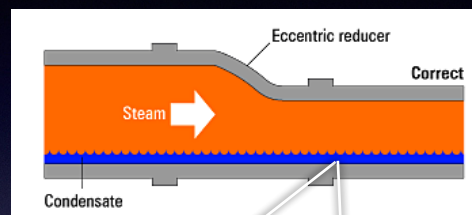


© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Purgadores de condensados

Instalación de tramos ascendentes



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

Purgadores de condensados

Tipos de purgadores



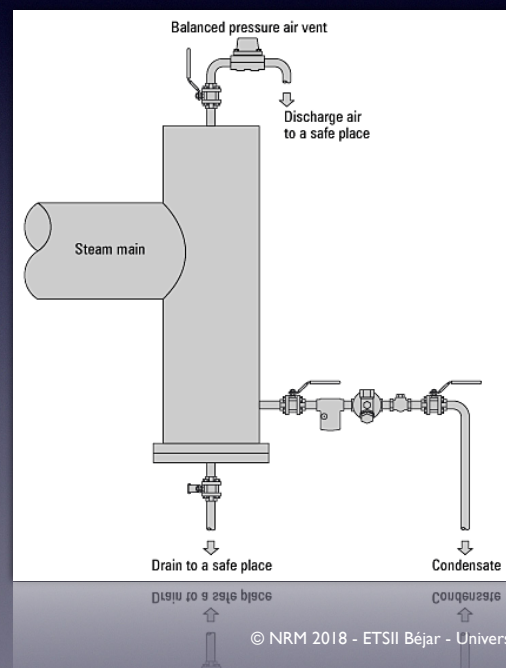
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# 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
  - Aisla en los intercambiadores
- Ubicaciones:
  - Al final de conducciones principales
  - En intercambiadores
  - Junto algunos purgadores
  - En lugares *difíciles*



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

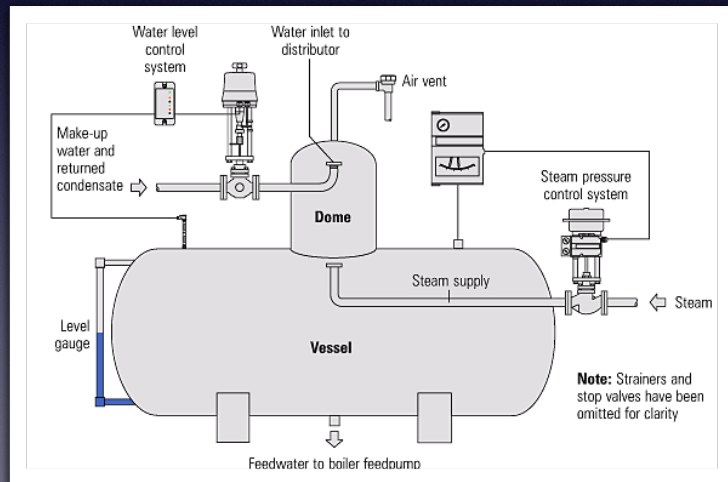
# Optimización del uso del vapor (I)

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

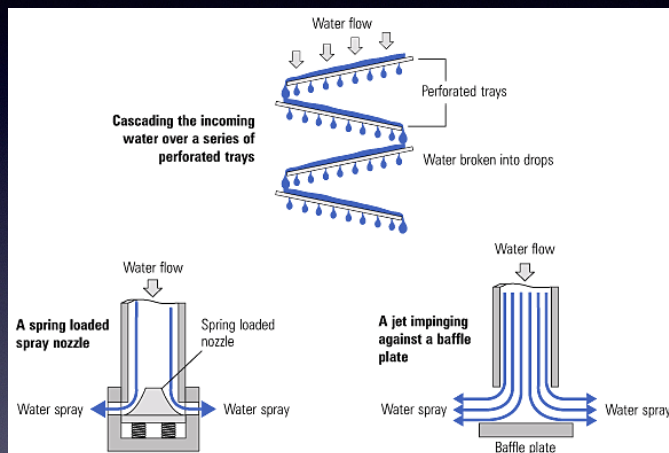
# Optimización del uso del vapor (I)

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

# 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

# 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

# Optimización del uso del vapor (I)

Equipos accesorios

Aislamiento

Pérdidas de calor en W/m de conducciones no aisladas

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

Temperatura ambiente 10 - 21°C  
Tubos horizontales  
Sin viento

© 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



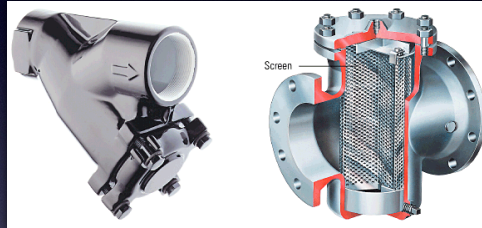
Temperature difference steam to air °C	Pipe size (DN)									
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
60	60	72	88	111	125	145	172	210	250	351
70	72	87	106	132	147	177	209	253	311	432
80	86	104	125	155	174	212	248	298	376	519
90	100	121	146	180	203	248	291	347	443	610
100	116	140	169	207	233	287	336	400	514	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

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (I)

## Equipos accesorios

### Filtros de rejilla



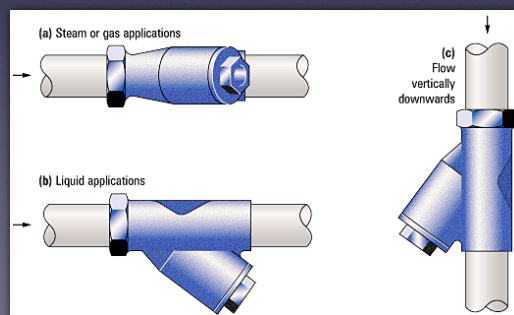
Filtro en Y

Filtro de cesta



Variantes

### Para partículas visibles



Métodos de instalación correctos según el fluido a filtrar

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Vapor en la industria

## 1. 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

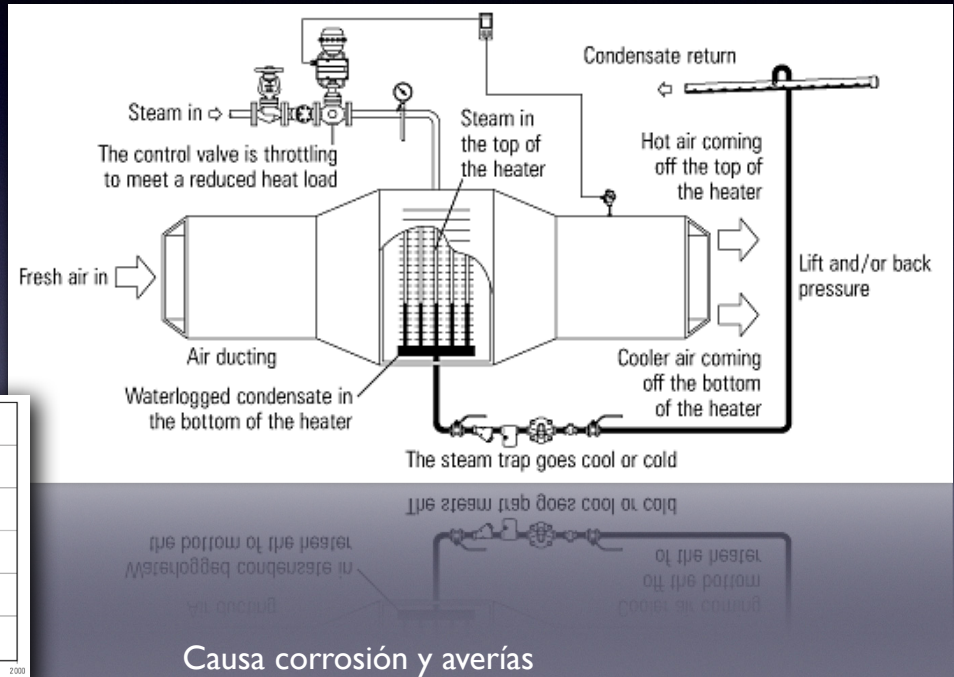
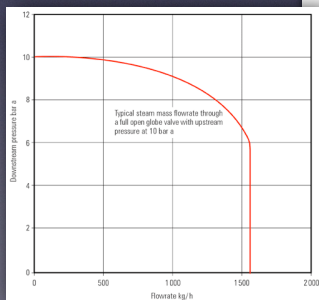
© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# 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)



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# Optimización del uso del vapor (II)

Tratamiento de condensados

Evitar retenciones (stall)

Ejemplo:

Calentador de agua

Plena carga (nominal):

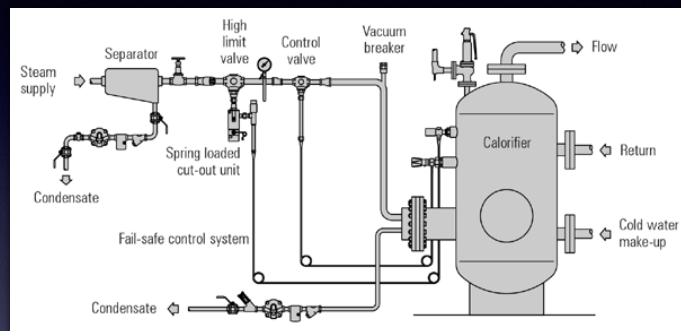
Caliente agua de 40 a 60°C ( $\Delta T=20^\circ\text{C}$ )

Vapor a 1 bar g (120°C)

Carga a 2/3 nominal:

Caliente 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

# 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:

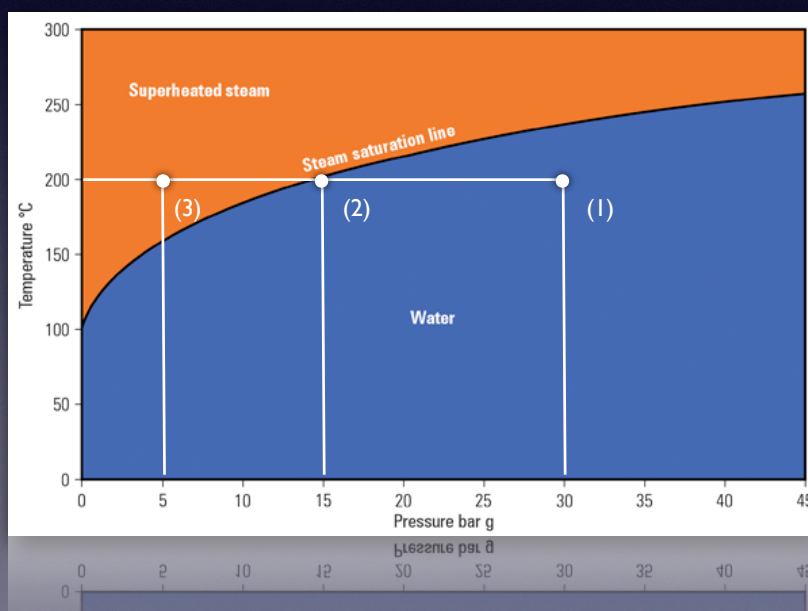
- Partes de la instalación a menos de 100°C
- Cargas muy variables
- Aparatos funcionando a bajas potencias
- Equipos delicados

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

# 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 g y 200°C

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

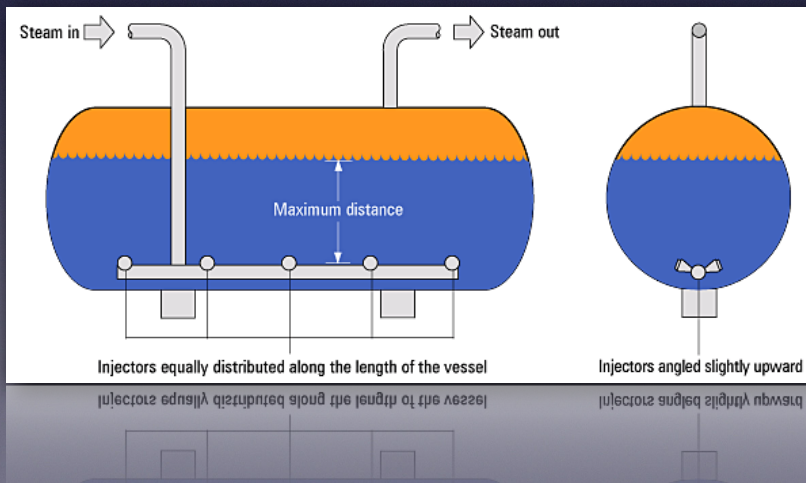
# Optimización del uso del vapor (II)

Almacenamiento de calor

Agua presurizada

Tanque de almacenamiento

Inyectores de vapor



© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

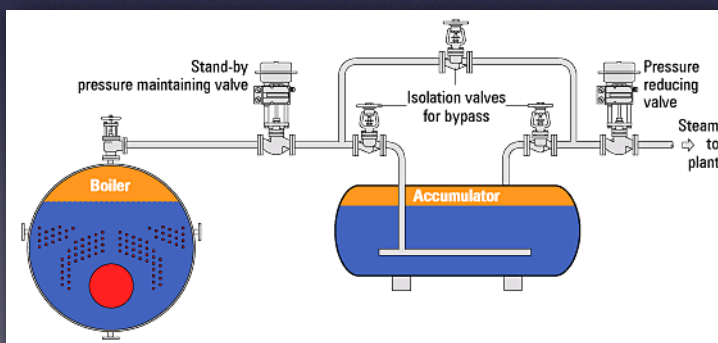
# Optimización del uso del vapor (II)

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

# Vapor en la industria

## 1. 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