



**Santa Fe**

PROVINCIA

Secretaría de Energía de Santa Fe

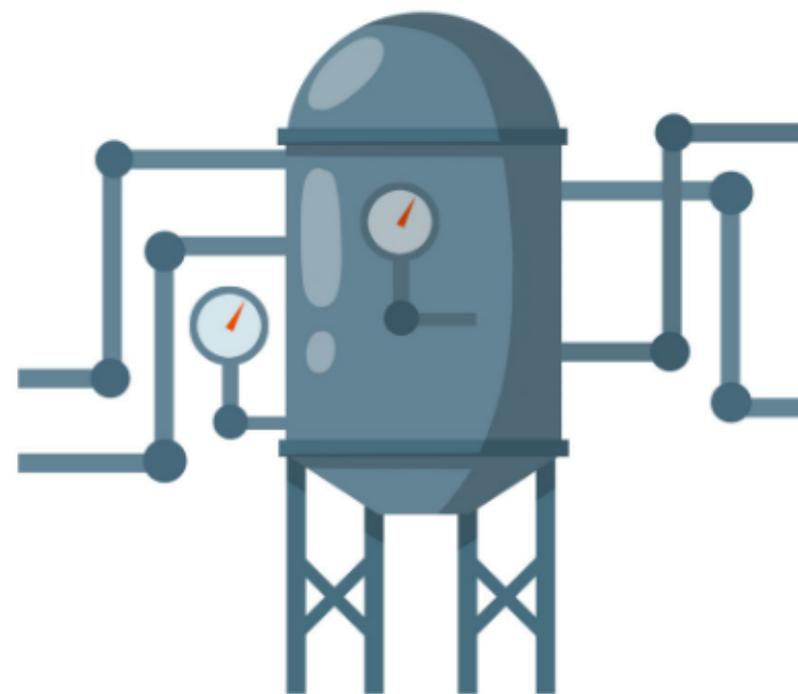
Módulo E

# Sistemas de Vapor y Cogeneración

Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética

Dirección Provincial de Eficiencia Energética

Formación y Actualización de «Gestores Energéticos para la Industria», edición 2024



# CONTENIDO

## H.1. INTRODUCCIÓN

Rol del vapor en la matriz energética de la industria. Definiciones y principios básicos. Calor directo vs indirecto. Componentes de un sistema de vapor.

## H.2. GENERACIÓN

Calderas: generalidades y cálculo de eficiencia. BFW: generalidades, requerimientos e inconvenientes. Generación de vapor con corrientes de proceso.

## H.3. DISTRIBUCIÓN

Turbinas. Características de la distribución: redes y trampas de vapor. Fugas y venteos. Aislamientos. Laminaciones.

## H.4. CONSUMOS

Usos del vapor. Reboilers. Vapor de procesos. Recuperación de condensado. Modelado de redes.

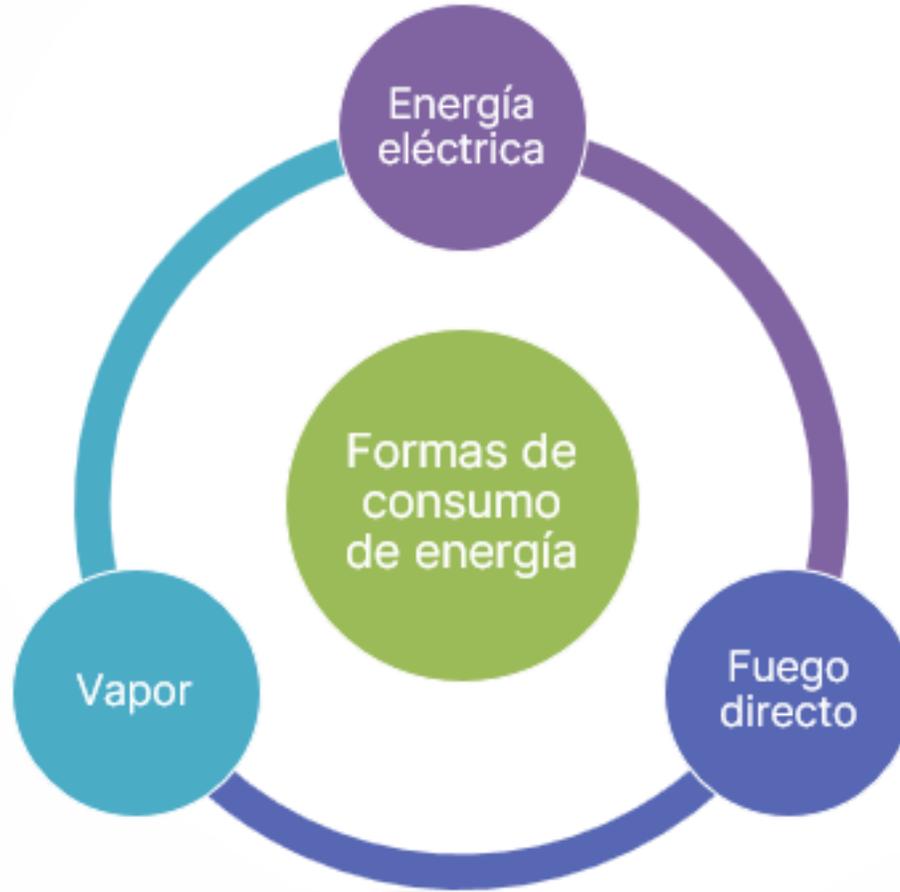
## H.5 COGENERACIÓN

Introducción y definiciones. Esquemas de generación de vapor y electricidad. Calidad de un sistema de cogeneración. Potencial a cogenerar. Aplicaciones. Equipos principales.

# H.1. DEFINICIONES

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.1. Rol del vapor en la matriz energética industrial



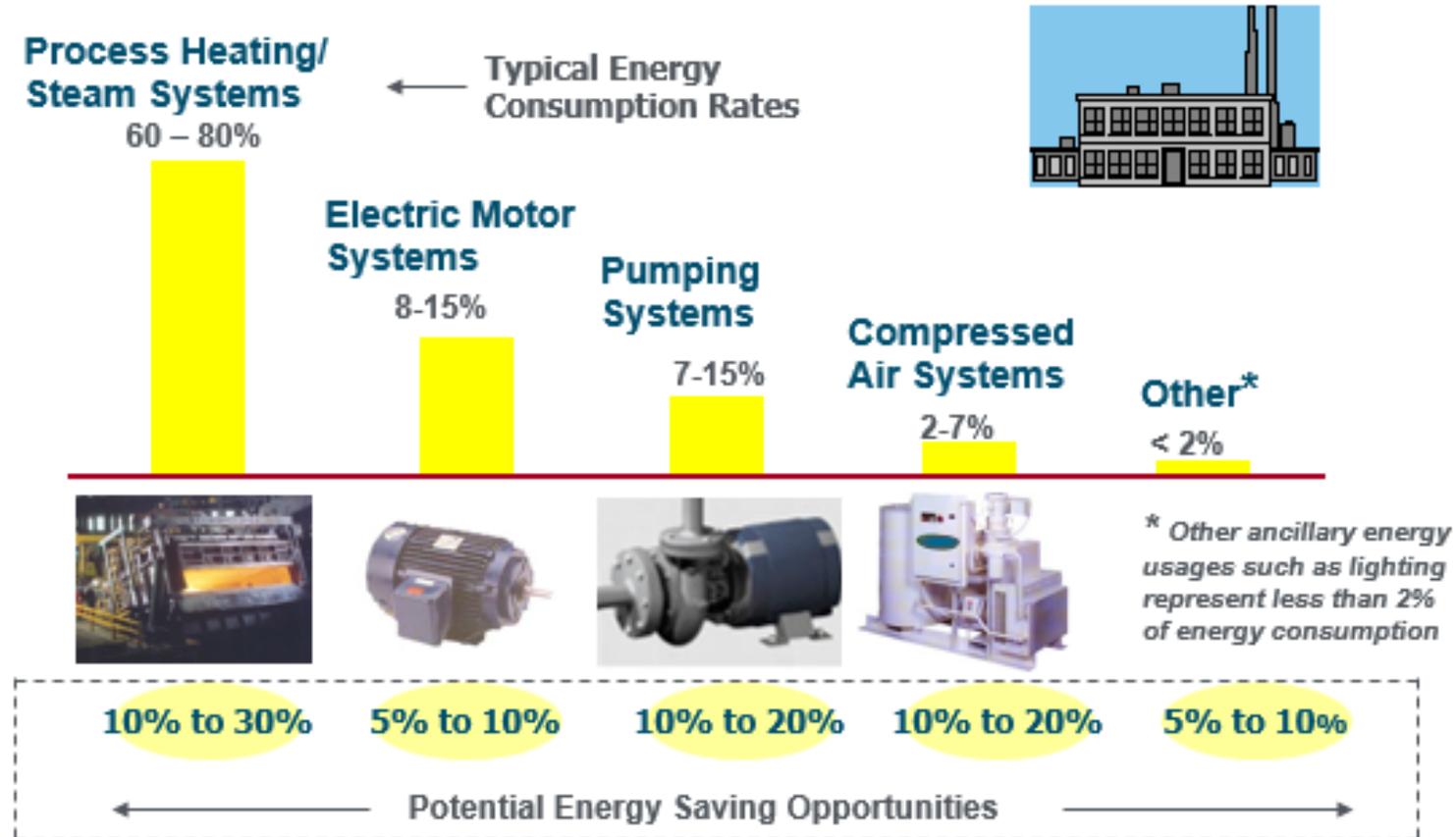
# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.1. Rol del vapor en la matriz energética industrial



# H.1. INTRODUCCIÓN

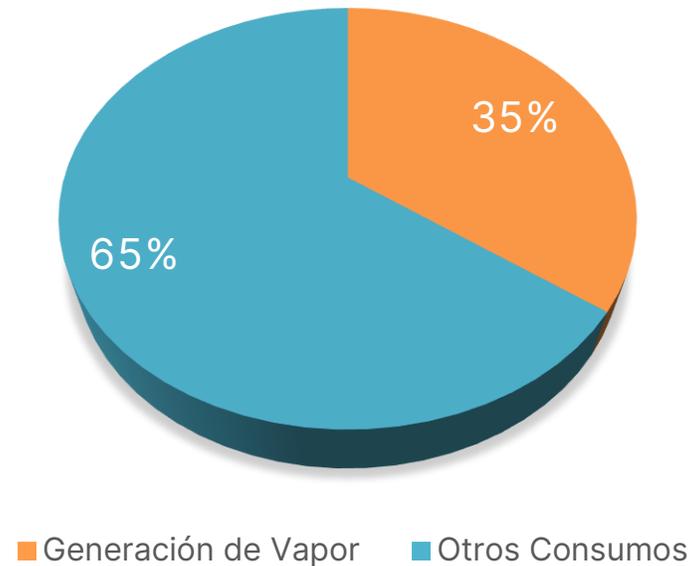
## H.1.1. Rol del vapor en la matriz energética industrial



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.1. Rol del vapor en la matriz energética industrial

### Consumo mundial de energía en la industria

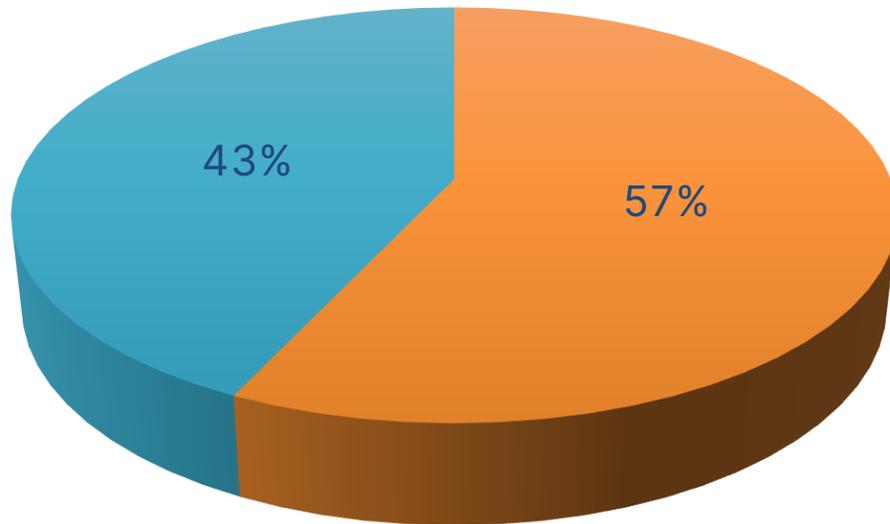


*Fuente: Office of Industrial Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. D.O.E.*

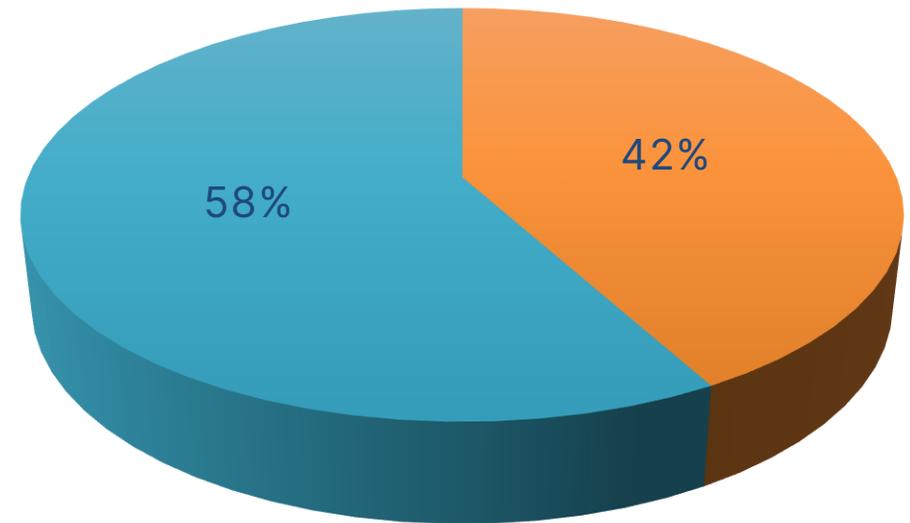
# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.1. Rol del vapor en la matriz energética industrial

### Consumo mundial de energía en la industria química



### Consumo mundial de energía en la industria de refinación



Fuente: Office of Industrial Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. D.O.E.

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.1. Rol del vapor en la matriz energética industrial



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

- ✓ El *vapor* es un *estado* en el cual se puede encontrar un fluido.
- ✓ *Hay muchos fluidos* o sustancias que pueden encontrarse *en estado vapor* (agua, amoníaco, refrigerantes – R134a, R22, entre otros –, CO<sub>2</sub>).
- ✓ A los fines de esta sección del curso, nos interesa el *AGUA* como fluido termodinámico. Así, la atención estará puesta en el proceso de cambio de fase de líquido a vapor (evaporación) y su inverso, (condensación).

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

### ¿CÓMO SE OBTIENE?

Al añadir calor al agua, en estado líquido, su temperatura aumenta hasta alcanzar un valor llamado *temperatura de saturación*.

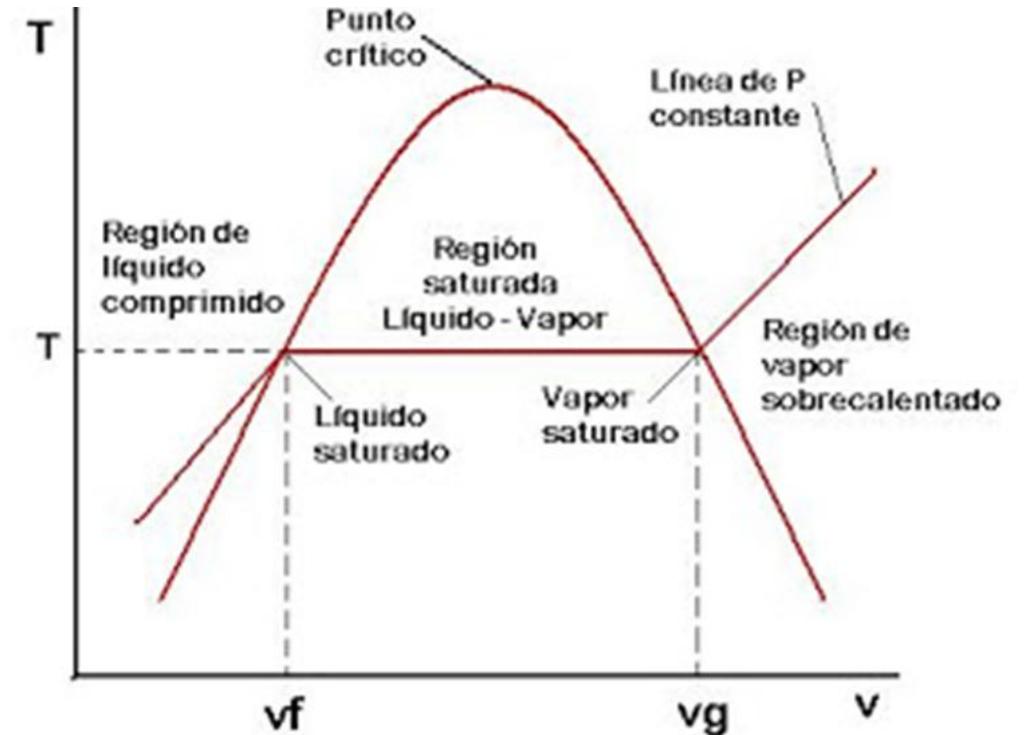
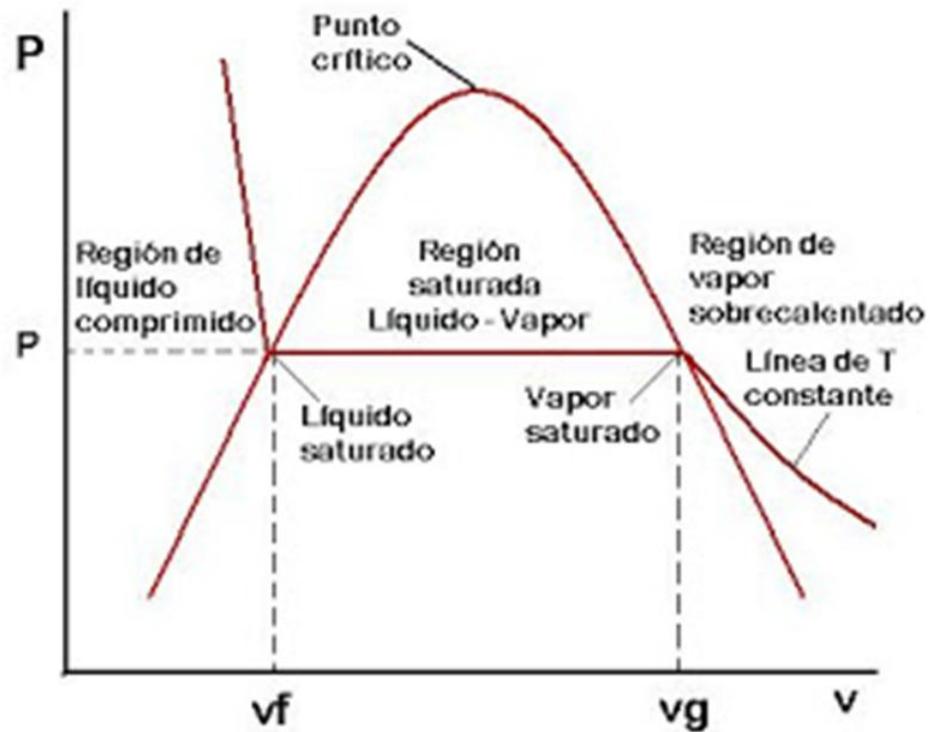
Un aporte de energía adicional, hará que el agua hierva y se convierta en vapor (húmedo). La evaporación requiere una cantidad importante de energía y, mientras se está produciendo, el agua y el vapor formado tienen la misma temperatura.

Cuando el agua líquida se transforma totalmente en vapor, se obtiene **vapor saturado**. Un aporte de energía adicional, hará que el vapor saturado se sobrecaliente y su temperatura aumente.

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

¿CÓMO SE OBTIENE?

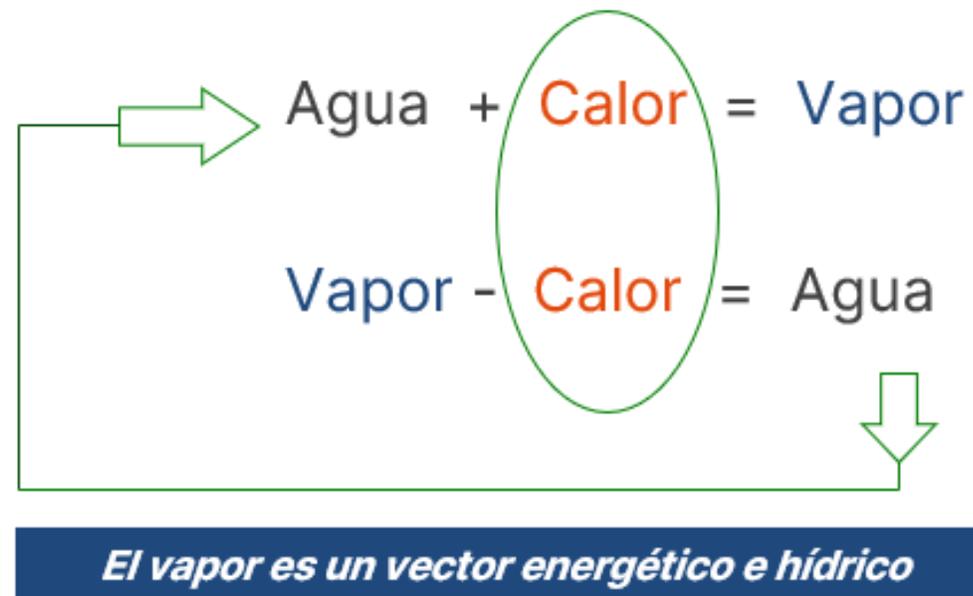


# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

¿PARA QUÉ SE USA?

Después de utilizarse como fuerza motriz, se descubrió que el vapor también era muy eficaz como medio de transferencia de energía calorífica.



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

### TABLAS DE VALORES

Presión manom. [bar]	Presión absoluta [bar]	Temp [°C]	<b>ENTALPIA ESPECIFICA</b>			Volumen específico [m³/kg]
			Agua [kJ/kg]	Evaporación [kJ/kg]	Total [kJ/kg]	
0	1	100	419	2257	2676	1.673
1	2	120.42	506	2201	2707	0.881
2	3	133.69	562	2163	2725	0.603
3	4	143.75	605	2133	2738	0.461
4	5	151.96	641	2108	2749	0.374
5	6	158.92	671	2086	2757	0.315
6	7	165.04	697	2066	2763	0.272
7	8	170.5	721	2048	2769	0.24

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

### CALIDAD DE UN VAPOR

#### ➤ VAPOR SATURADO

- No contiene gotas de agua líquida.

#### ➤ VAPOR HÚMEDO

- Contiene gotas de agua.
- Aumenta la erosión y reduce la transferencia de calor.

#### ➤ VAPOR SOBRECALENTADO

- Temperatura por encima del vapor saturado.
- Se utiliza habitualmente para turbinas.

*Es importante que el vapor utilizado para procesos sea lo más seco posible*

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.2. Definiciones y principios básicos

### ¿POR QUÉ SE USA?

- Para su producción se utiliza agua, que es abundante, barata y fácil de obtener.
- Es controlable, ya que a cada presión le corresponde una temperatura, una energía específica, y un volumen específico.
- Transporta cantidades de energía elevadas por unidad de masa, lo que representa menor superficie de intercambio en los procesos y menor cantidad de fluido usado.
- Es estéril y de fácil distribución y control.

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.3. Calor directo vs indirecto

### CALENTADOR DE FUEGO DIRECTO

Se usa para suministrar una cantidad de calor específica, a niveles de temperatura elevados, al fluido o material a calentar.

- Se deben evitar sobrecalentamientos.
- Es una caja aislada en la cual el calor es liberado por el quemado de un combustible es transferido a un fluido o material.

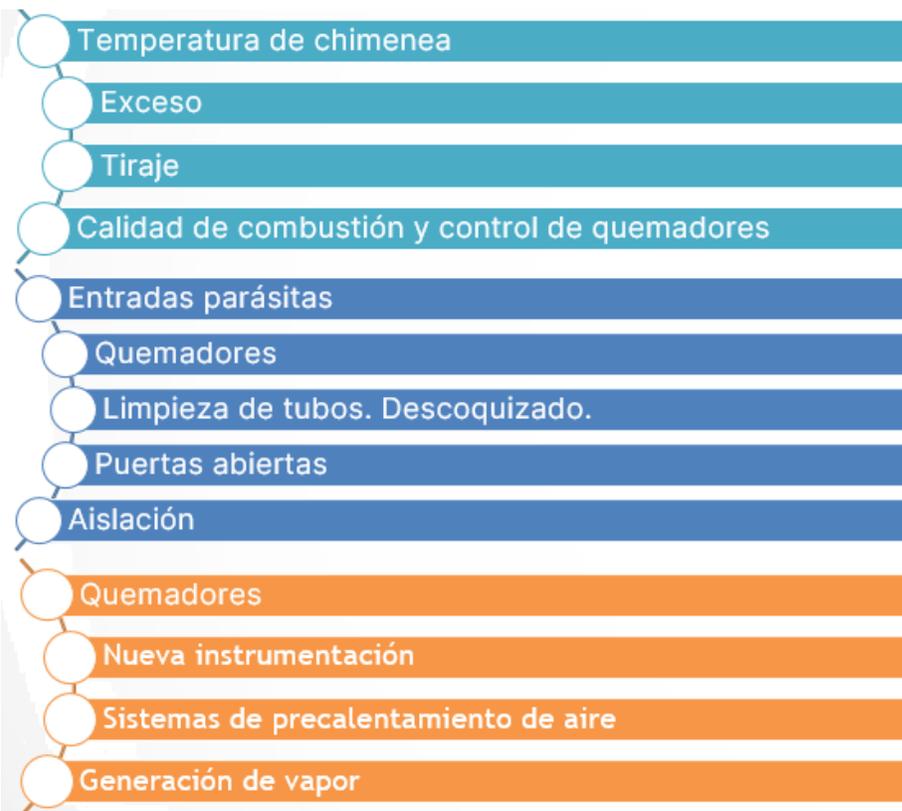


Cortesía de Sigma Thermal

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.3. Calor directo vs indirecto

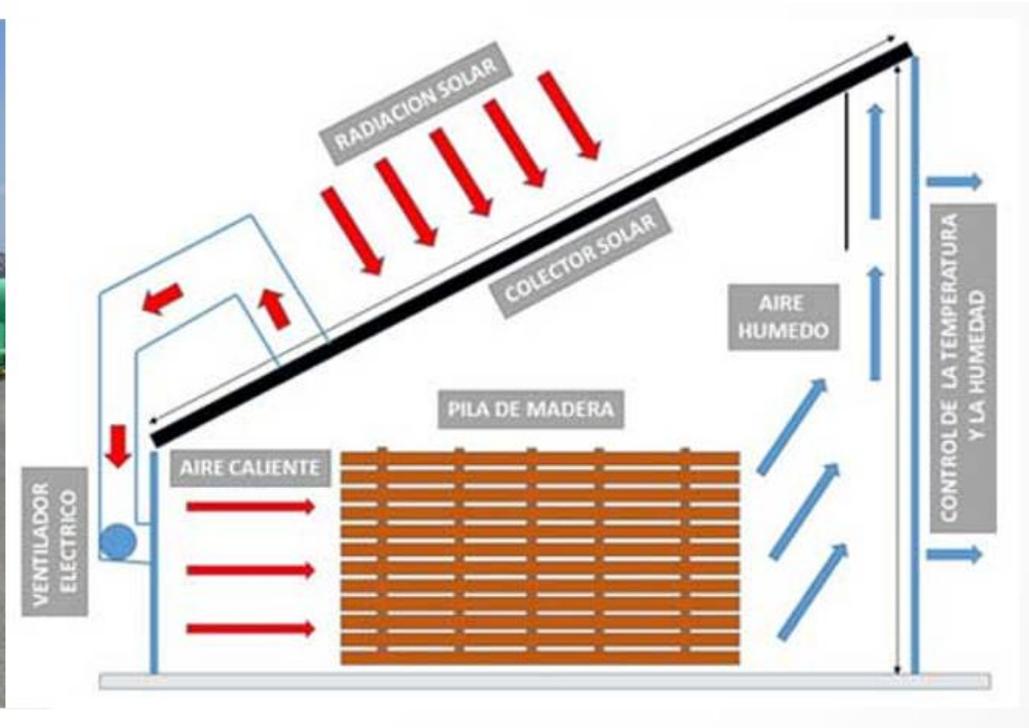
### HORNOS



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.3. Calor directo vs indirecto

### AIRE CALIENTE (SECADERO)



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.3. Calor directo vs indirecto

### CALEFACCIÓN SIMPLE



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.3. Calor directo vs indirecto

### CALEFACCIÓN SIMPLE

#### GENERACIÓN

- ✓ No se constituyen en redes, en pocos casos son arreglos de más de un generador.
- ✓ Pueden ser continuos o en batch.
- ✓ Pueden ser sistemas directos o indirectos.

#### RECEPTOR DE CALOR

- ✓ Proceso productivo (materiales).
- ✓ Sistemas de calentamiento.

**NO SE CUENTA CON UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSPORTE  
(GENERADOR Y RECEPTOR ESTÁN CONECTADOS)**

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.4. Componentes de un sistema de vapor

- Vapor
- Energía Eléctrica
- Fuel Oil
- Fuel Gas
- Agua de Enfriamiento
- Aguas de Caldera
- Condensado
- Aire de Instrumentos
- Nitrógeno
- Hidrógeno

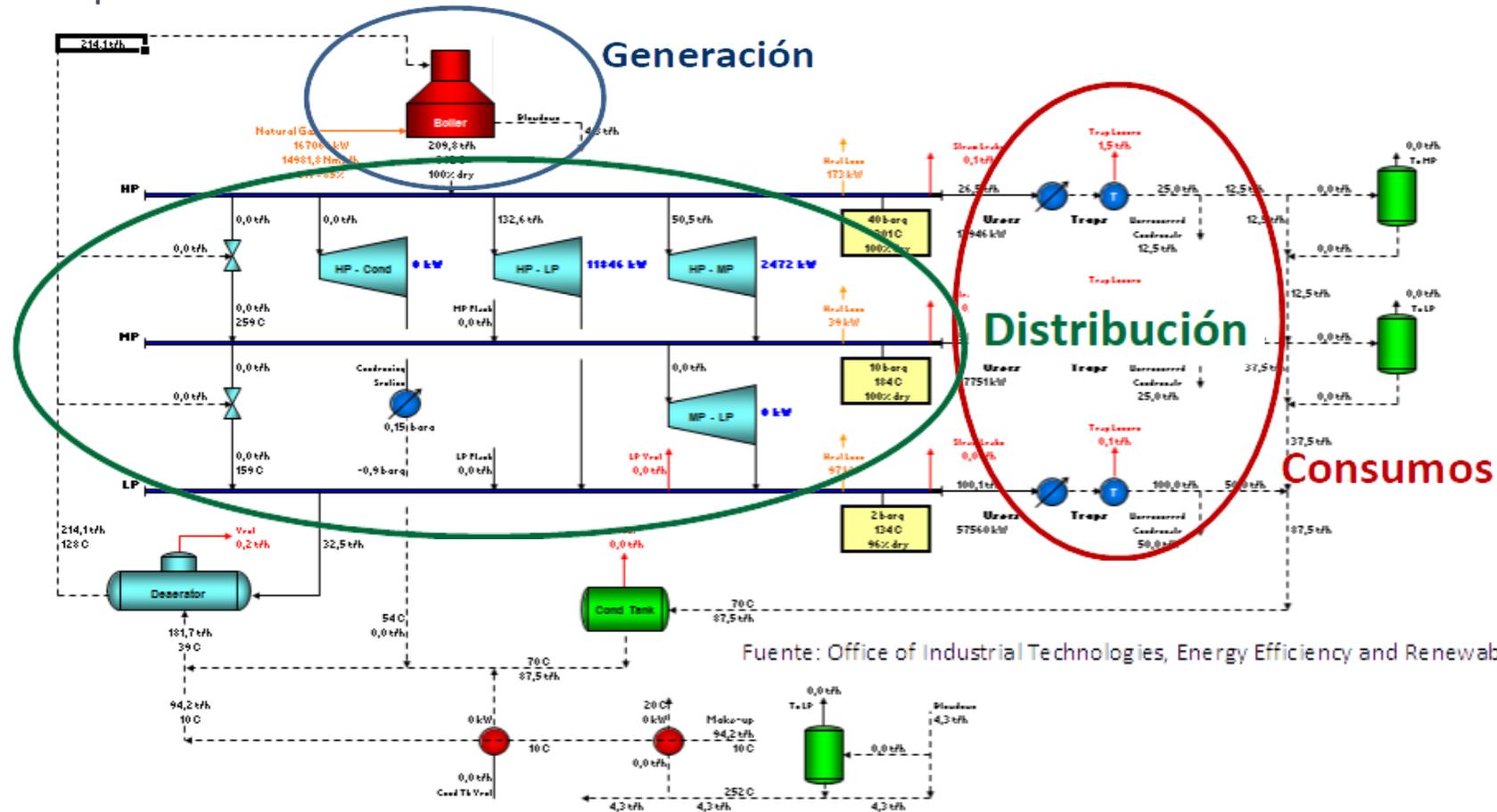
# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.4. Componentes de un sistema de vapor



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.4. Componentes de un sistema de vapor



# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.4. Componentes de un sistema de vapor

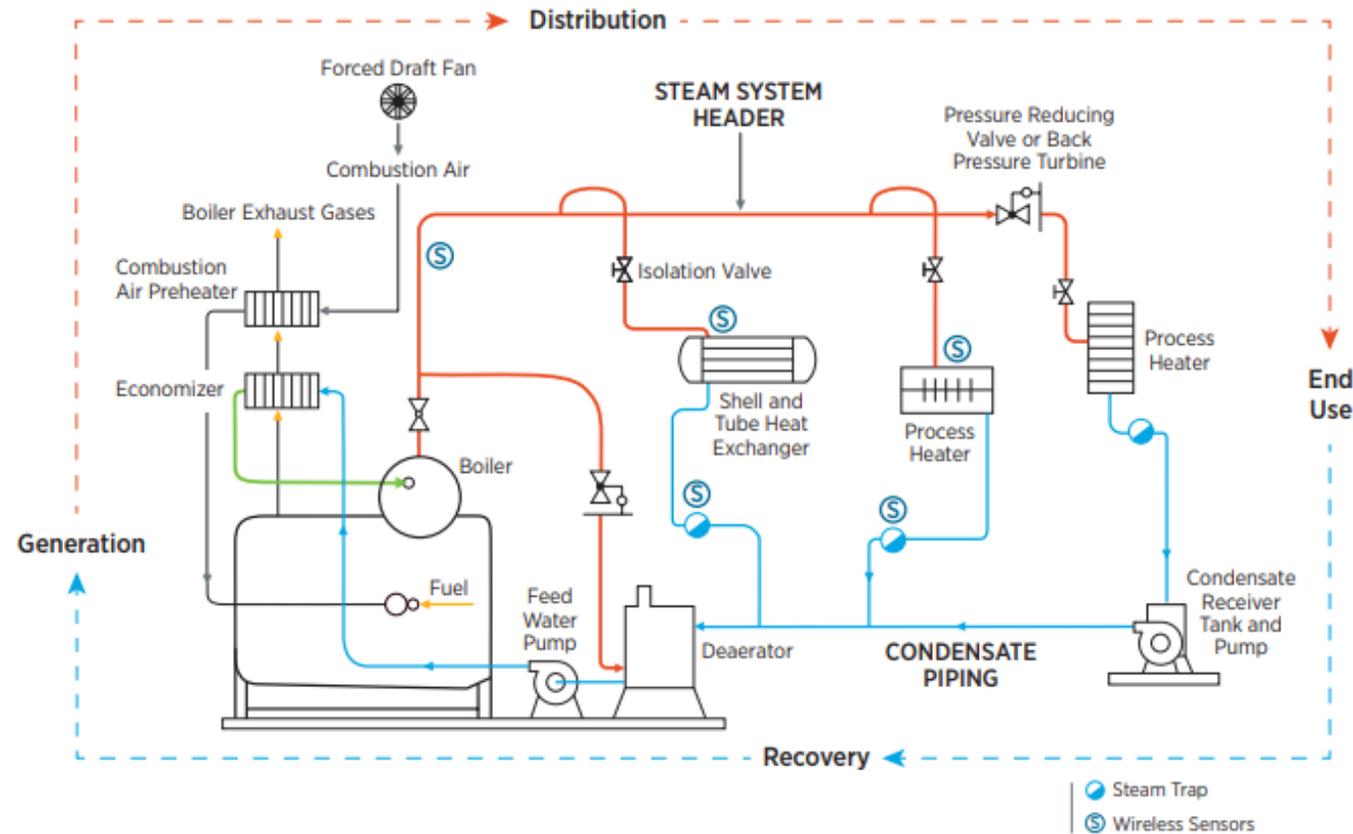


Figure 1. Steam System Schematic

Fuente: Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry (US DOE)

# H.1. INTRODUCCIÓN

## H.1.4. Componentes de un sistema de vapor: ineficiencias

Ineficiencias	Generación	Distribución	Consumos
Estructurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recuperación de calor en calderas</li> <li>- Blowdown</li> <li>- Precalentamiento de BFW</li> <li>- Calidad de BFW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilización de vapor de mayor nivel</li> <li>- Sin recuperación de condensado</li> <li>- Selección e instalación de trampas de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficiencia de intercambiadores</li> <li>- Selección del tipo de reboiler</li> <li>- Regulación del vapor de calefacción</li> </ul>
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calderas</li> <li>- Aislamientos</li> <li>- Entradas parásitas de aire</li> <li>- Fugas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aislamiento de colectores y turbinas</li> <li>- Funcionamiento de trampas de vapor</li> <li>- Fugas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensuciamiento de intercambiadores</li> <li>- Disipaciones en sistemas de calefacción</li> </ul>
Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exceso de O2</li> <li>- Blowdown</li> <li>- Venteos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Turbinas auxiliares rotando</li> <li>- Laminaciones</li> <li>- Venteos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimización de vapor de stripping</li> <li>- Regulación del vapor de calefacción</li> <li>- Exceso de vapor a antorchas</li> </ul>

# H.2. GENERACIÓN

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

- ✓ Generalidades
- ✓ Clasificaciones
  - Calderas Piro tubulares
  - Calderas Acuotubulares
  - HRSG
- ✓ Eficiencia de Calderas. Generalidades y Limitaciones
- ✓ Cálculo de Eficiencia
  - Método Directo
  - Método Indirecto

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

Las **calderas** son la parte más importante del circuito vapor, ya que en ellas **es donde se genera**. En ella se transmite la energía térmica –proveniente de la reacción de la combustión– a un fluido. Se indican algunos **condicionamientos del diseño de una caldera**:

- ✓ La energía térmica a recuperar depende de:
  - Superficies de intercambio
  - Temperatura del agua de alimentación
  - Temperatura de chimenea
- ✓ Vapor a producir: quedará determinado por la demanda de procesos o bien por la disponibilidad de calor residual a recuperar.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: clasificaciones

#### Presión de trabajo

- Calderas de Baja Presión (hasta 4 o 5 kg/cm<sup>2</sup>)
- Calderas de Media Presión (hasta 20 kg/cm<sup>2</sup>)
- Calderas de Alta Presión (desde 20 kg/cm<sup>2</sup> hasta presiones cercanas a la crítica)
- Calderas Supercríticas

#### Disposición Agua-Gases

- Humotubulares
- Acuotubulares

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: clasificaciones

#### Cantidad de vapor producido

- Calderas Chicas (hasta 1 o 2 t/h)
- Calderas Medianas (hasta 20 t/h)
- Calderas Grandes (desde 20 t/h hasta 500 – 600 t/h - acuotubulares)

#### Según el tipo de Combustible utilizado

- Calderas de Combustibles Líquidos (viscosidades desde 30-40 cSt hasta 700 cSt – industria entre 380-450 cSt)
- Calderas de Combustibles Gaseosos (pueden haber calderas duales)
- Calderas de Combustibles Sólidos (leñas, residuos, carbón, entre otros)

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: clasificaciones

#### Según la circulación de agua dentro de la caldera

- Calderas Natural (diferencia de densidades – circuito cerrado)
- Calderas Asistida (circulación natural con ayuda de bombas – circuito cerrado)
- Calderas Forzada (impulsada con bombas – circuito abierto)

#### Según el tipo de mecanismo de calor predominante

- Calderas Radiantes (convencionales – grandes calderas acuotubulares donde el hogar es la zona de mayor transferencia térmica)
- Calderas Convectivas (HRSG – recuperación de calor)
- Calderas de Calentamiento Indirecto (calientan un fluido intermediario, como un aceite térmico)

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

#### CALDERAS PIROTUBULARES

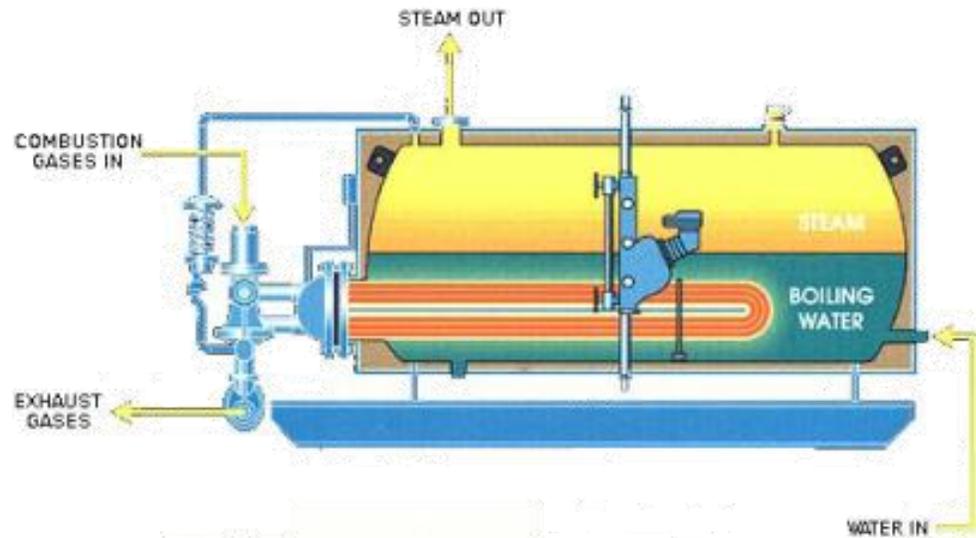
- ✓ En ella, los gases de combustión circulan por el interior de los tubos
- ✓ El agua circula por el exterior de los tubos
- ✓ Presión de vapor hasta 15 bar
- ✓ Caudales hasta 15 t/h



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

#### CALDERAS PIROTUBULARES

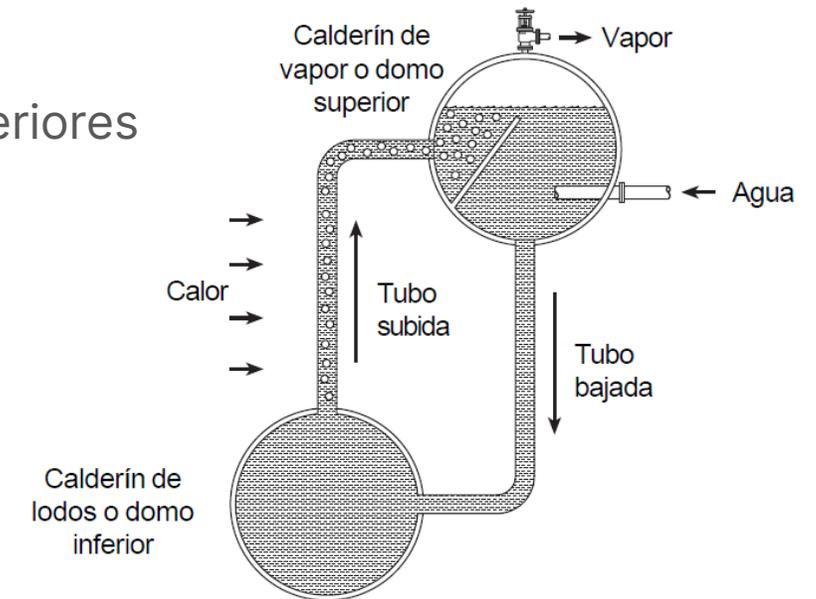


## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

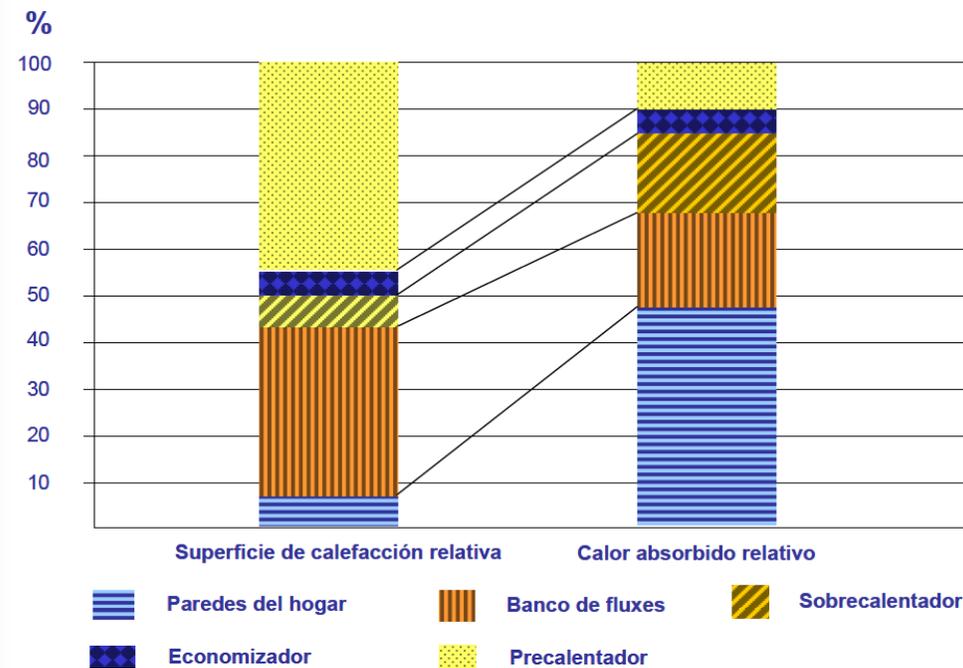
#### CALDERAS ACUOTUBULARES

- ✓ Los gases de combustión circulan por el hogar (exterior de tubos)
- ✓ El agua circula por el interior de los tubos
- ✓ Presión del vapor y caudales muy superiores a las anteriores
- ✓ Agua y gases a contracorriente



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades



## H.2. GENERACIÓN

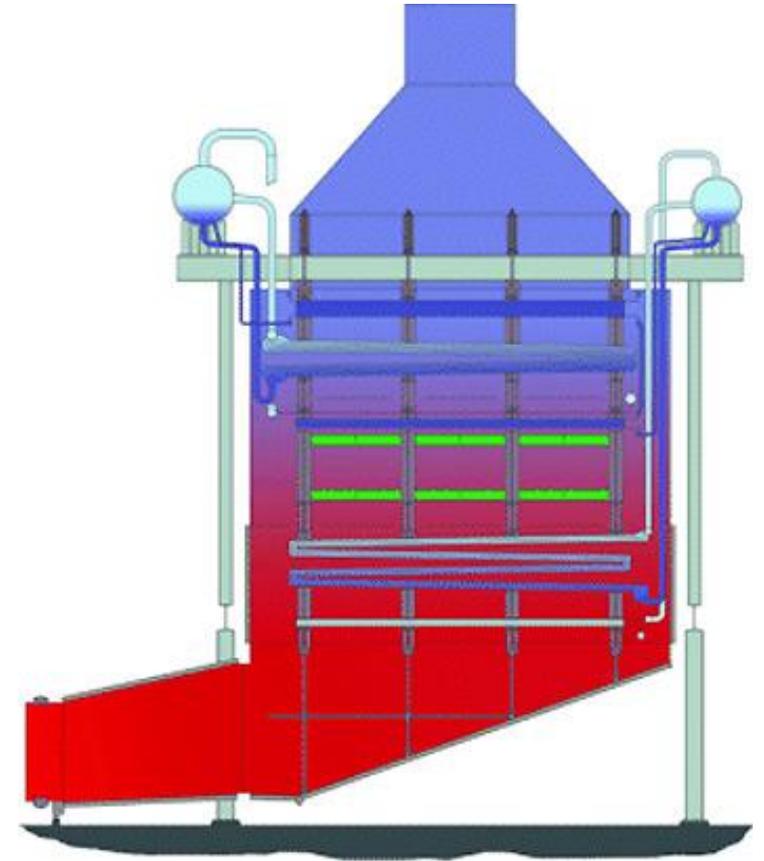
### H.2.1. Calderas: generalidades



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

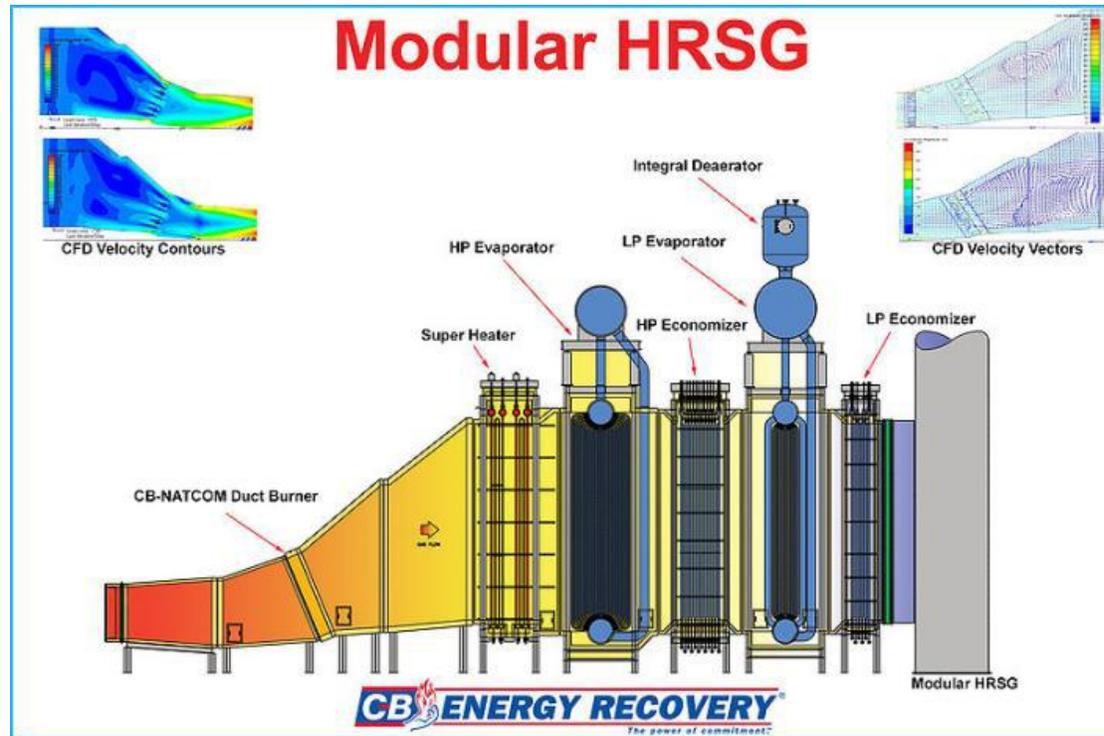
#### HRSG (*High Recovery Steam Generator*) VERTICALES



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

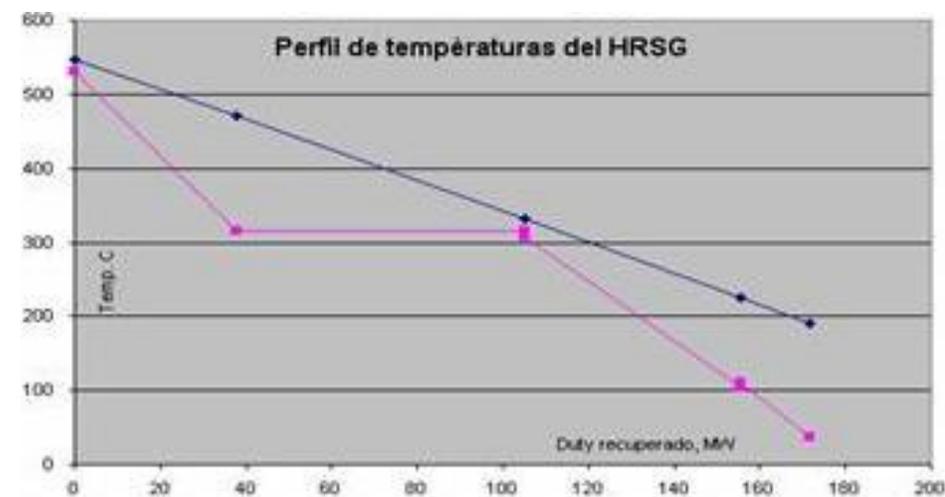
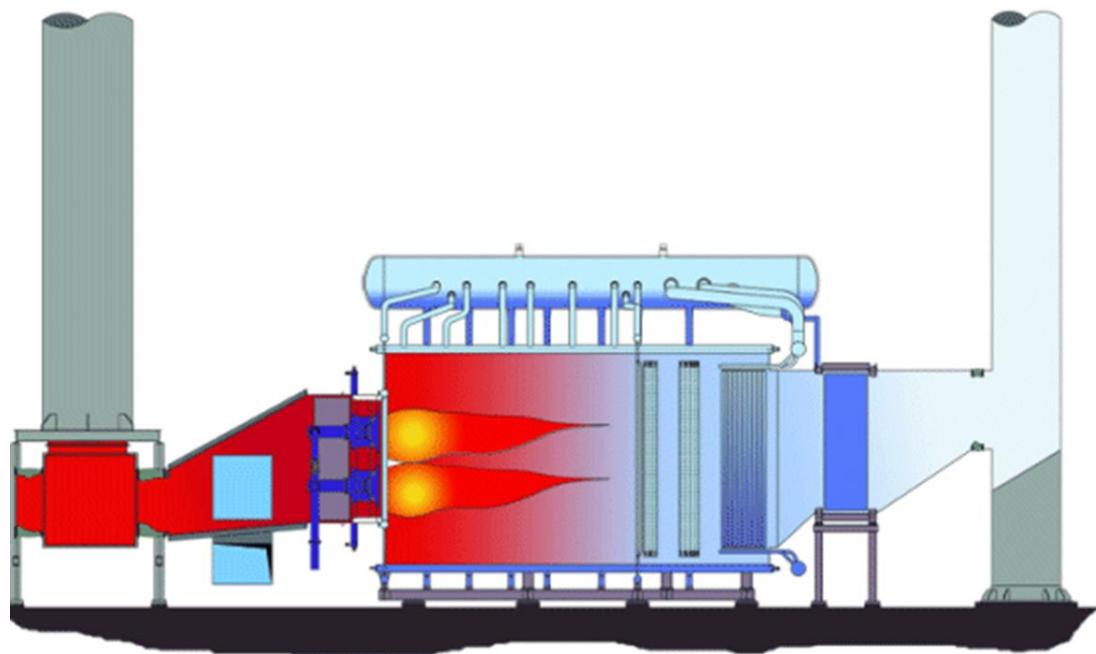
#### HRSG (*High Recovery Steam Generator*) VERTICALES



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: generalidades

#### HRSG (*High Recovery Steam Generator*) HORIZONTAL CON POST-COMBUSTIÓN



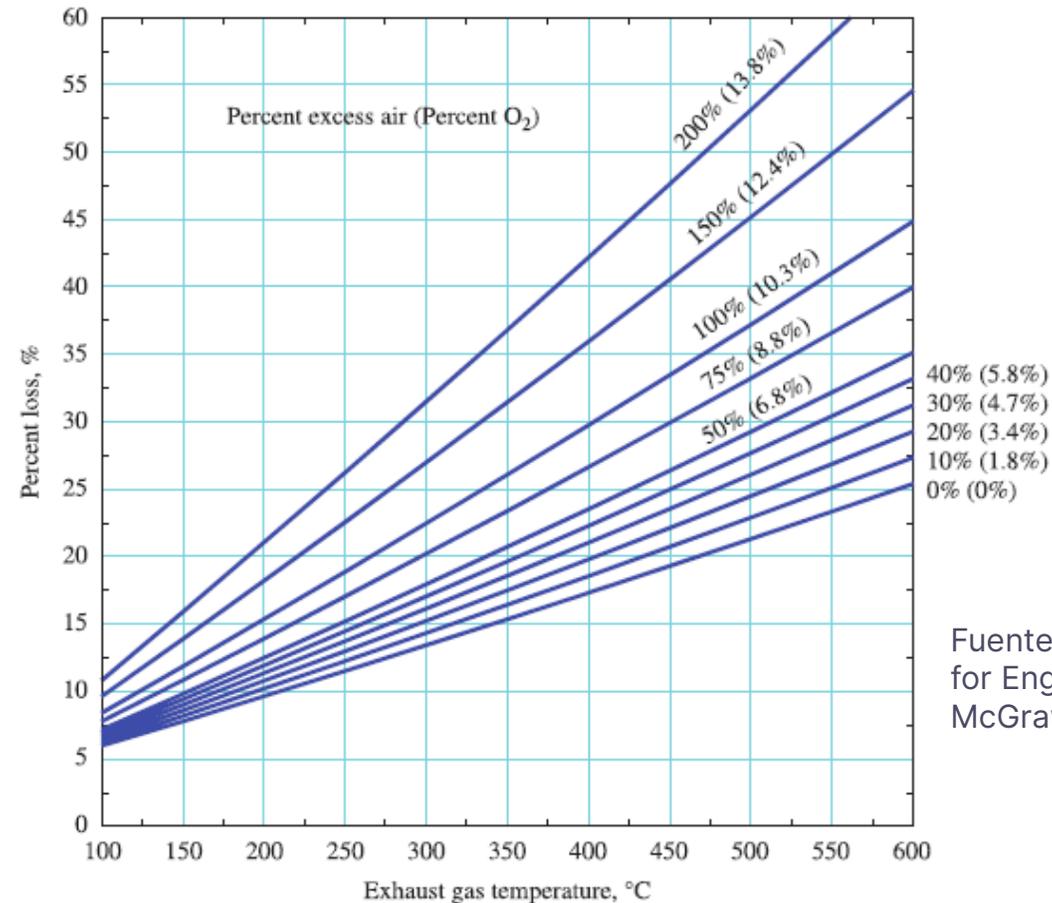
## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

	Ahorro de Combustible	Otros Beneficios
Mejoras de Control	3 %	Reducción de emisiones
Reducción de Flue Gas	2 -5 %	Reducción de emisiones
Reducción de Exceso de aire	1 % por cada 15 % de aire menos	
Mejora de Aislamiento	6 %-20 %	Calentamiento mas rápido
Mantenimiento	10 %	Reducción de emisiones
Recuperación de calor de Flue Gases (gases de escape)	1 %	
Recuperación de calor del blowdown de vapor	1.3 %	Reducción de daños a la estructura

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia



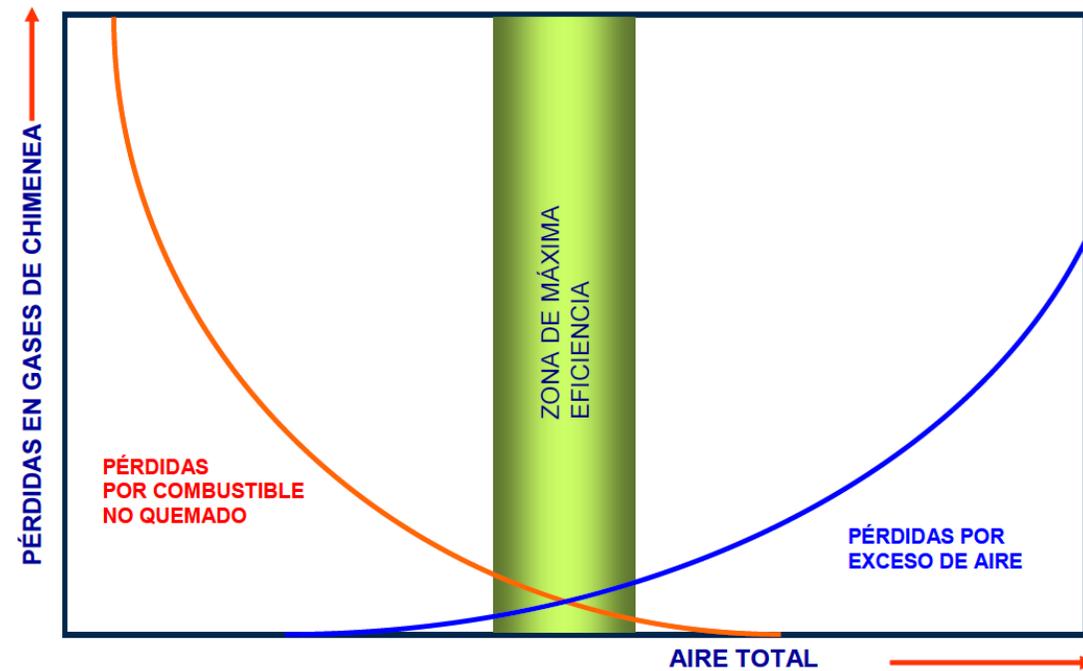
Fuente: «Energy Efficiency and Management for Engineers», de Kanoglu y Cengel, editorial McGraw-Hill, 2020

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

A la hora de incrementar la eficiencia de la caldera sus principales limitaciones son:

- ✓ Temperatura de rocío ácida
- ✓ Exceso de aire vs. inquemados



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

#### MÉTODO DIRECTO:

La eficiencia directa o rendimiento térmico se estima como la relación entre el calor transferido al fluido y el calor entregado por el combustible (ambos en la misma UT):

$$\eta_{caldera} = \frac{\dot{E}_{Vapor}}{\dot{E}_{Comb}}$$

¿Cuánto representa la mejora de un 1 % en la eficiencia de la caldera?

Asumiendo que la energía del vapor son 100 u y que la caldera trabaja con un 80 % de rendimiento:

$$\dot{E}_{Comb} = \frac{\dot{E}_{Vapor}}{\eta_{caldera}} = \frac{100 u}{0.80} = 125 u$$

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

#### MÉTODO DIRECTO:

Bajo el mismo razonamiento, manteniendo la producción de vapor e incrementando un punto la eficiencia de caldera, se tiene:

$$\dot{E}_{Comb} = \frac{\dot{E}_{Vapor}}{\eta_{caldera}} = \frac{100 u}{0.81} = 123.46 u$$

A mayor rendimiento menor consumo de combustible.

$$Ahorro = \frac{\dot{E}_{Comb (80\%)} - \dot{E}_{Comb (81\%)}}{\dot{E}_{Comb (80\%)}} * 100 = \frac{125 - 123.46}{125} * 100 = 1.2 \%$$

Una mejora del 1 % de rendimiento un ahorro de combustible mayor al 1 %.

## H.2. GENERACIÓN

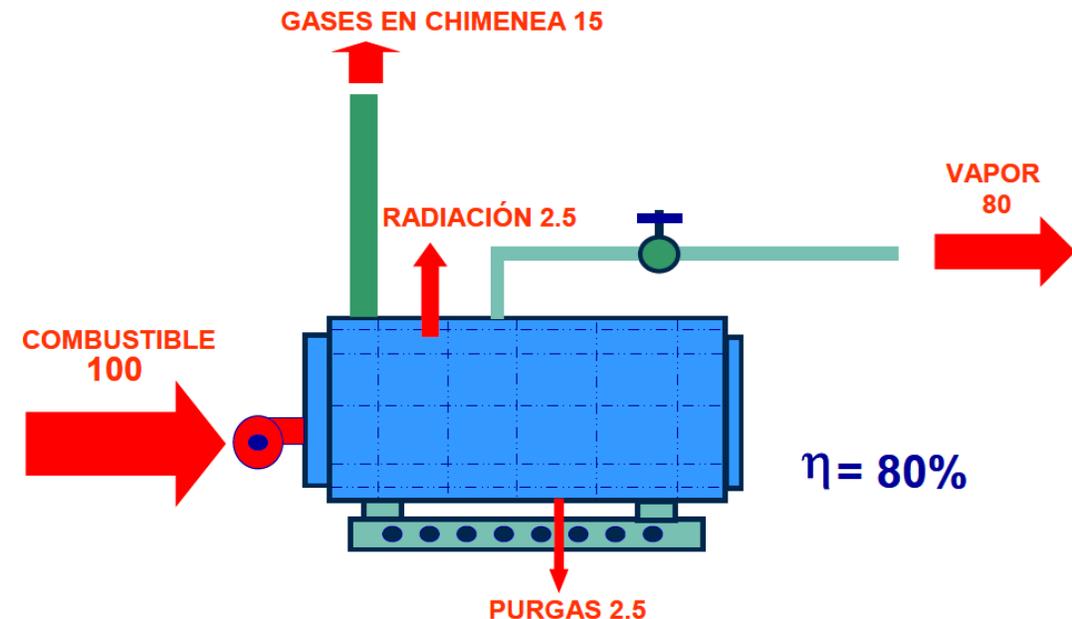
### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

#### MÉTODO INDIRECTO:

Se parte del 100 % de rendimiento y se descuentan las disipaciones por:

- ✓ Chimenea
- ✓ Carcasa
- ✓ Purgas

$$\eta_{indirecto} = 100 \% - \sum_{\text{disipaciones}} \lambda_i$$



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

#### MÉTODO INDIRECTO. DISIPACIONES POR CHIMENEA:

Las pérdidas por chimenea dependen del **exceso de oxígeno**, del **tipo de combustible** que se esté quemando y de la **temperatura de los gases de chimenea**.

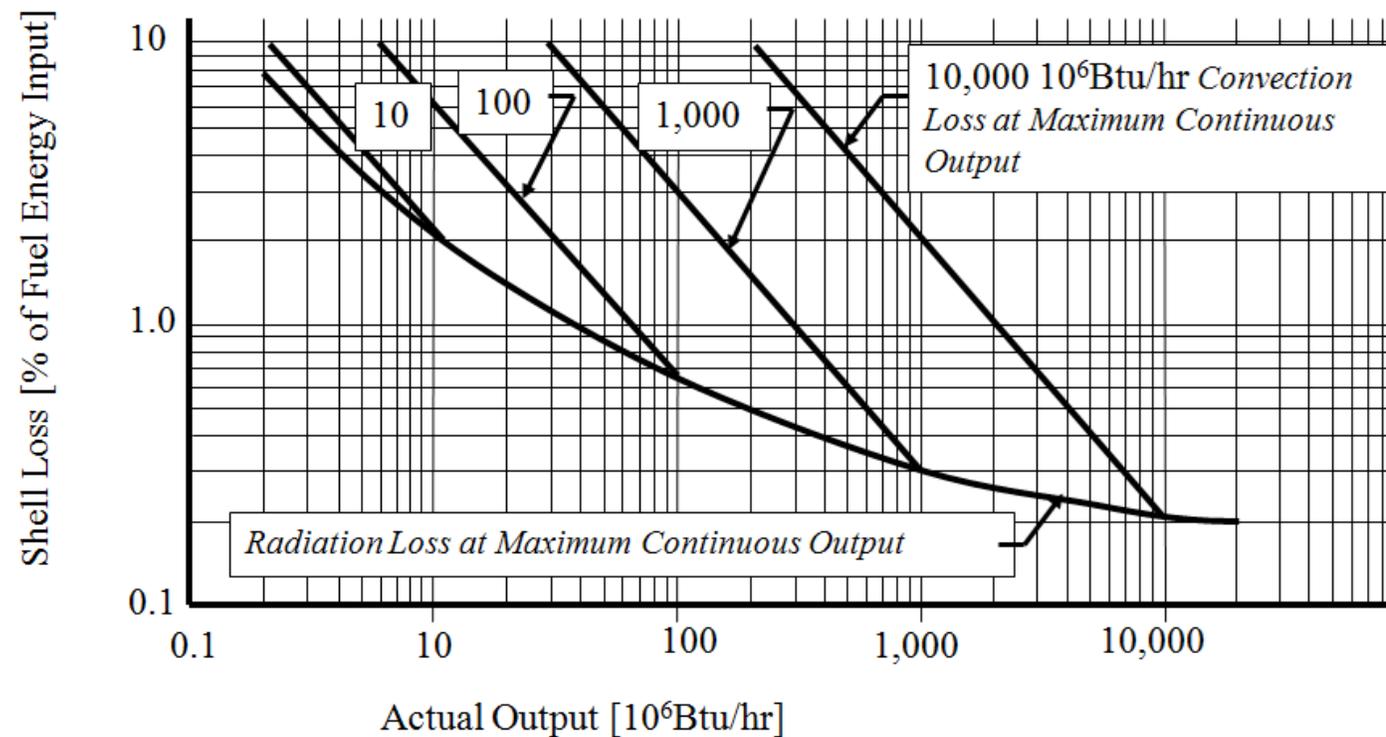
Table B.1. Natural gas stack loss (%)

Flue gas O <sub>2</sub> content (%)	Flue gas temperature—combustion air temperature (°F)														
	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510
1.00	14.49	14.92	15.36	15.79	16.23	16.67	17.11	17.55	17.99	18.43	18.88	19.32	19.77	20.21	20.66
2.00	14.72	15.17	15.63	16.09	16.55	17.01	17.47	17.93	18.39	18.86	19.32	19.79	20.26	20.73	21.20
3.00	14.98	15.46	15.94	16.42	16.90	17.38	17.87	18.36	18.84	19.33	19.82	20.31	20.80	21.30	21.79
4.00	15.26	15.77	16.28	16.79	17.29	17.81	18.32	18.83	19.35	19.86	20.38	20.90	21.41	21.93	22.46
5.00	15.59	16.12	16.66	17.20	17.74	18.28	18.82	19.36	19.91	20.46	21.00	21.55	22.10	22.65	23.20
6.00	15.96	16.52	17.10	17.67	18.24	18.82	19.39	19.97	20.55	21.13	21.71	22.29	22.88	23.46	24.05
7.00	16.38	16.98	17.59	18.20	18.82	19.43	20.04	20.66	21.28	21.90	22.52	23.14	23.77	24.39	25.02
8.00	16.86	17.51	18.16	18.82	19.48	20.14	20.80	21.46	22.12	22.79	23.46	24.12	24.79	25.47	26.14
9.00	17.42	18.13	18.83	19.54	20.25	20.96	21.68	22.39	23.11	23.83	24.55	25.27	25.99	26.72	27.44
10.00	18.09	18.86	19.62	20.39	21.16	21.94	22.71	23.49	24.27	25.05	25.83	26.62	27.41	28.19	28.98
11.00	18.89	19.73	20.57	21.42	22.26	23.11	23.96	24.81	25.67	26.52	27.38	28.24	29.10	29.97	30.83
12.00	19.87	20.80	21.73	22.66	23.60	24.54	25.48	26.43	27.37	28.32	29.27	30.22	31.18	32.13	33.09

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

MÉTODO INDIRECTO. DISIPACIONES POR CARCASA:



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

#### MÉTODO INDIRECTO. DISIPACIONES POR PURGAS:

Para la estimación de las pérdidas por purga primero se estima el caudal de purga:

$$\dot{m}_{purga} = \left( \frac{\% Purga}{1 - \% Purga} \right) \cdot \dot{m}_{vapor}$$

A mayor % de purga mayor es el caudal a purgar.

Luego se determina la pérdida en relación al consumo de combustible:

$$\lambda_{purga} = \frac{\dot{m}_{vapor} (h_{Liq.Sat.} - h_{BFW})}{\dot{E}_{Comb}} * (100)$$

A menor temperatura del agua de alimentación a la caldera, mayor es esta disipación.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

#### OTRAS CONSIDERACIONES:

Las calderas producen arrastres de agua con el vapor por:

- ✓ Producción a baja presión
- ✓ Demanda excesiva de vapor por el proceso
- ✓ Nivel de agua alto en la caldera
- ✓ Formación de espuma por alta concentración de sales.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.1. Calderas: cálculo de eficiencia

spiraxsarco.com

Eficiencia energética en calderas y ciclos térmicos

VARIABLE	AHORRO
CADA 6° C DE AUMENTO DE TEMPERATURA DE AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERA	1 % DE COMBUSTIBLE
CADA 22°C DE REDUCCIÓN DE TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE EN CHIMENEA	1 % DE COMBUSTIBLE
CADA 22°C DE AUMENTO DE TEMPERATURA DE AIRE DE ALIMENTACIÓN A QUEMADORES	1 % DE COMBUSTIBLE
CADA 2,2 % DE REDUCCION DE OXIGENO EN CHIMENEA	1 % DE COMBUSTIBLE
CADA 40 PPM DE REDUCCION DE TDS EN AGUA DE ALIMENTACIÓN	1 % DE PURGA DE SUPERFICIE
CADA 40 PPM DE REDUCCION DE TDS EN AGUA DE ALIMENTACIÓN	1 % DE PURGA DE FONDO

*First for Steam Solutions*

EXPERTISE | SOLUTIONS | SUSTAINABILITY

**spirax**sarco

Fuente: Eficiencia Energética en Calderas y Ciclos Térmicos, Spirax Sarco

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: generalidades

- ✓ Antes de su ingreso al circuito, el agua de alimentación a la caldera (o *boiler feedwater*) requiere de acondicionamientos previos.
- ✓ Los tratamientos previos a realizar en el agua de suministro al sistema de vapor van a depender de la fuente primaria (río, lago, entre otros).
- ✓ Es de suma importancia conocer las sustancias que pueden encontrarse en el agua, definen el tipo de tratamiento a implementar

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: requerimientos

Se utilizan las recomendaciones de la Norma Británica BS, la ABMA (American Boiler Manufacturing Association) y TÜV. Para humotubulares se tiene estos requerimientos:

Presión máxima de servicio P en kgf/cm <sup>2</sup>	p ≤ 0.5	p > 0.5 (1)
Aspecto visual	Transparente, sin color ni sedimentos	
Dureza en mg/ℓ de CO <sub>3</sub> Ca	≤10	≤10
pH a 20 °C	7.5 a 8.5	7.5 a 8.5 (2)
Materias orgánicas valoradas en mg/ℓ de MnO <sub>4</sub> K consumido (3)	≤10	≤10
Aceites y grasas, en mg/ℓ	≤3	≤1

- (1) Si p > 13 kgf/cm<sup>2</sup>, deberán evitarse los efectos del oxígeno disuelto.  
 (2) Estos valores podrán modificarse según la naturaleza del agua de alimentación.  
 (3) En caso de alta concentración de materias orgánicas no oxidables con MnO<sub>4</sub>K y si oxidables con CrO<sub>3</sub>K<sub>2</sub>, se consultara a un especialista.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: requerimientos

Presión máxima de servicio P en kgf/cm <sup>2</sup>	$p \leq 11$	$11 < p \leq 17$	$p > 17$
Aspecto visual	Transparente, sin color ni sedimentos		
Dureza en grados hf.	$\leq 1$	$\leq 0.6$	$\leq 0.2$
pH a 20 °C	8.5 a 9.5	8.5 a 9.5	8.5 a 9.5
Materias orgánicas en mg/ℓ de MnO <sub>4</sub> K consumido	$\leq 10$	$\leq 10$	$\leq 10$
Aceite, en mg/ℓ	$\leq 3$	$\leq 2$	$\leq 1$

Se puede observar que la norma no hace referencia a los gases disueltos en el agua (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) y cabe señalar que es recomendable (y hasta exigido por los fabricantes de calderas) la desgasificación a partir de 10 kgf/cm<sup>2</sup>.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: requerimientos

Las calderas acuotubulares demandan los siguientes parámetros del agua de ingreso:

Tipos de calderas y presiones máximas de servicio, p en kgf/cm <sup>2</sup>	Calderas de circulación forzada y agua de inyección para atemperación de vapor	Calderas de circulación natural o asistida (1)			
		p≤20	20<p≤40	40<p≤64	p>64
Aspecto Visual	Transparente, sin color ni sedimentos				
Dureza en °hf	≤0.01	≤0.1	≤0.05	≤0.05	≤0.02
pH a 20 °C	8 a 9.5	8 a 9.5	8 a 9.5	8 a 9.5	8 a 9.5
O <sub>2</sub> mg/ℓ	≤0.02				
CO <sub>2</sub> libre	No detectable				
CO <sub>2</sub> combinado como (CO <sub>3</sub> H <sup>+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>m</sup> mg/l (2)	≤1	Recomendado ≤20			≤1

Fe, mg/ℓ	≤0.02	Recomendado ≤0.05	≤0.03
Cu, mg/ℓ	≤0.005	≤0.01	≤0.005
Materias orgánicas valoradas en mg/l de MnO <sub>4</sub> K consumido	≤5	≤10	≤5
Aceite, mg/ℓ	≤0.3	≤1	≤0.5
Si O <sub>2</sub> , mg/ℓ	Función de los límites impuestos para el agua en el interior de la caldera		
(1)	Para flujos de calor absorbidos superiores a $2 \times 10^5$ kcal/m <sup>2</sup> .h, serán aplicables los valores de p > 64 kgf/cm <sup>2</sup> cualquiera que sea la presión máxima de servicio.		
(2)	Para calderas de presión inferior a 11 kgf/cm <sup>2</sup> y baja producción, se consideraran estos valores como aconsejables.		

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: inconvenientes por corrosión

Las principales fuentes de corrosión en calderas son:

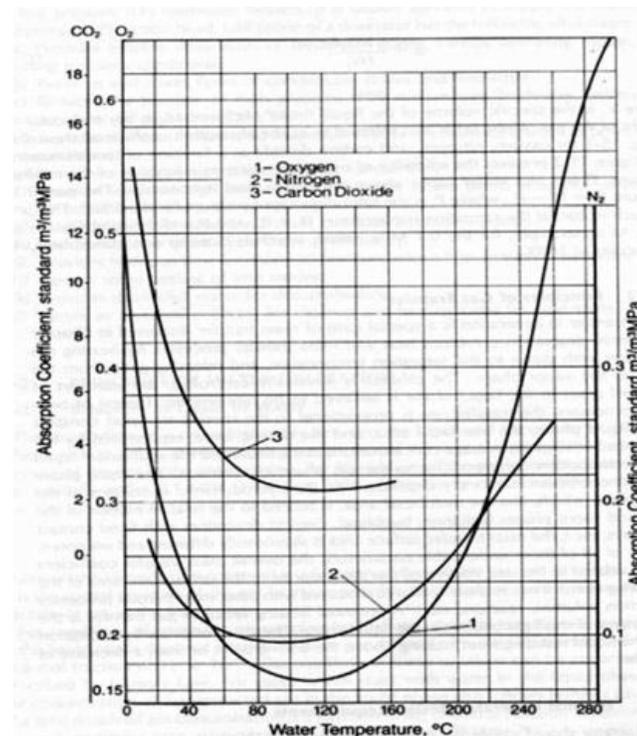
- ✓ Corrosión por oxígeno o *pitting*: es la reacción del oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera (disolución o formación de óxidos insolubles)
- ✓ Corrosión cáustica: se produce por sobreconcentración local en zonas de elevadas cargas térmicas de sales alcalinas



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: inconvenientes por corrosión

- ✓ Solubilidad del oxígeno en función de la temperatura del agua



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: inconvenientes por incrustaciones

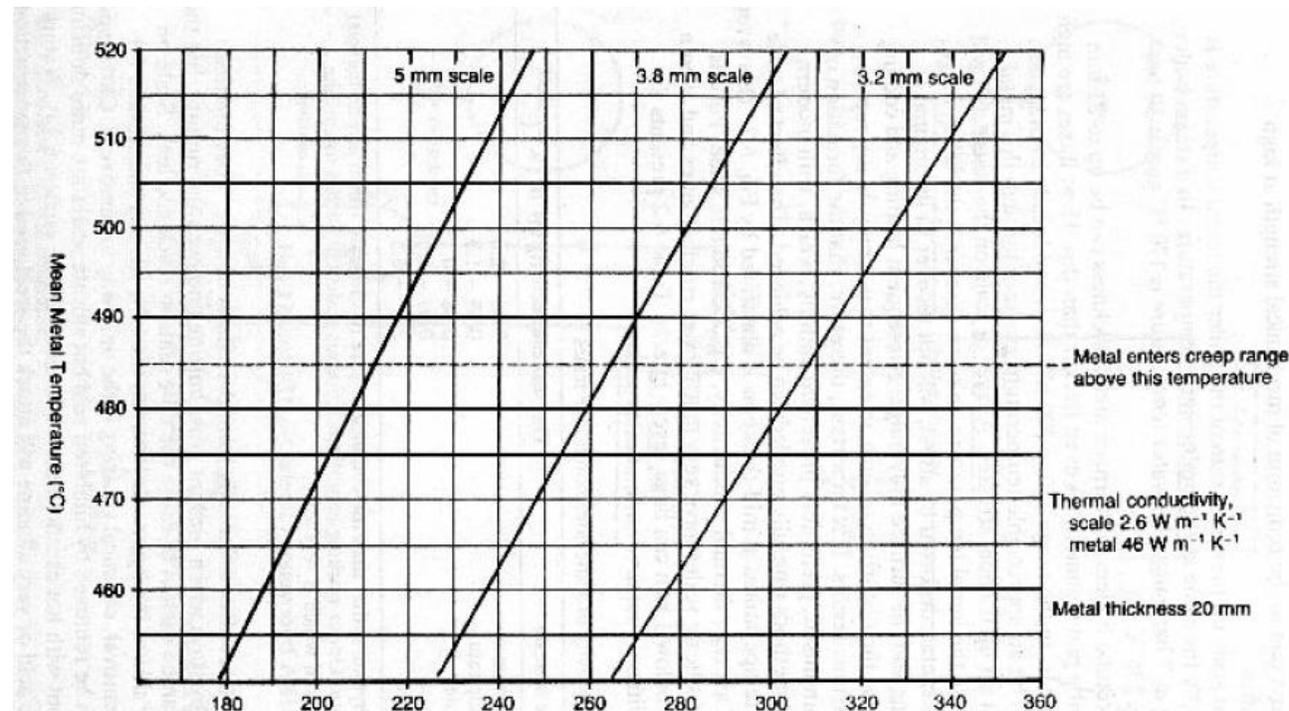
- ✓ Son deposiciones de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio. Causas: altas concentraciones en el BFW y purga insuficiente.
- ✓ Las incrustaciones tienen baja conductividad térmica y hacen las veces de aislantes térmicos → afectan al rendimiento y pueden causar daños.



## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: inconvenientes por incrustaciones

Efectos del espesor de la capa de incrustaciones de una caldera en la temperatura del metal

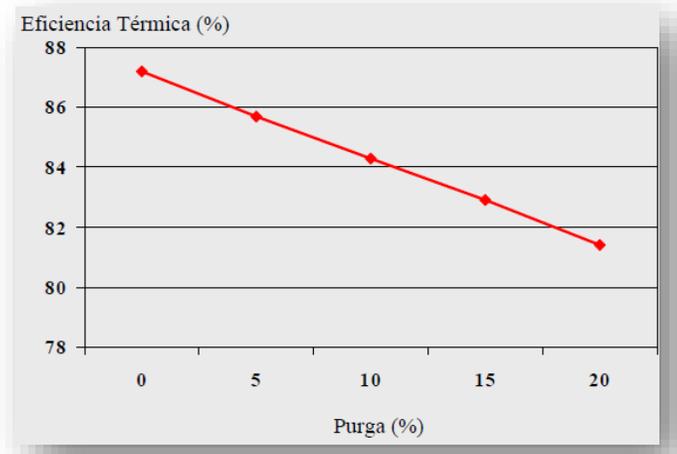


## H.2. GENERACIÓN

### H.2.2. BFW: impacto de los inconvenientes en la eficiencia

Existen dos tipos de pérdidas de eficiencia fundamentales:

- ✓ Mala transferencia de calor (deposiciones)
- ✓ Purgas: a mayor % purga, menor eficiencia térmica



- ✓ La relación entre la concentración de impurezas en la caldera y la concentración de impurezas en el agua de calderas determina los ciclos de concentración.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.3. Generación de vapor en corrientes de procesos

¿Qué corrientes de proceso pueden utilizarse para generar vapor?

- ✓ Corrientes con alto nivel térmico que deban ser enfriadas y no pueden aprovecharse para calentar otra corriente de proceso.
- ✓ Corrientes con alto nivel térmico que deban ser enfriadas pero no tengan un servicio permanente (operación eventual a tanque).
- ✓ *Flue gases* con alta temperatura (hornos, FCC, reformado de naftas, *steam reforming*)
- ✓ Calor de reacción (por ejemplo: síntesis de Metanol o ácido sulfúrico, *catalyst cooler* en FCC –*fraccionamiento catalítico fluidizado*–).
- ✓ Corrientes circulantes de fraccionadoras de destilación al vacío y coque.
- ✓ Corrientes de slurry/gasoil pesado (GOP) de FCC.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.3. Generación de vapor en corrientes de procesos: consideraciones

- ✓ Si se trata de vapor en una cantidad considerable, se debe prever el recalentamiento a una temperatura cercana a la del colector.
- ✓ Verificar la real necesidad del vapor a producir. No producir para laminar o ventear.
- ✓ Si la ventaja de generar vapor no es muy clara, evaluar precalentar BFW.
- ✓ Si la temperatura de la corriente caliente es muy elevada, verificar cuidadosamente la especificación de materiales para evitar roturas por fatiga térmica.
- ✓ Tener en cuenta la diferencia de presión para el diseño mecánico; las corrientes de proceso (y más aún los *flue gases*) suelen estar a baja presión.
- ✓ Evitar el intercambio con corrientes que no pueden contaminarse con agua ante una eventual pinchadura.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.3. Generación de vapor en corrientes de procesos: consideraciones

#### ¿QUÉ CONDICIONES DEBEN CUMPLIRSE?

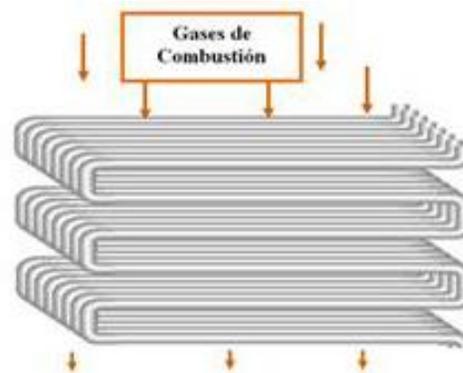
- ✓ Perfil de temperatura suficientemente plano o alto  $\Delta T$  respecto del vapor a generar.
- ✓ Tener en cuenta el requerimiento de área para precalentar BFW hasta la temperatura de saturación.
- ✓ Generalmente se usan los intercambiadores tipo *TEMA* del subtipo *AKT*, donde: *A* refiere a una mejor limpieza de tubos, *K*, permite la separación del vapor generado y *T*, para una buena limpieza del largo de los tubos. El material empleado suele ser carcasa de acero al carbono y tubos en acero inoxidable AISI 410.

## H.2. GENERACIÓN

### H.2.3. Generación de vapor en corrientes de procesos: recuperador de gases calientes

Son intercambiadores de calor que recuperan el calor residual de los gases de escape para calentar otra corriente.

- ✓ En las calderas se incorporan con esta función: economizadores y precalentadores de aire.
- ✓ Se suelen emplear en hornos de procesos o en equipos de intercambio de ductos.

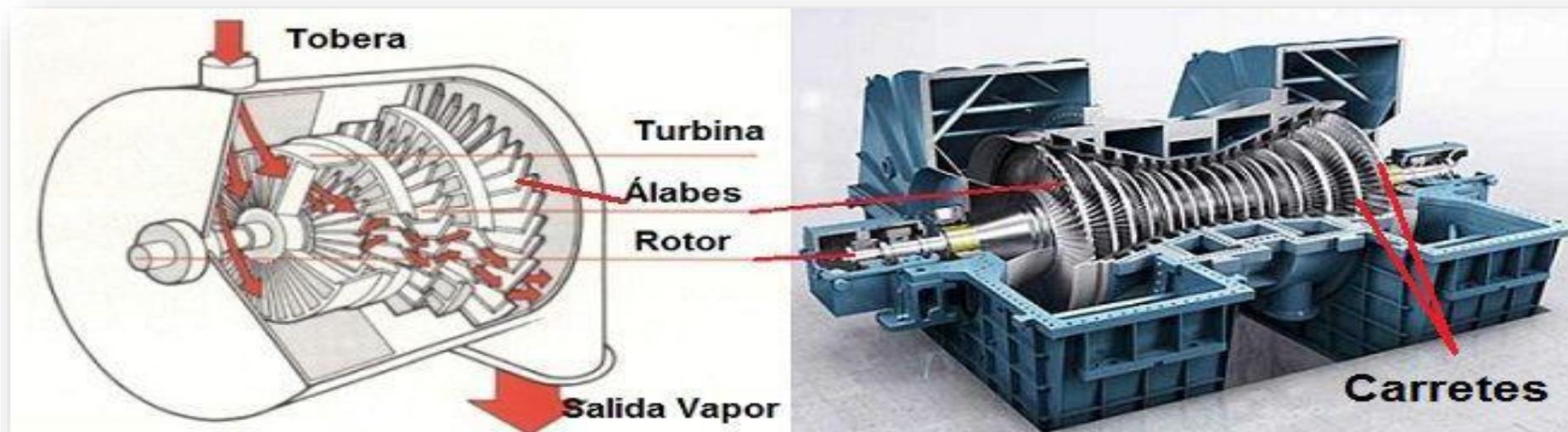


# H.3. DISTRIBUCIÓN

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: generalidades

El vapor de alta presión empuja los álabes de la turbina y las hace girar; los álabes fijos situados en la pared interior de la turbina canalizan el vapor hacia los giratorios en el ángulo más efectivo. Cuando el vapor impulsa los álabes, se expande y bajan presión y temperatura.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: generalidades

- ✓ Están disponibles para un amplio rango de condiciones de vapor, potencia y velocidades.
- ✓ Dependiendo de la función que cumpla la turbina de vapor (en adelante, TV) en el proceso tendrán:
  - Turbinas que operan dentro de un rango de velocidades a contrapresión, o bien,
  - Turbinas a potencia fija, pueden trabajar a condensación, o contrapresión

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: clasificaciones

Existen varias clasificaciones de las turbinas dependiendo del criterio utilizado, aunque los tipos fundamentales son:

Según mecanismo de conversión	<ul style="list-style-type: none"><li>• Turbinas de acción</li><li>• Turbinas de reacción</li></ul>
Según aplicación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Turbinas de contrapresión</li><li>• Turbinas de condensación</li><li>• Turbinas con extracciones</li></ul>
Según etapas de escalonamiento	<ul style="list-style-type: none"><li>• Turbinas monoetapa</li><li>• Turbinas multietapas</li></ul>
Según flujo en el rodete	<ul style="list-style-type: none"><li>• Turbinas axiales</li><li>• Turbinas radiales</li></ul>

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: clasificaciones

#### A contrapresión

- Más eficientes
- La entalpía remanente en el vapor exhausto se aprovecha en el proceso

#### A condensación total

- Poco eficientes
- La energía entregada por el combustible se desperdicia en el agua de condensación

#### A extracción

- Se encuentran en todo tipo de aplicaciones
- El vapor es liberado en diversas etapas y aprovechado en distintos procesos industriales

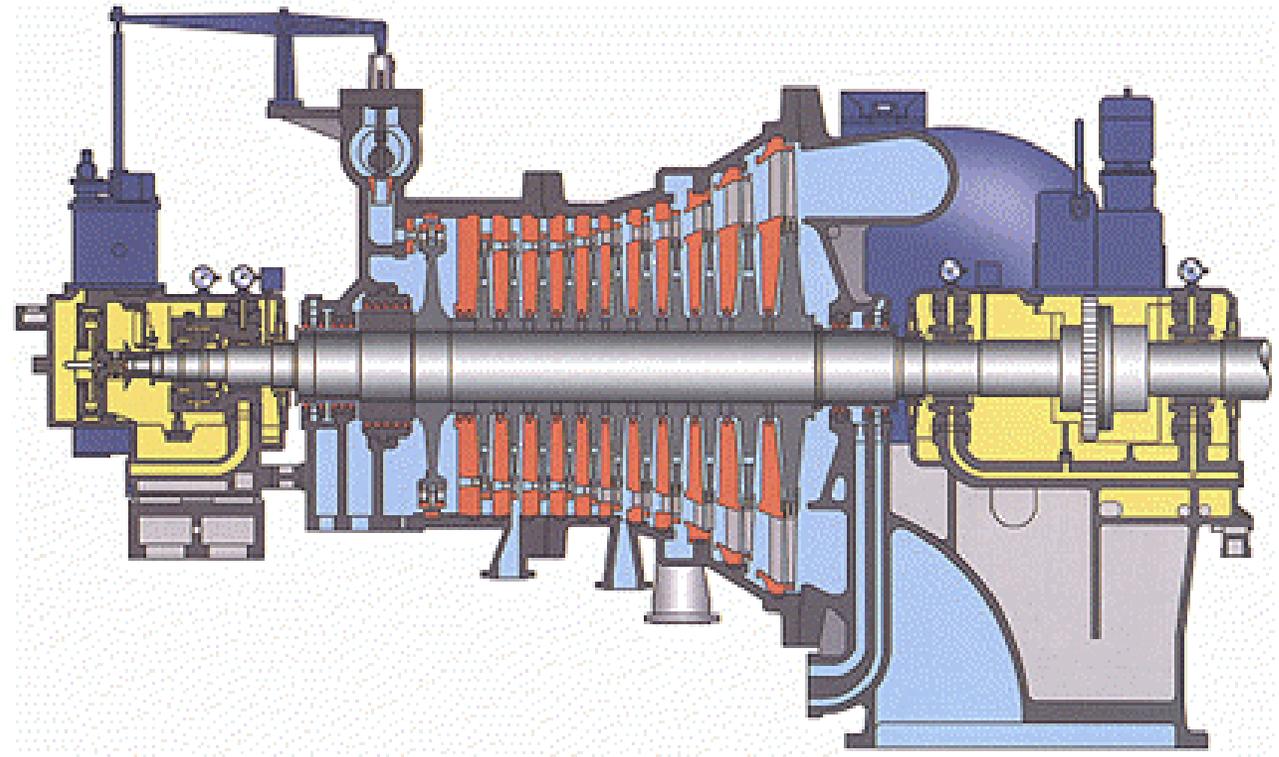
El trabajo mecánico más barato es el obtenido a través de una Turbina a contrapresión, siempre y cuando el vapor exhausto no se ventee. Caso contrario es la TE.

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: condensación vs contrapresión

#### TV a Condensación

- ✓ Equipos de entre 6 y 152 MW. Los más desarrollados pueden superar los 250 MW.
- ✓ Aplicables a industrias de Cemento, Metalúrgica, Química, Alimentación, Oil&Gas, Textil, Papelera, Refinerías, Tratamientos de desechos, CC y Centrales térmicas

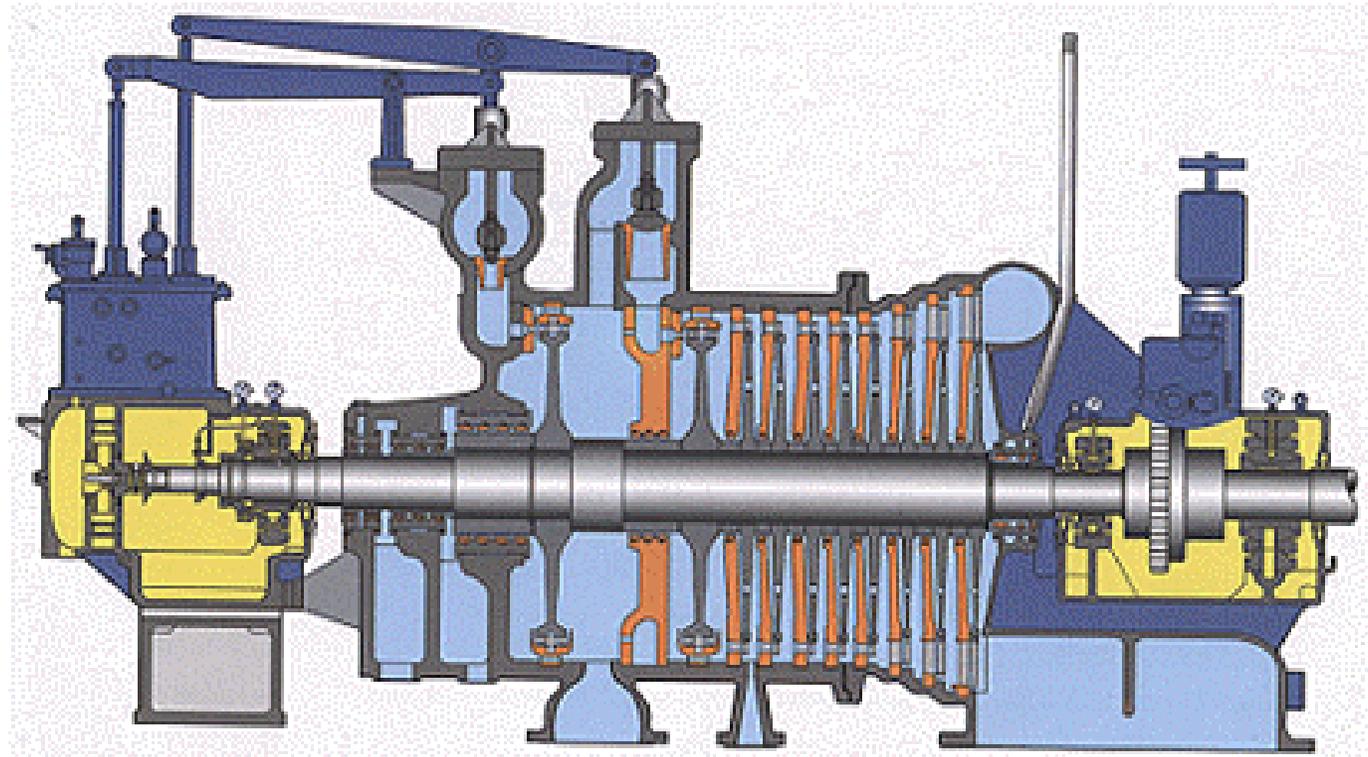


## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: condensación vs contrapresión

#### TV a Contrapresión

- ✓ Permite configurar diferentes condiciones de vapor a la entrada, en las extracciones y a la salida. Esquema típico de TV de 30MW.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: rotor y estator



## H.3. DISTRIBUCIÓN

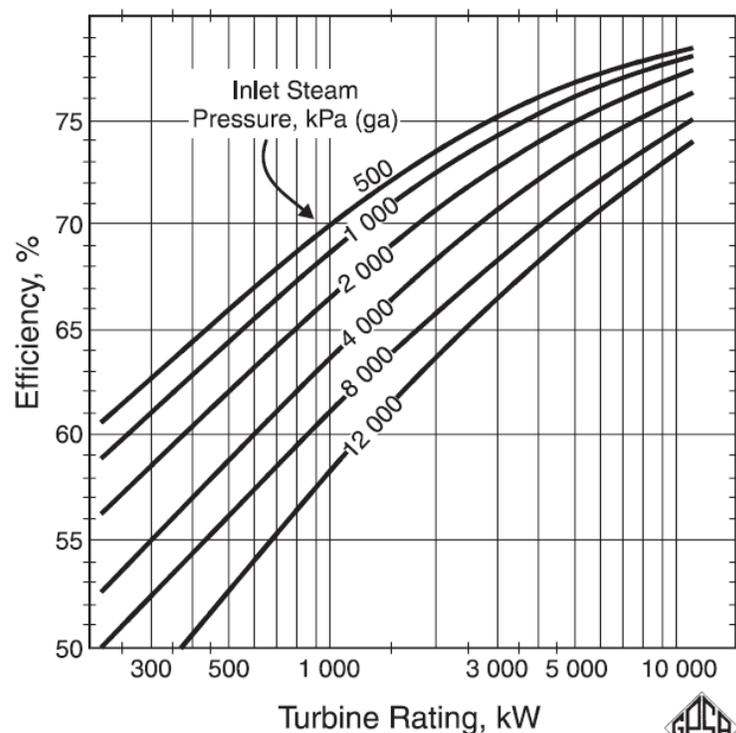
### H.3.1. Turbinas: eficiencia

- ✓ La eficiencia se afecta por: disipaciones por estrangulamiento, fugas de vapor, fricción del vapor, disipaciones en cojinetes, entre otros.
- ✓ Las eficiencias van desde un 40 % (baja potencia y una etapa) hasta casos especiales del 90 % (grandes turbinas multietapa y multi válvulas).

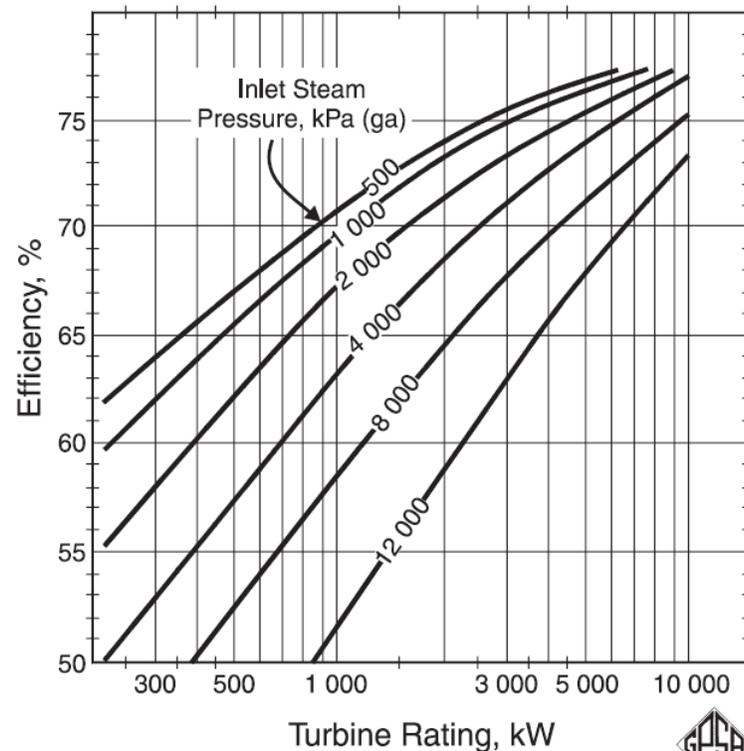
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: eficiencia

Gráficas de eficiencias de turbinas multietapas y multiválvulas



TV a Condensación

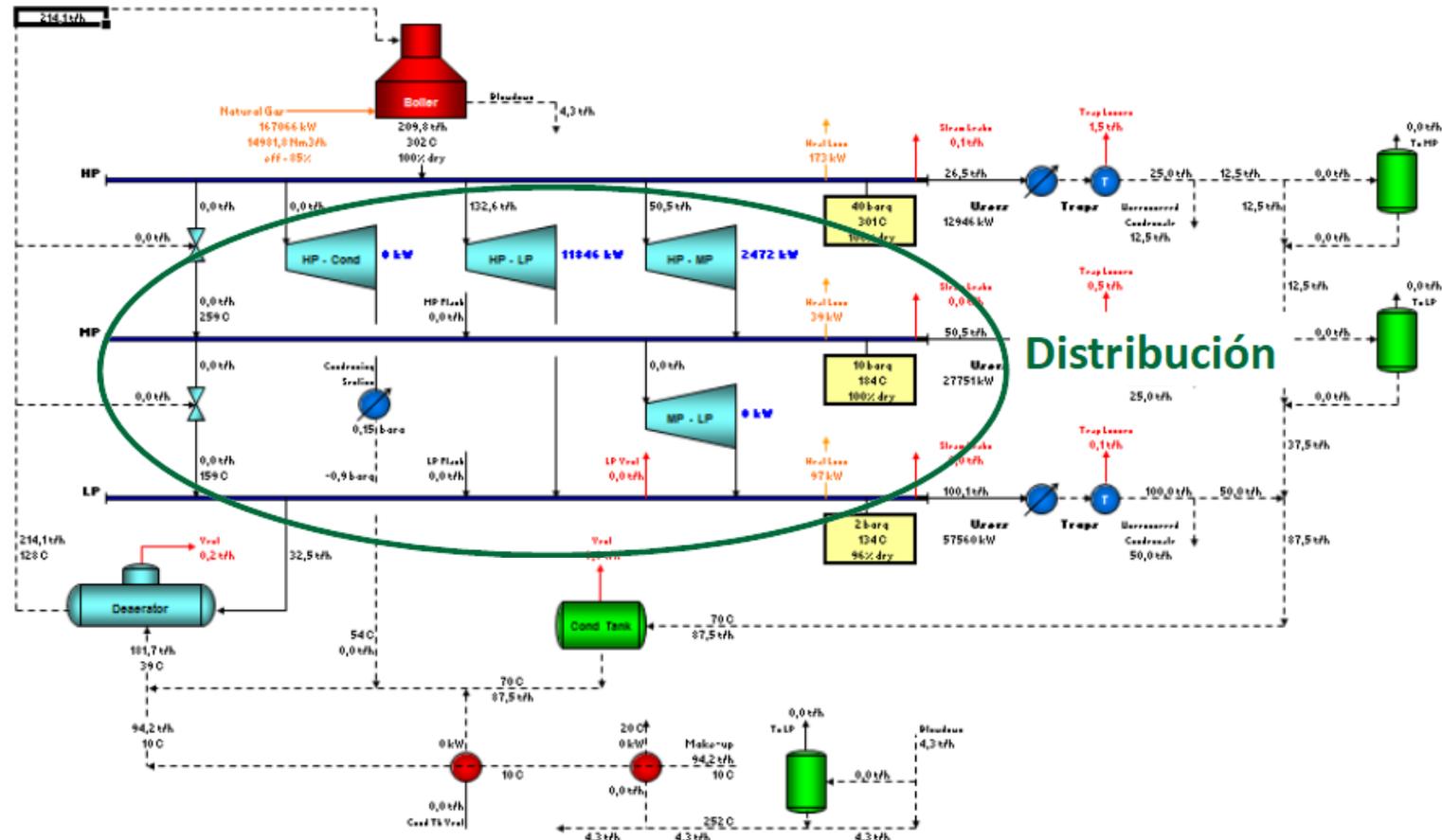


TV a Contrapresión



## H.3. DISTRIBUCIÓN

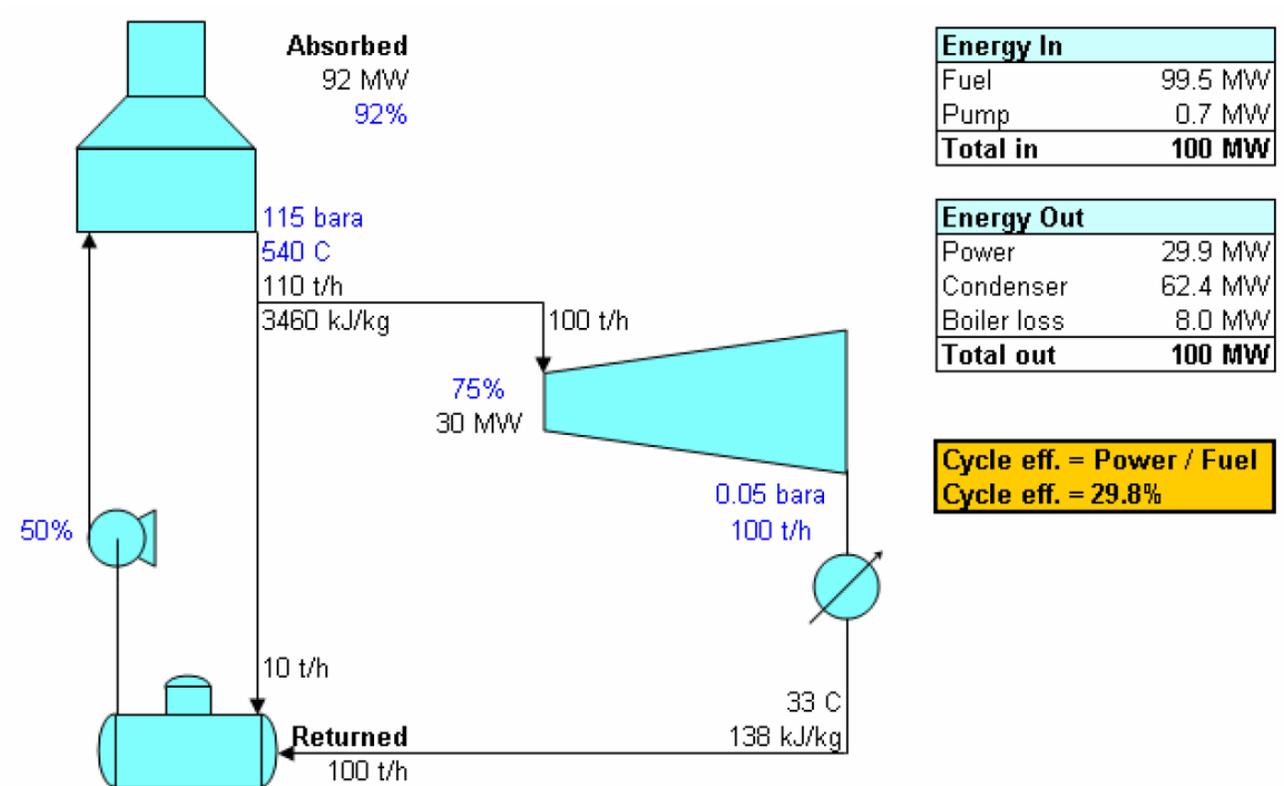
### H.3.1. Turbinas: ubicación en una red de vapor



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: condensación en una red de vapor

Los ciclos de condensación son inherentemente ineficientes; una baja porción de la energía disponible como calor es aprovechada para generar potencia.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.1. Turbinas: criticidad y rotación

#### Estado

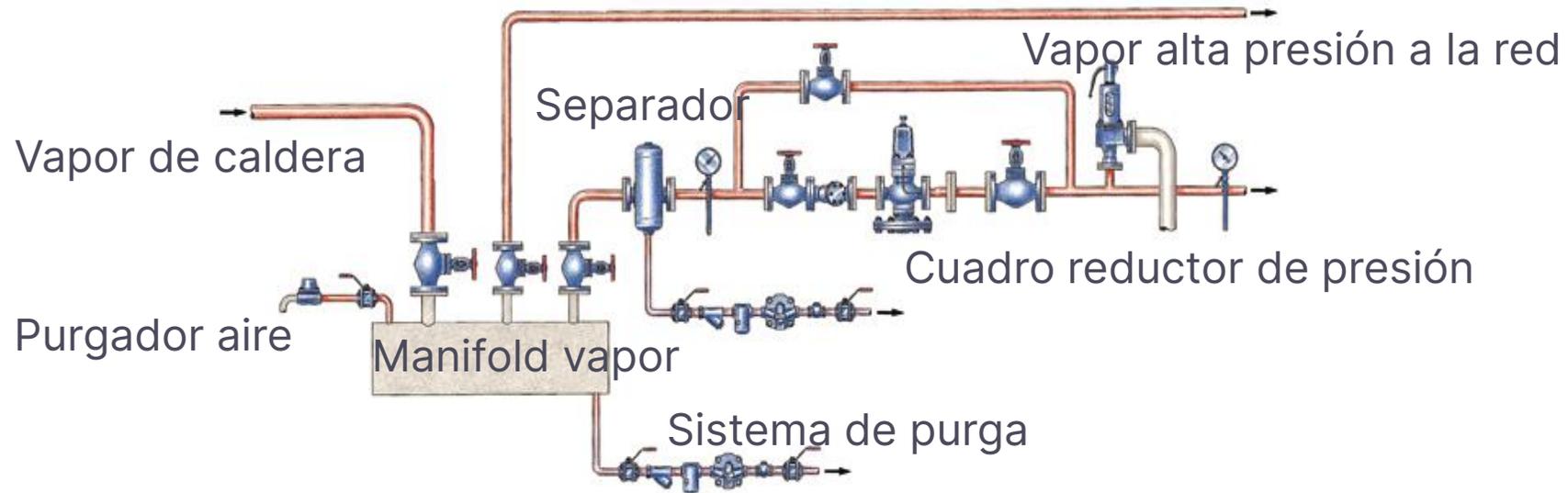
- En servicio
- Fuera de servicio
- Rotando en caliente
- Reserva caliente sin rotar

#### Clase

- Crítica: si sale fuera de servicio, genera paro de la Unidad (\*)
- No Crítica: si sale fuera de servicio no para la unidad
- Titular: no posee reemplazo eléctrico

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: redes

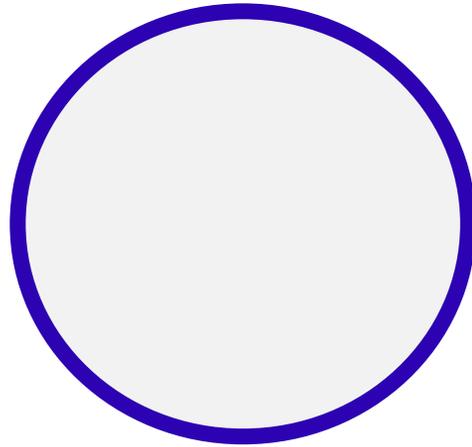


La distribución a alta presión tiene las siguientes ventajas:

- ✓ Tubería de vapor mas pequeña con menor disipación de calor y coste de material
- ✓ En los procesos con presión mas baja, la reducción mejora la calidad del vapor
- ✓ La caldera tiene mayor rendimiento trabajando con presión alta.

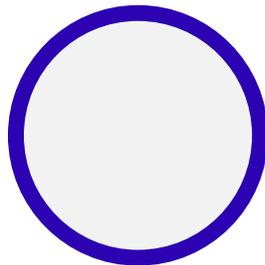
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: dimensionado de cañerías



Sobredimensionada

- + Costo
- + Pérdidas calor
- + Condensado



Subdimensionada

- + Velocidad
- + Caída de presión
- + Erosión

## H.3. DISTRIBUCIÓN

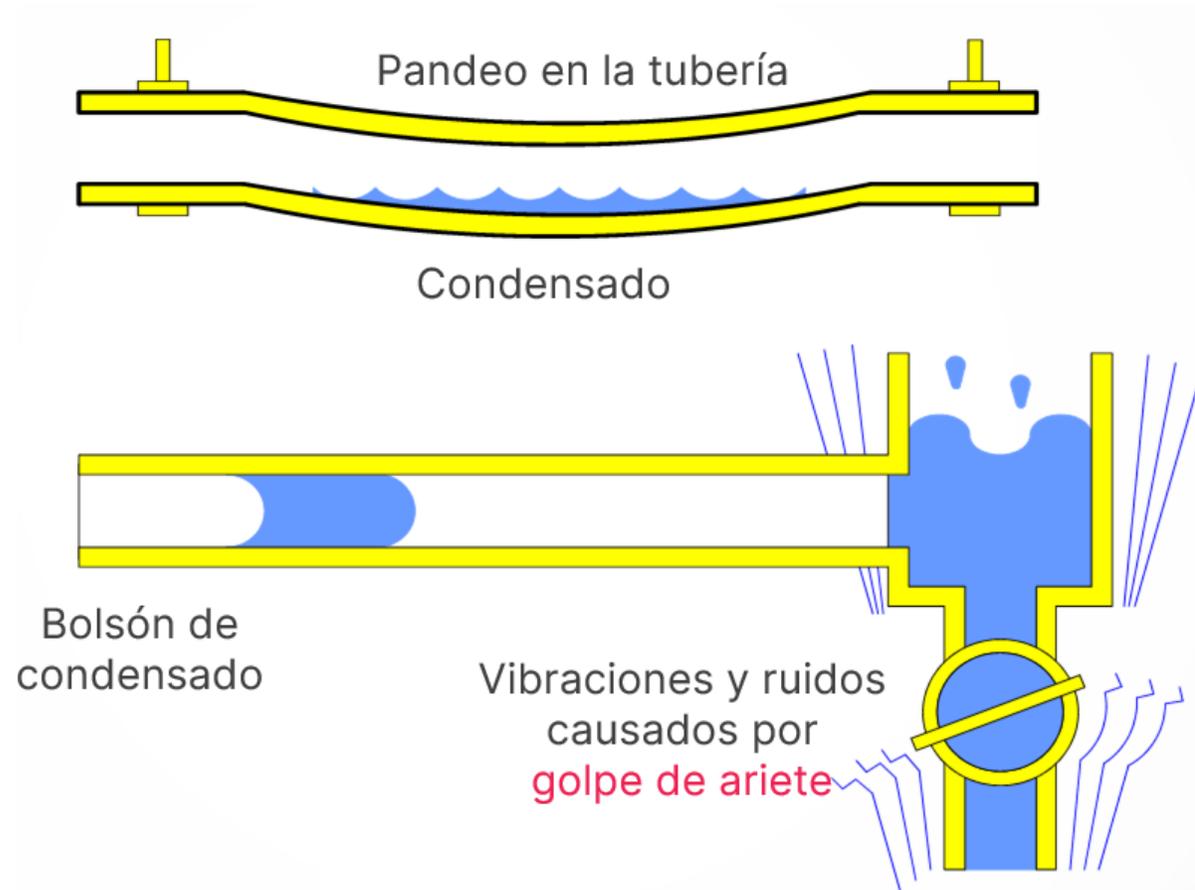
### H.3.2. Características de la distribución: determinación del diámetro de la cañería

- ✓ Parámetros a tener en cuenta: **Velocidad y Caída de presión**
- ✓ La velocidad del vapor no debe sobrepasar:
  - En líneas principales 25 a 35 m/s
  - En derivaciones 20 a 25 m/s.
- ✓ La caída de presión no debe superar un determinado valor, para asegurar que el vapor llega a los puntos de consumo con *la presión necesaria*



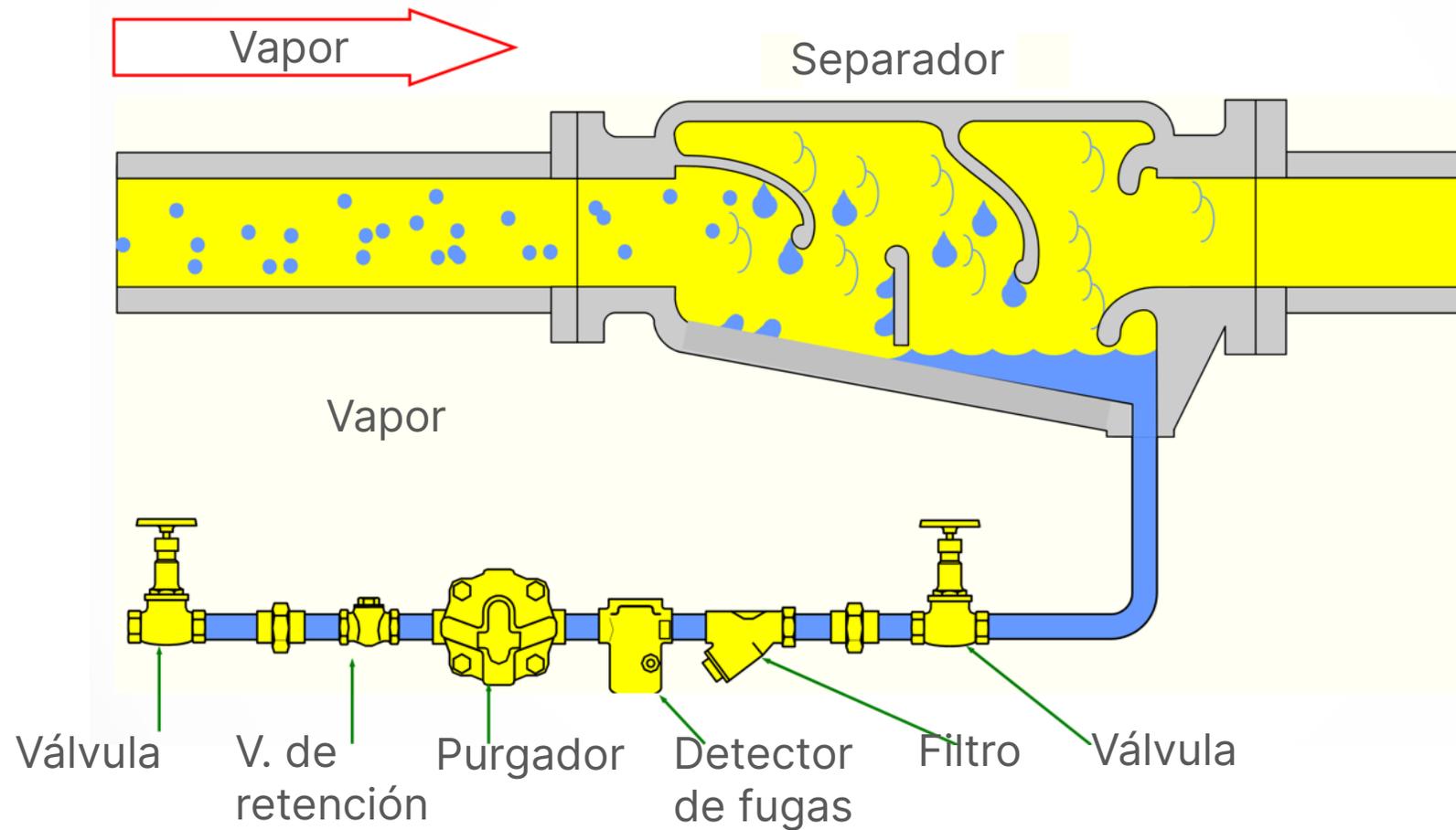
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: golpe de ariete



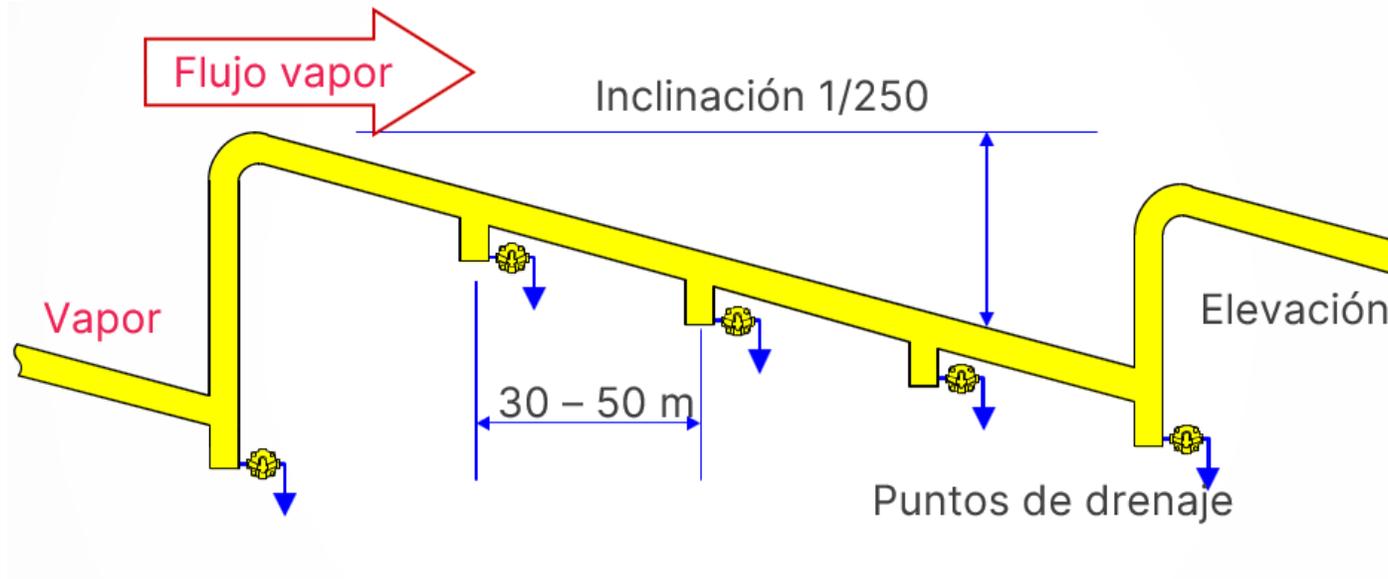
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: drenaje



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: pendiente y purgado de cañerías

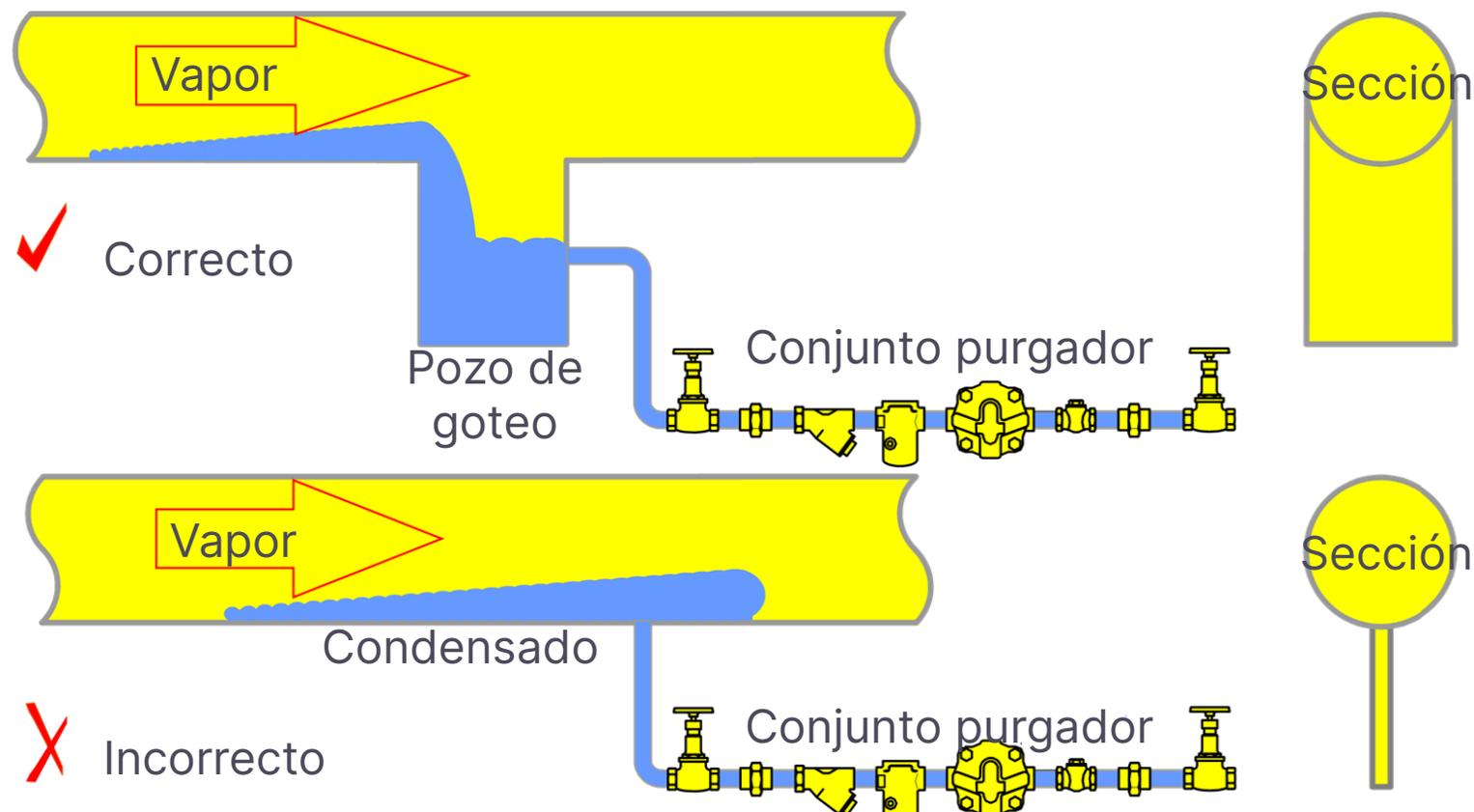


Las tuberías de vapor deben purgarse en :

- ✓ Puntos bajos
- ✓ Tramos rectos (cada 50 m como máximo colocar un punto de drenaje)
- ✓ Finales de línea.

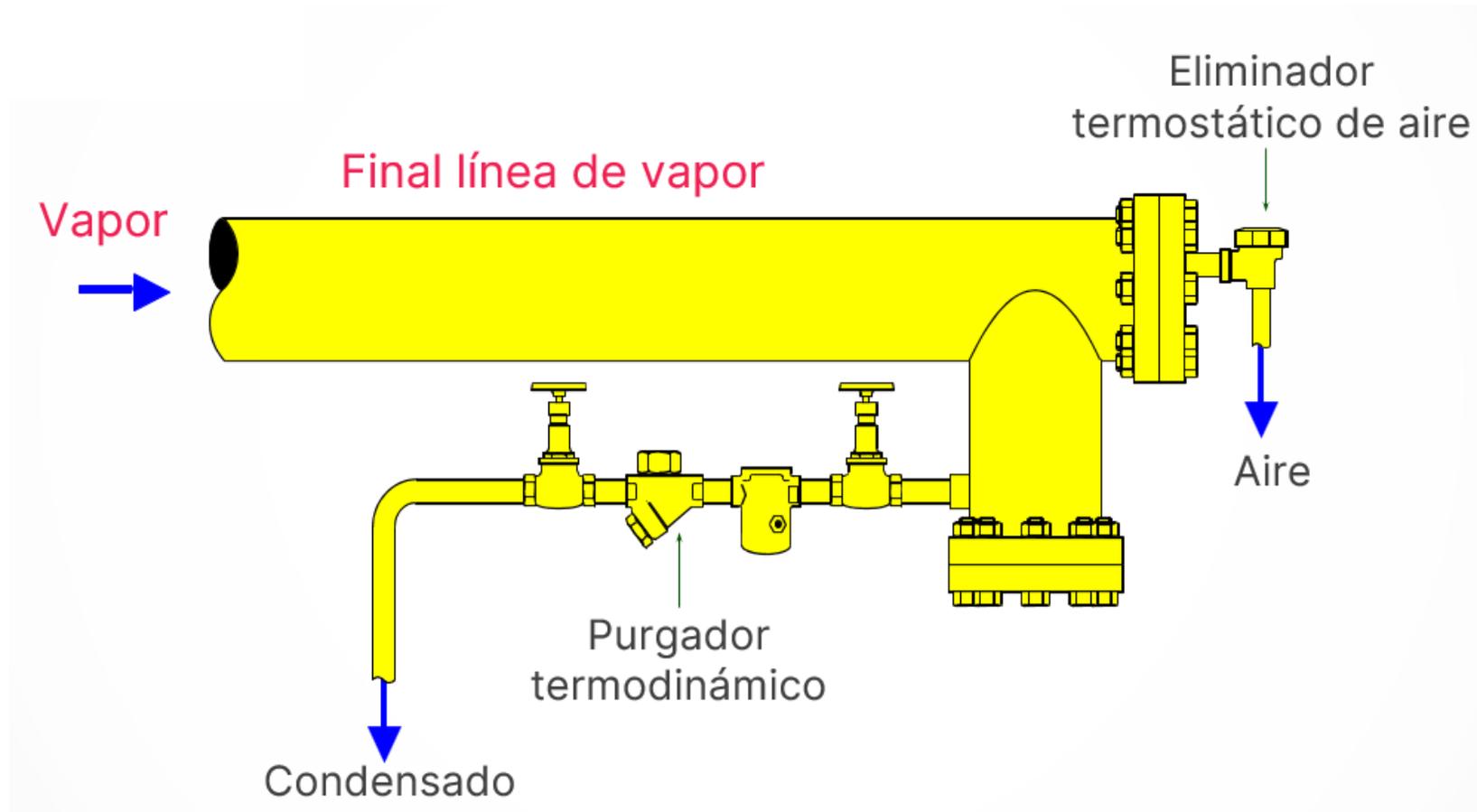
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: pendiente y purgado de cañerías



## H.3. DISTRIBUCIÓN

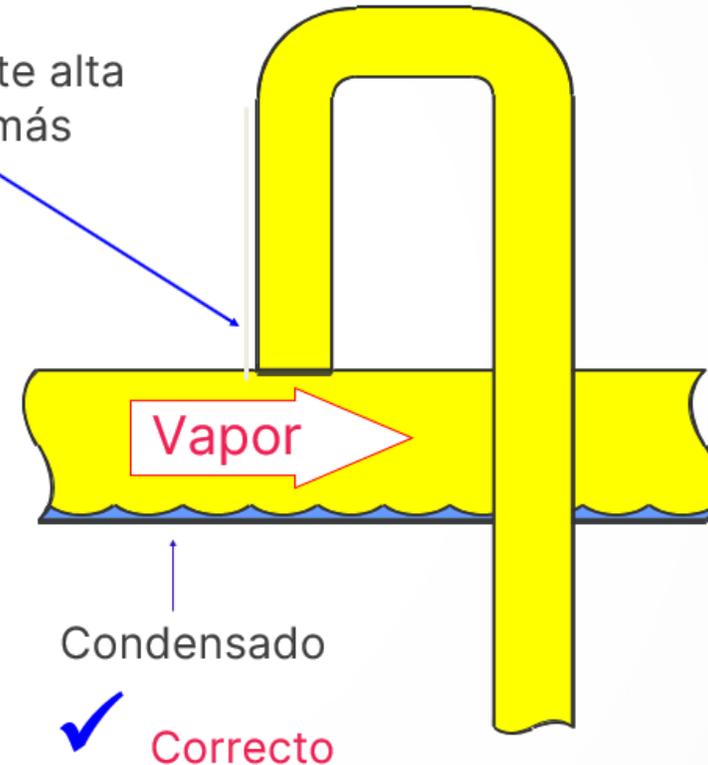
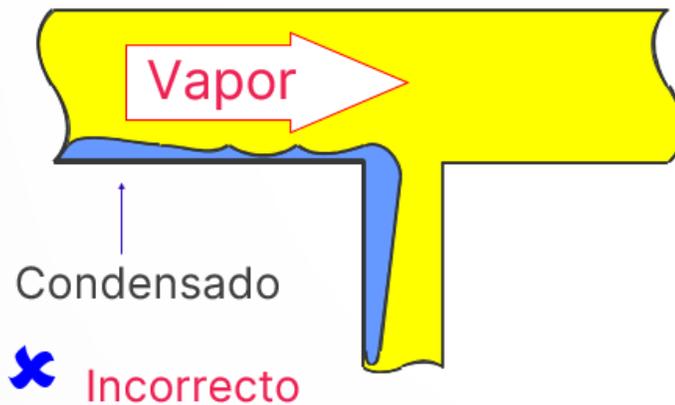
### H.3.2. Características de la distribución: eliminación de aire



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: conexión de las derivaciones

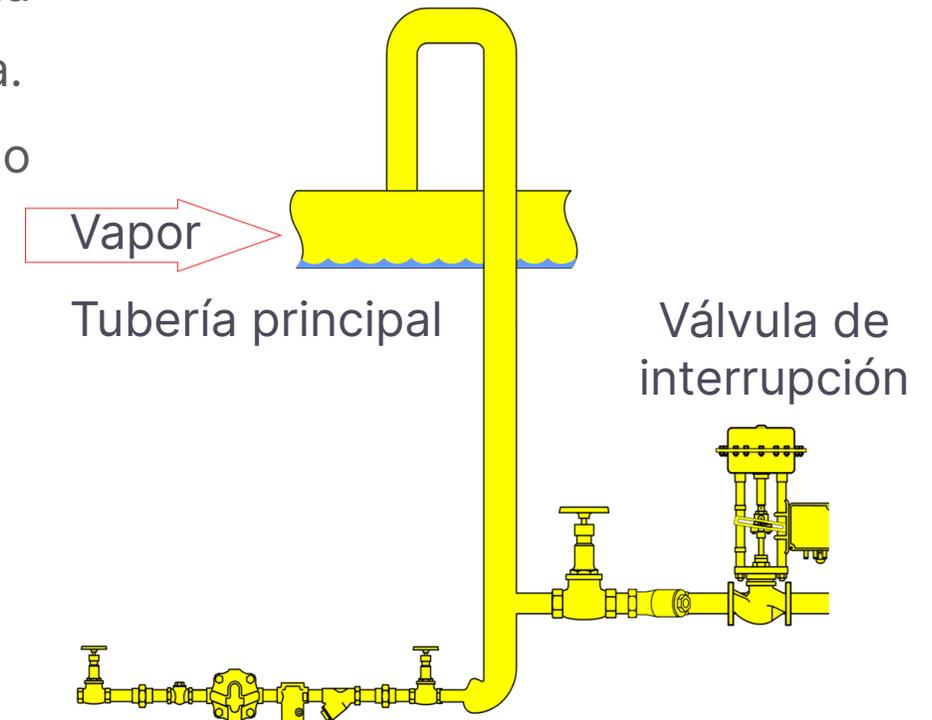
La conexión de una derivación por la parte alta de la tubería principal asegura un vapor más seco en el proceso.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: drenaje de las derivaciones

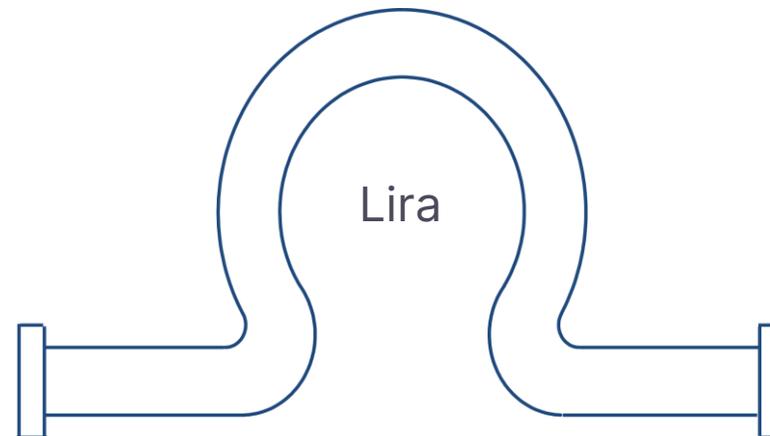
- ✓ El condensado se acumula delante de la válvula cerrada y se introducirá con el vapor cuando abra.
- ✓ Es aconsejable ubicar el drenaje en el punto bajo de la derivación.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: compensación de las dilataciones

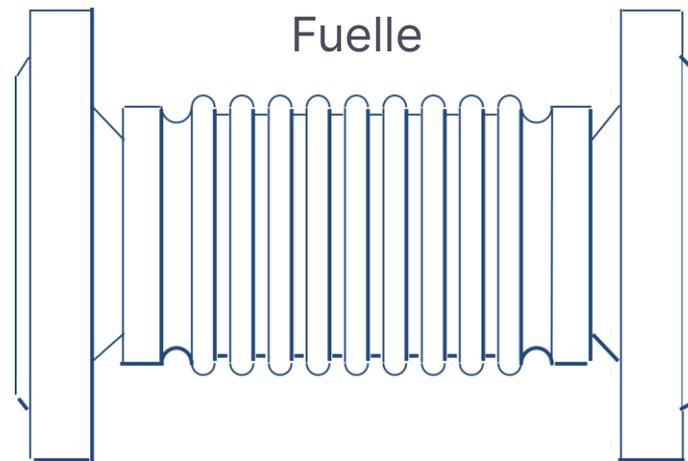
- ✓ Se emplean liras cuando se dispone de espacio
- ✓ Debe montarse en el mismo plano que la cañería, horizontal, para evitar puntos de acumulación de condensado.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: compensación de las dilataciones

- ✓ Se intercalan fuelles en la cañería cuando hay poco espacio.
- ✓ Deben estar perfectamente alineados con la cañería y estar bien anclada y guiada para que las fuerzas laterales no sean soportadas por el fuelle.



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

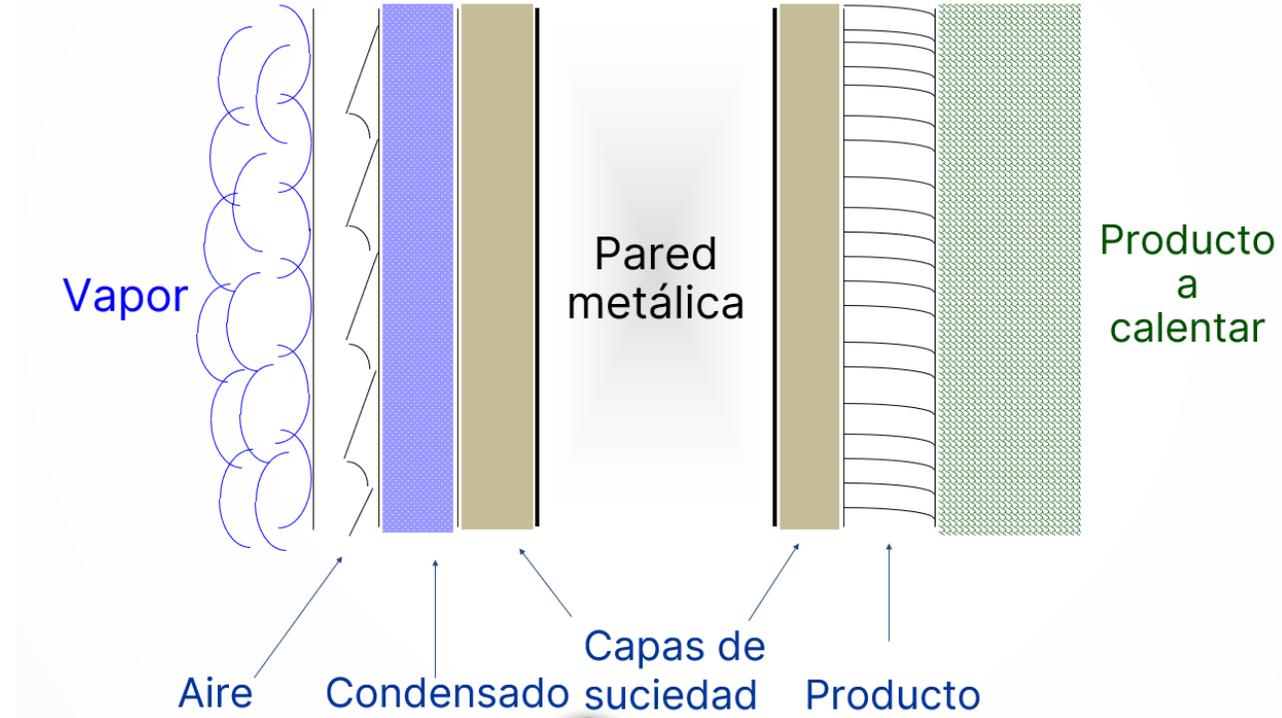
Una trampa de vapor es una válvula automática que cierre en presencia de vapor y abre cuando llega el condensado.

- ✓ De una trampa de vapor se requiere:
  - ✓ Descarga inmediata y completa del condensado
  - ✓ No fugar vapor cuando se utilice durante largos períodos
  - ✓ Descargar gases no condensables, como el aire
- ✓ Dependiendo del tipo de trampa, varía:
  - ✓ Principio de operación
  - ✓ Fortalezas y debilidades relativas
  - ✓ Aplicaciones

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

#### BARRERAS EN LA TRANSFERENCIA DEL CALOR



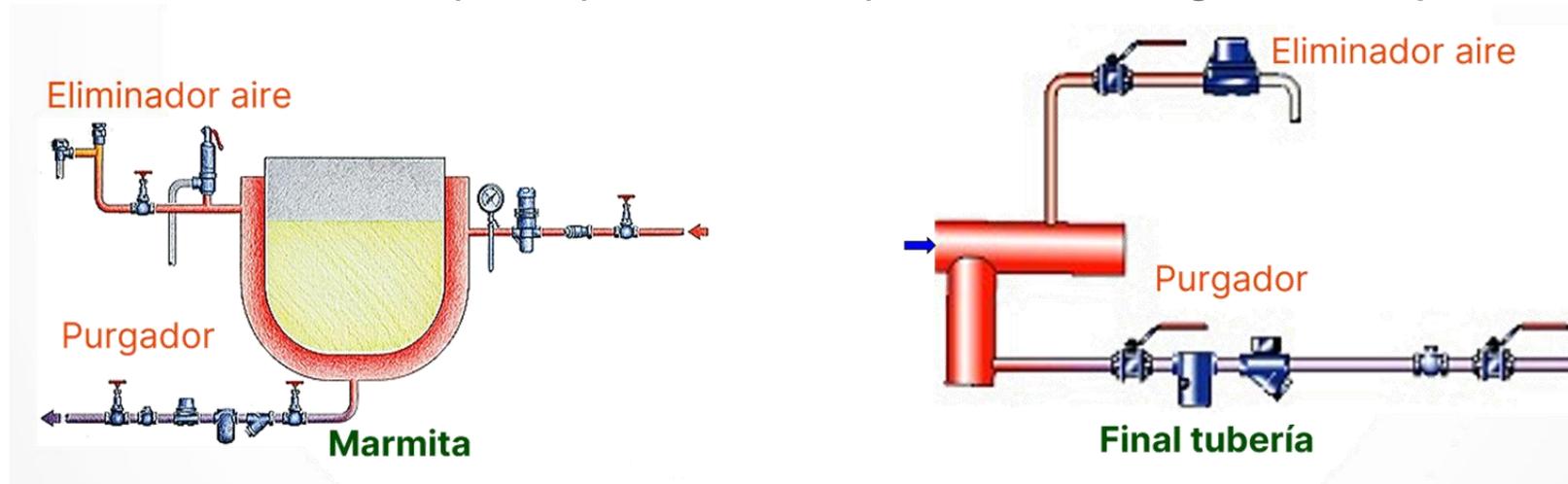
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

Para eliminar el agua o aire del sistema se utilizan:

- ✓ Purgadores
- ✓ Eliminadores

Son válvulas automáticas (trampas) que abren en presencia de agua o aire y cierran con vapor

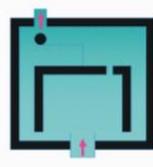


## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor



Boya o flotador

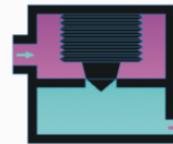


Balde invertido

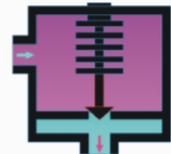
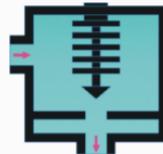


Termodinámico

Válvula de presión equilibrada



Termostático a fuelle



Termostático bimetálico

Válvula de presión no equilibrada



Termostático - termodinámico

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

#### SELECCIÓN DE TRAMPAS DE VAPOR

Debe considerarse la aplicación a la hora de elegir la trampa más adecuada. Así:

Tipo de Trampa	Consideraciones
Termostáticas	Purga de aire; acompañamiento no crítico de vapor, equipos que pueden ser inundados para poder aprovechar calor sensible
Mecánicas	Procesos con control de temperatura
Termodinámicas	Drenaje de líneas de distribución de vapor; acompañamiento crítico de vapor

También deben considerarse: presión; temperatura; caudal de condensado; presión diferencial.

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

Tipo de Trampa	Ventajas	Desventajas
Balde invertido 	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Robustas</li> <li>•Resisten golpes de ariete</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•No resisten bien las heladas</li> <li>•No eliminan bien el aire</li> <li>•Pueden perder el sello de agua</li> </ul>
Termostáticas de presión balanceada  	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Pequeñas pero de gran capacidad</li> <li>•Eliminan aire</li> <li>•Resisten heladas y golpes de ariete</li> <li>•Autoajustables a variaciones de presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•No usar cuando no se acepte anegamiento de condensado (normalmente fallan cerradas)</li> </ul>

## H.3. DISTRIBUCIÓN

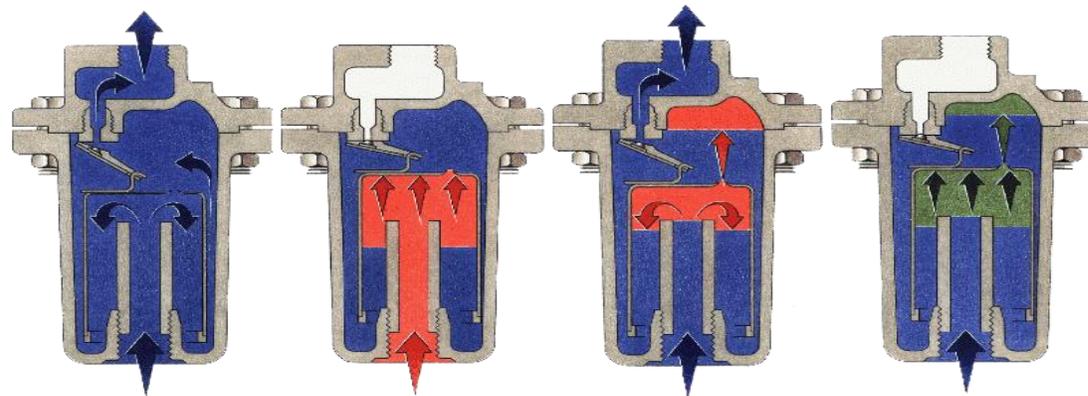
### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

Tipo de Trampa	Ventajas	Desventajas
Bimetálicas 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminan aire</li> <li>• Resisten heladas y golpes de ariete</li> <li>• Amplio margen de presiones</li> <li>• Descarga a temperatura inferior al vapor, aprovechando el calor sensible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poca rapidez a cambios de caudal o presión</li> <li>• No usar cuando no se acepte anegamiento de condensado</li> </ul>
Termodinámicas 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplia gama de presiones</li> <li>• Robustas, compactas</li> <li>• Resisten golpes de ariete, vapor recalentado y heladas</li> <li>• Fácil verificación y mantenimiento</li> <li>• Normalmente fallan en posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No adecuadas para presión de entrada muy baja o contrapresión mayor al 80% de la presión de entrada</li> <li>• No son buenas eliminadoras de aire</li> </ul>

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

#### OPERACIÓN DE LA TRAMPA DE BALDE INVERTIDO



El condensado llega a la trampa y forma un sello de agua. El peso del balde mantiene a la válvula abierta. El condensado fluye desde abajo de la trampa y sale.

Cuando ingresa el vapor, el balde se eleva haciendo elevar el mecanismo de palanca, cerrando la válvula.

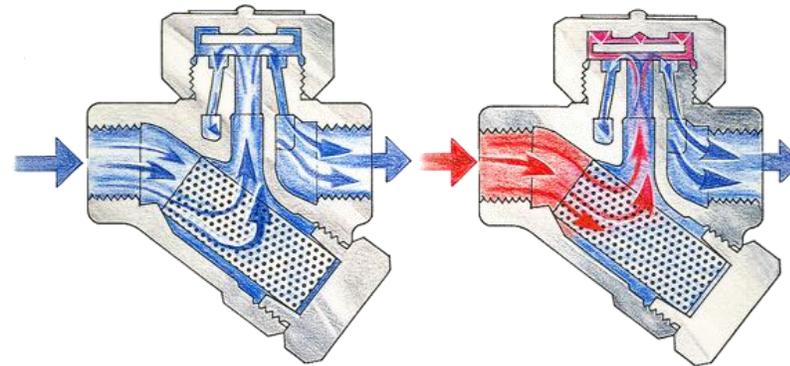
Parte del vapor atrapado condensa y parte sale por el orificio de venteo. El peso del balde hará que la válvula se aleje de su asiento repitiendo el ciclo.

El orificio de venteo en el balde hará que se acumule aire en la parte superior de la trampa. El orificio, por ser pequeño ventea el aire lentamente. Puede requerirse un venteo separado.

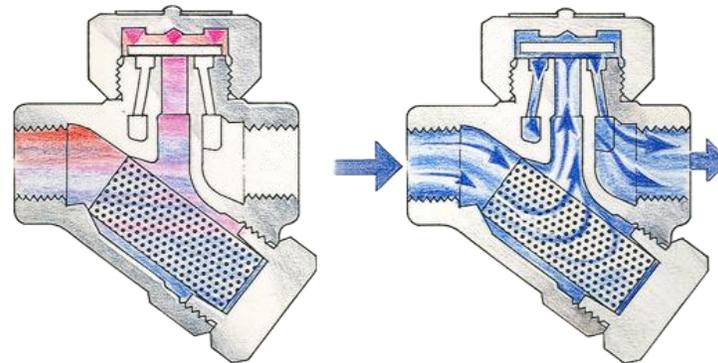
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

Al comienzo, la presión entrante eleva el disco.  
El condensado frío es descargado inmediatamente.



El disco asienta en el anillo interior y cierra la entrada.  
El disco también se asienta en el anillo exterior y mantiene la presión en la cámara.



El condensado caliente que fluye a través de la trampa libera vapor flash.

La alta velocidad provoca baja presión debajo del disco haciendo que apoye en su asiento. Simultáneamente la presión del vapor flash creada en la cámara sobre el disco, fuerza a este hacia abajo oponiéndose a la presión del condensado que llega.

La presión en la cámara disminuye debido a la condensación del vapor flash y el disco se eleva.

Luego, el ciclo se repite y el condensado circula libremente a través de la trampa.

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

A - Mejor elección, B - Alternativa aceptable. Ver comentarios en la parte inferior de la tabla.

Aplicación	Gama FT (boya- termostático)	FT-C (boya-temos- tático con SLR)	TD (Termodinámico)	BPT (Presión equilibrada)	SM (Bimetálico)	No.8 (Expansión líquida)	Gama IB (Cubeta invertida)
<b>Equipos de procesos industriales</b>							
Calderetas fijas	A	B	B <sup>1</sup>	B			
Calderetas basculantes	B	A					
Alambiques para cerveza	A <sup>1</sup>	B					
Autoclaves con camisa	A <sup>1</sup>		B <sup>1</sup>				
Evaporadores	A <sup>1</sup>	B					B <sup>1</sup>
Mesas calientes	B		B <sup>6</sup>	A <sup>2</sup>			
Autoclaves inyec. directa	A						
Tanques de almacenamiento	A						B <sup>1</sup>
Autoclaves vulcanización	A		B <sup>1</sup> (solo camisa)				B <sup>1</sup>
<b>Calefacción de locales</b>							
Intercambiadores de calor	A <sup>4</sup>						
Baterías calefactoras	A <sup>4</sup>						
Paneles y tubos radiantes	A	B <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>				B <sup>1</sup>
Radiadores	B			A	B		
Serpentines suspendidos	B			A			B <sup>1</sup>
<b>Tuberías de vapor</b>							
Tramos horizontales	B		A				B
Separadores	A		B				B
Final de línea	B		A <sup>1</sup>				B <sup>1</sup>
Drenaje de parada (protección de heladas)					B <sup>3</sup>	B	A
Drenaje de calentadores	A		B <sup>6</sup>				B
<b>Depósitos y recipientes</b>							
Depósitos (descarga por elevación)	B	B	A	B <sup>5</sup>			B
Depósitos (descarga por gravedad)	A		B <sup>6</sup>	B <sup>5</sup>			
Depósitos pequeños (hervido rápido)	A			B <sup>5</sup>			
Depósitos pequeños (hervido lento)					B	A	

1. Con eliminador de aire en paralelo. 2. Con tubo de enfriamiento. Longitud mínima 1 m. 3. Usar elementos con temperatura fija de descarga.  
Si el equipo está controlado por temperatura, puede necesitar una bomba purgador. 5. Con cápsula de temp. descarga prox. a vapor. 6. Con disco antibloqueo por aire

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

#### REQUERIMIENTOS DE VAPOR PARA OPERACIÓN NORMAL DE UNA TRAMPA

**Tabla 2 - Necesidades energéticas de los purgadores - expresados en kg/h de vapor**

	Sin carga			Carga normal		
	A través del purgador	Desde el purgador	Total	A través del purgador	Desde el purgador	Total
Termostático	0,50	0,50	1,00	Cero	0,50	0,50
Boya	Cero	1,40	1,40	Cero	1,40	1,40
Cubeta invertida	0,50	1,20	1,70	Cero	1,20	1,20
Termodinámico	0,50	0,25	0,75	Cero	0,25	0,25

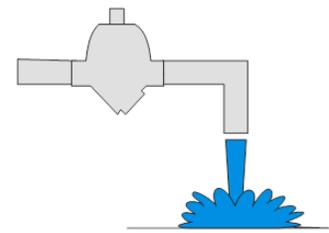
El Estándar Internacional ISO 7841 (1988) y Estándar Europeo CEN 27841 (1991) - Determinación de pérdida de vapor de un purgador automático - describe una metodología de prueba fiable y exacta para determinar las pérdidas de cualquier tipo de purgador. **Los resultados de la prueba de cualquier fabricante que no estén dentro de los parámetros de estas normas deben tratarse con cautela.**

Fuente: Purga de vapor y eliminación de aire, Spirax Sarco

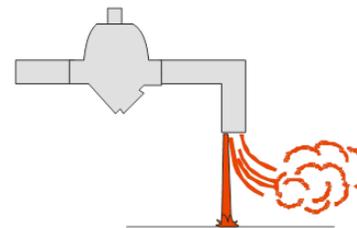
## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

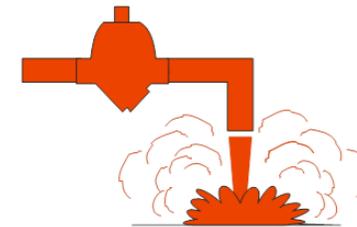
#### FUGAS EN TRAMPAS



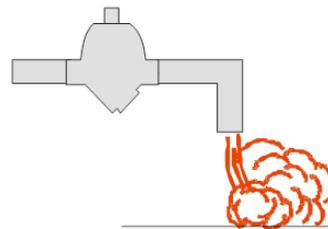
Subdimensionada



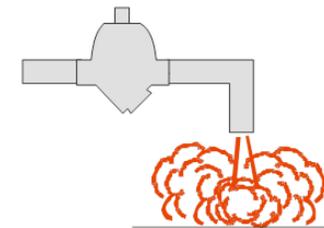
Correcto



Correcto



Pérdida directa de vapor pequeña



Pérdida directa de vapor grande

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

#### PRINCIPIOS DE MANTENIMIENTO DE TRAMPAS:

- ✓ Una trampa fallando abierta fuga de 10 a 25 kg/h
- ✓ El 20 % de las trampas de las refinerías fallan abiertas
- ✓ Con un buen mantenimiento se pueden reducir al 5%
- ✓ Métodos de testeo: visual, ultrasónico, de temperatura, de conductividad
- ✓ Para servicios de baja presión se deben testear de 1 a 4 veces por año; para alta presión, de 3 a 5. Si corresponde, cambiar o reemplazar las partes principales
- ✓ Equipamiento de monitoreo debe ser abordado por los proveedores
- ✓ Trabajo con el proveedor para la instalación y selección

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

#### CÁLCULO DE FUGA DE VAPOR:

$$\dot{m}_{fuga} = d^2 \cdot p \cdot 0.41$$

donde  $d$  es el diámetro del orificio [mm],  $p$  es la presión diferencial [bar] y 0.41 es un factor tal que el resultado de la ecuación es [kg/h]. Las trampas que tienen pérdidas de vapor también descargan condensado y no todos quedan abiertos totalmente, por lo cual consideramos que pierden la cuarta parte del valor calculado.

Así, una trampa de 1/2" con un orificio de 4 mm, trabajando a 10 bar(r) y con una contrapresión de 2 bar(r) fuga alrededor de 13 kg/h. A 24\*7\*350, representan más de 109 t/año de vapor.

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.2. Características de la distribución: trampas de vapor

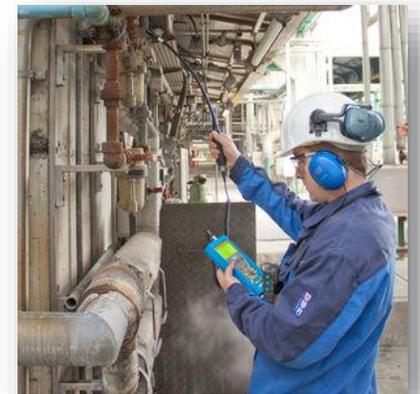
#### DETECCIÓN DE FUGAS EN PURGADORES:

Por ultrasonidos

- ✓ Se requiere experiencia
- ✓ Puede utilizarse para detectar fugas en otros elementos y otros fluidos

Sistemas comerciales

- ✓ No se requiere experiencia
- ✓ Sólo utilizable en trampas
- ✓ Necesita montar una cámara delante de la trampa o instalar trampas que ya la incorporan



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.3. Fugas y venteos

Las fugas ocurren:

- ✓ Típicamente en líneas, válvulas, juntas, cabezales y turbinas
- ✓ Debido a deficiencias de mantenimiento

Las venteos:

- ✓ Son operativos
- ✓ Muchas veces son necesarios, aunque no siempre en la cantidad venteada
- ✓ En general, no suele haber medición o control de los mismos

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.3. Fugas y venteos

Existen métodos y estimaciones del vapor venteado en función de la altura de la pluma y presión del vapor. Si bien son estimados, resultan muy útiles para determinar el orden de magnitud de la fuga.

Una de las condiciones es que solamente se debe considerar el tramo recto de la pluma (no la *nube*). Ciertos métodos logran corregir por temperatura ambiente; los resultados divergen cuando se consideran alturas superiores a 2 m.

## H.3. DISTRIBUCIÓN

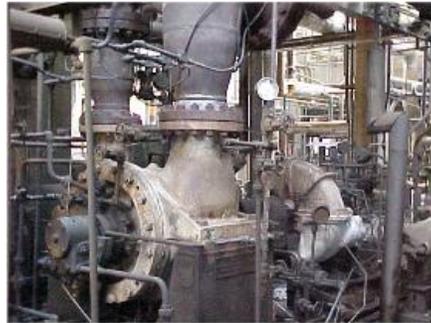
### H.3.3. Fugas y venteos



Condensadores de superficie de turbinas a condensación: 1.6 t de FO equiv/día

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.4. Aislamientos



INEFICIENCIA



AISLAMIENTO  
CORRECTO

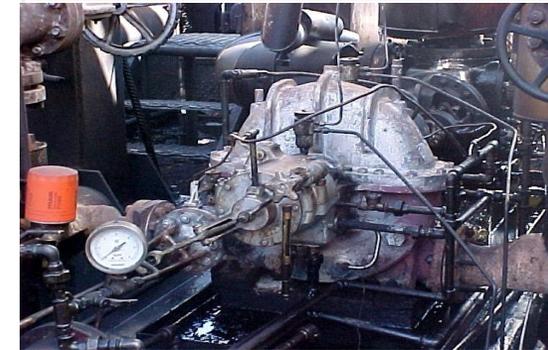


## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.4. Aislamientos



INEFICIENCIA



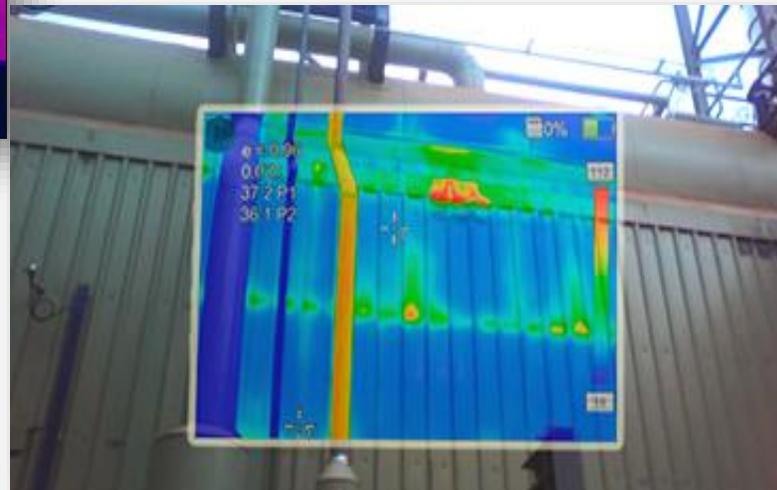
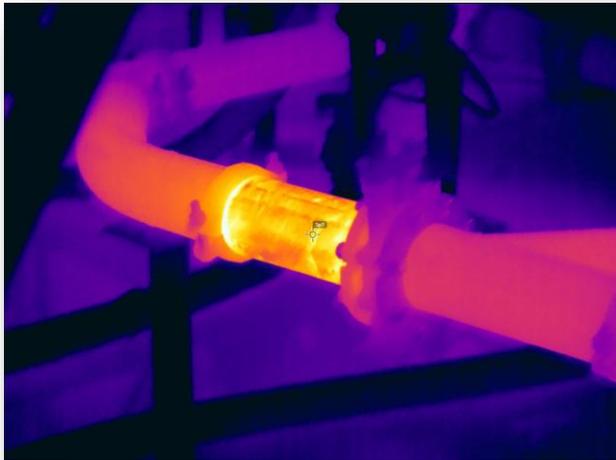
AISLAMIENTO  
CORRECTO



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.4. Aislamientos

CHEQUEO



## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.4. Aislamientos: estimación del costo de disipación

Diámetro	p = 8 bar Sin aislamiento [euros/m/mes]	p = 8 bar Con aislamiento (eficacia de 80 %) [euros/m/mes]	p = 12 bar Sin aislamiento [euros/m/mes]	p = 8 bar Con aislamiento (eficacia de 80 %) [euros/m/mes]
¾"	3.43	0.69	4.51	0.90
1"	4.15	0.83	5.53	1.11
1 ¼"	5.11	1.02	6.73	1.35
1 ½"	5.71	1.14	7.57	1.51
2"	7.03	1.41	9.32	1.86
2 ½"	8.29	1.66	11.00	2.20
3"	9.92	1.98	12.92	2.58
4"	12.5	2.5	16.89	3.38

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.5. Laminaciones

En todo sistema que tenga 2 o más niveles de vapor habrá una estación de regulación de presión o válvulas laminadoras entre cada nivel

Las laminadoras deben existir como parte de la flexibilidad operativa

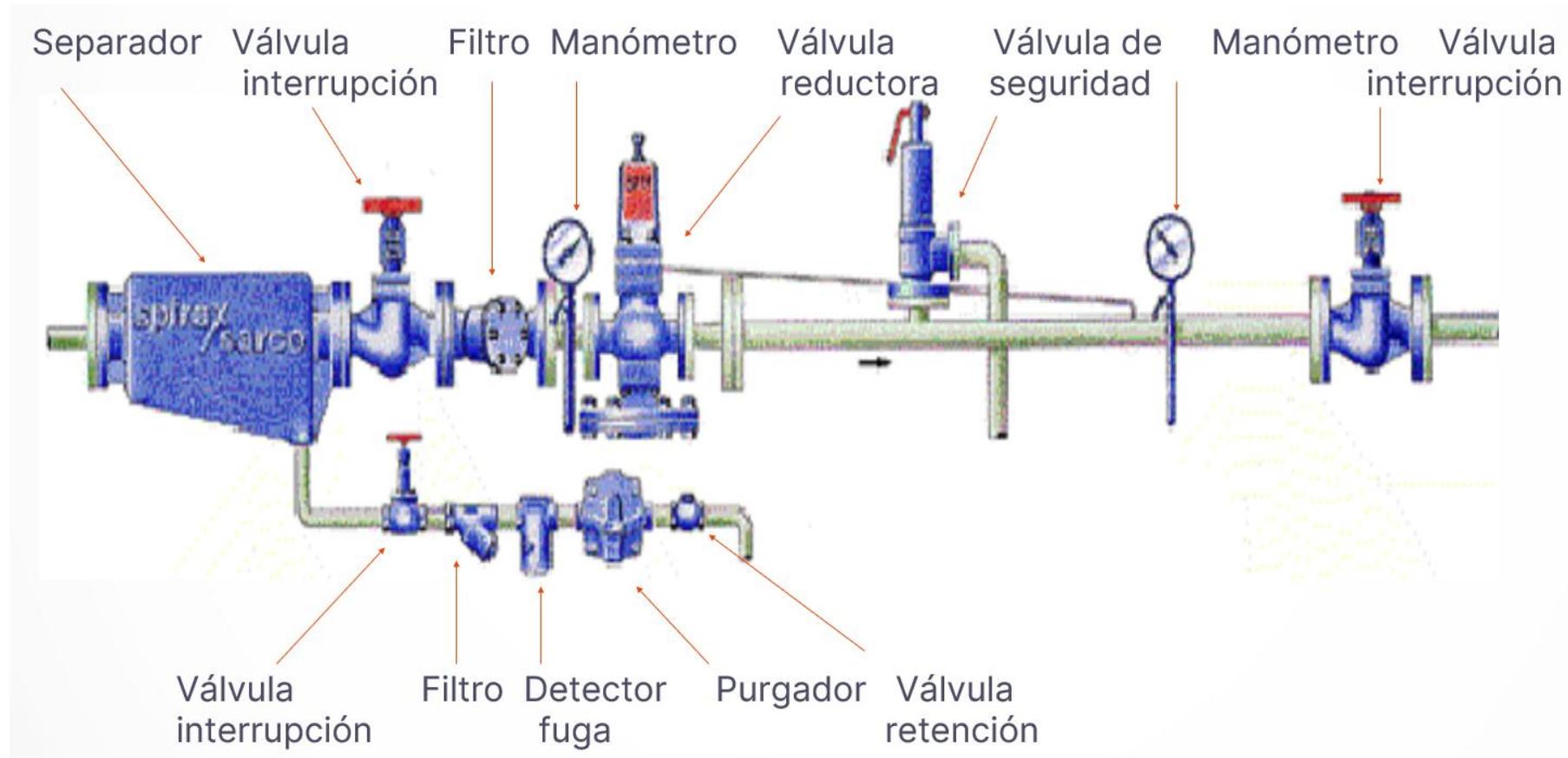
Pero...

**...DEBEN SER MÍNIMAS!!**

El vapor que pasa por las válvulas laminadoras es energía que se degrada y que podría aprovecharse para generar trabajo mecánico o potencia eléctrica

## H.3. DISTRIBUCIÓN

### H.3.5. Laminaciones



# H.4. CONSUMOS

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

¿EN DÓNDE SE USA EL VAPOR? Los usos principales son:

- ✓ Fuerza motriz: accionamiento de equipos (bombas, compresores), en redes de vapor (aprovechamiento energético de saltos de presión) y en la producción de electricidad.
- ✓ Medio de transferencia de calor: para calentar y/o evaporar una corriente o producto.
- ✓ Vapor de procesos: como insumo o materia prima en un proceso, stripping (separación de componentes de una corriente líquida), fundir, esterilizar, secar, humidificar, cocinar, lavar, planchar, entre otros.
- ✓ Recuperación del condensado

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### VAPOR DE PROCESOS: VAPOR DE STRIPPING

Tiene como fin ayudar a la vaporización de los componentes más volátiles debido a una disminución de la presión parcial de la mezcla. Presenta las siguientes características:

- ✓ No actúa por calentamiento, pero debe tener una buena temperatura para no enfriar la columna.
- ✓ Se debe seleccionar la presión de vapor adecuada, según la presión de la columna.
- ✓ Valores recomendados para destilación atmosférica de crudo: de 5 a 10 kg de vapor/m<sup>3</sup> de producto; de 24 a 30 kg de vapor/m<sup>3</sup> de residuo.
- ✓ El exceso tiene dos efectos negativos: enfría la columna (con caída de rendimiento y posterior mayor consumo en horno de carga) y disipa vapor innecesariamente.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### VAPOR DE PROCESOS: VAPOR DE CALEFACCIÓN

- ✓ Se recomienda determinar la real necesidad de calefacción, en función de la temperatura ambiente y la requerida en línea o por el tanque en cuestión.
- ✓ Es importante, aunque no siempre sucede, contar con medición y regulación del vapor de calefacción. «Si no se mide, no se puede mejorar» (William Thomson, Lord Kelvin).
- ✓ Revisar el diseño (presión, temperatura y presión diferencial) al momento de sumar nuevos requerimientos sobre el mismo servicio; si el vapor condensa antes de lo necesario no se cumplirá con el objetivo de temperatura y seguramente consumirá más.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### VAPOR DE PROCESOS: VAPOR A ANTORCHAS

Tiene como fin ayudar a la vaporización de los componentes más volátiles debido a una disminución de la presión parcial de la mezcla. Presenta las siguientes características:

- ✓ La norma API 521 determina el caudal mínimo de vapor requerido en función del peso molecular del gas quemado para que la antorcha no humee.
- ✓ Para su regulación, es necesario disponer de medición de caudal de gas a antorcha (mermas de producto) y vapor (disipación de energía), además de una buena estimación del peso molecular del gas.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### VAPOR DE PROCESOS: VAPOR A ANTORCHAS



## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### VAPOR DE PROCESOS: RECOMENDACIONES

En general el vapor de procesos es una salida o consumo, a suministrar por la caldera y por ello es importante:

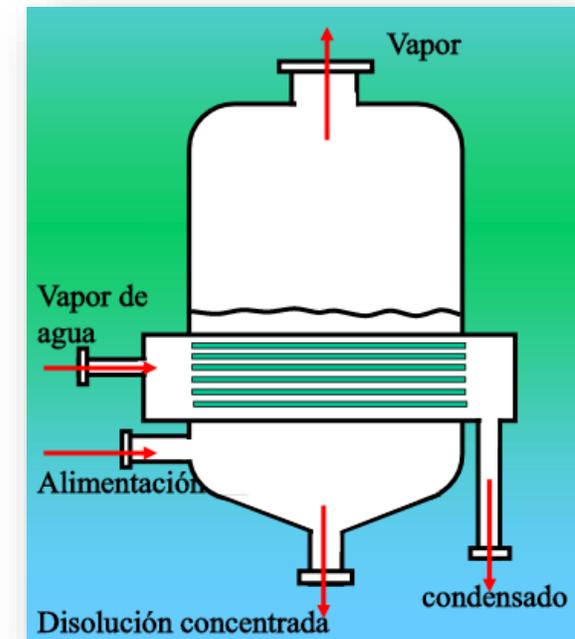
- ✓ Analizar el proceso según norma, buenas prácticas y/o condiciones de diseño.
- ✓ En caso de que una parte importante del vapor generado en las calderas sea consumido como «vapor de procesos», es recomendable contar con mediciones.
- ✓ Que sea un consumo no quiere decir que no se pueda *optimizar*.
- ✓ Los procesos que requieren «vapor de procesos» deben ser estudiados de manera ad hoc, debido a que presentan particularidades que pueden guiarlo a un mejor consumo.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### TRANSFERENCIA DE CALOR (CONDENSACIÓN DE VAPOR)

- ✓ En un recipiente con un producto calentado con vapor a través de un serpentín, el vapor se condensa cediendo su entalpía de evaporación a la pared metálica de dicho serpentín, el cual la transfiere al producto.
- ✓ A medida que el vapor se condensa se forma agua que debe ser drenada.



## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

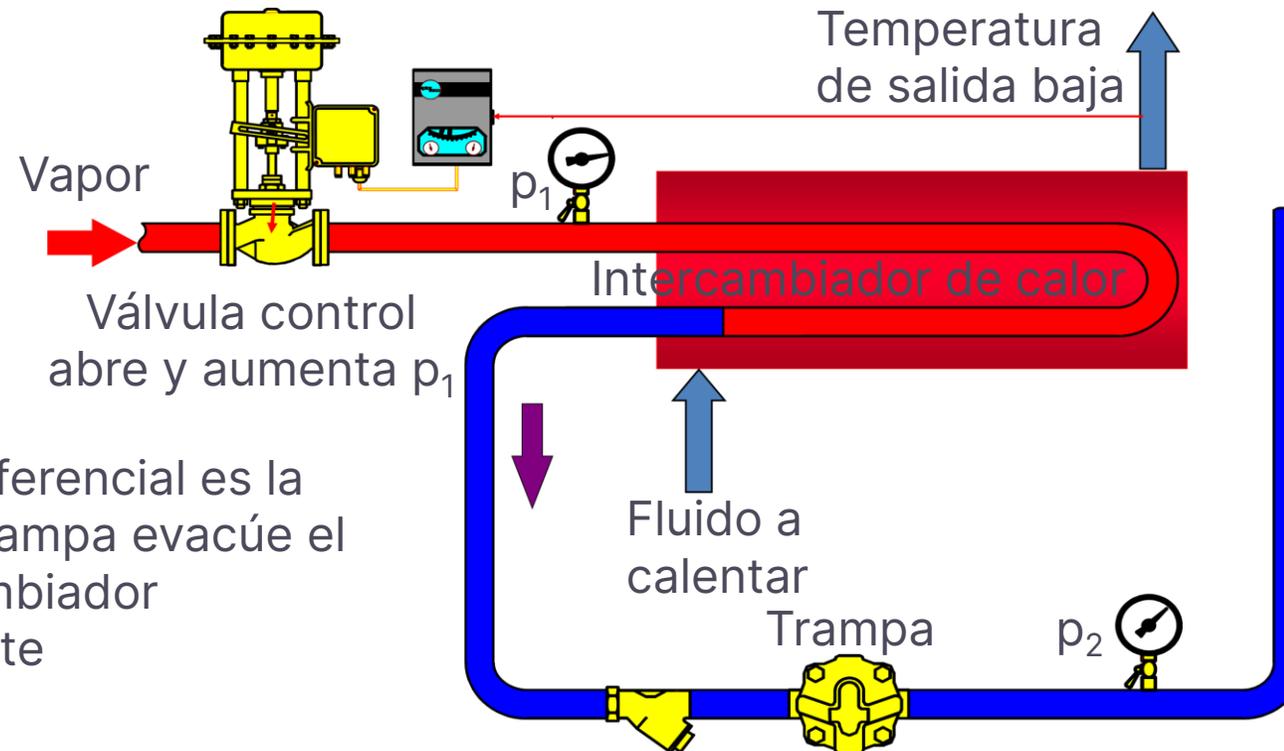
#### ELIMINACIÓN DE CONDENSADO EN INTERCAMBIADORES DE CALOR

- ✓ Muchos procesos utilizan como medio de calentamiento la transferencia de calor del vapor a otro fluido, empleando para ello **intercambiadores de calor**.
- ✓ Cuando el vapor cede calor se forma condensado que se drena a través de una trampa.
- ✓ Los problemas más frecuentes suelen ser:
  - Temperaturas inestables
  - Corrosión excesiva
- ✓ Este condensado puede provocar ruido y daños en los equipos por golpes de ariete
- ✓ La principal causa de estos problemas es una eliminación del condensado deficiente.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

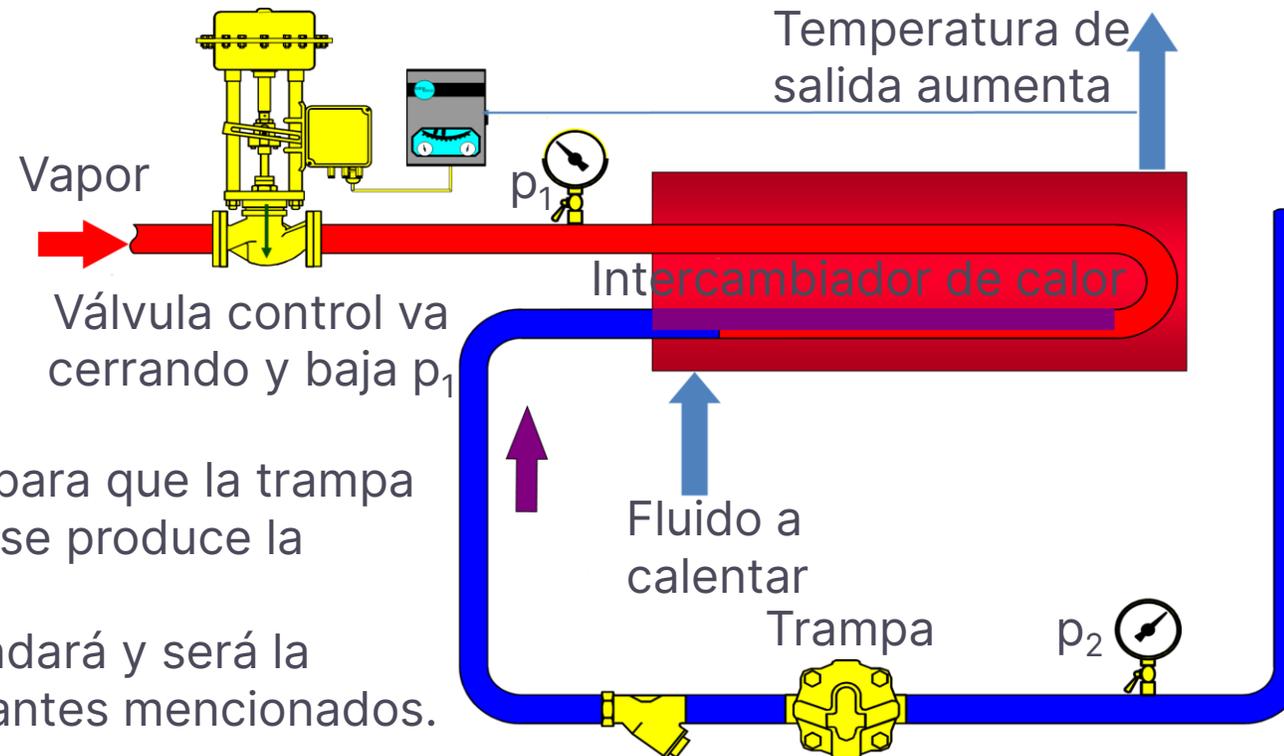


Si  $p_1 > p_2$  y la presión diferencial es la suficiente para que la trampa evacúe el condensado, el intercambiador funcionará correctamente

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR



Si  $p_1 - p_2$  es insuficiente para que la trampa evacúe el condensado y se produce la *interrupción del flujo*. El intercambiador se inundará y será la causa de los problemas antes mencionados.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### CONTRAPRESIÓN EN TRAMPAS DE VAPOR

La presión en la línea de condensados (**contrapresión en las trampas**) es igual a:

Presión hidrostática (altura manométrica)

+

Resistencia por rozamiento al paso del fluido (pérdida de carga de la cañería)

La capacidad de descarga de las trampas depende de la **Presión Diferencial**, la cual es:

Presión entrada – Contrapresión

Cuando no hay suficiente diferencial de presión, no se puede recuperar el condensado y por ello se instala una bomba hidráulica mecánica (no accionada por electricidad o a explosión).

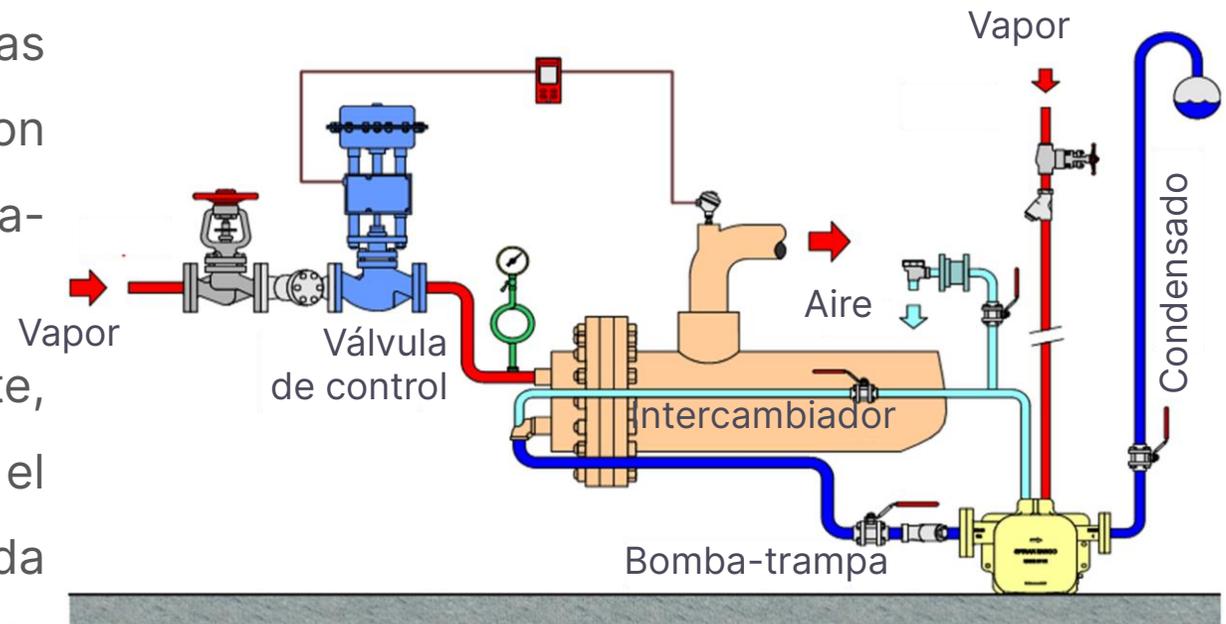
## H.4. CONSUMOS

### H.4.1. Usos del vapor

#### ¿CÓMO EVITAR LA INUNDACIÓN EN LOS INTERCAMBIADORES?

Los problemas de inundación en sistemas de intercambio de calor se resuelven con la instalación de un sistema bomba-trampa, accionado por vapor.

Cuando hay presión diferencial suficiente, actúa como trampa; cuando no la hay, el mecanismo de bombeo permite la entrada de vapor, que impulsa el condensado a la cañería de retorno.



## H.4. CONSUMOS

### H.4.2. Reboilers

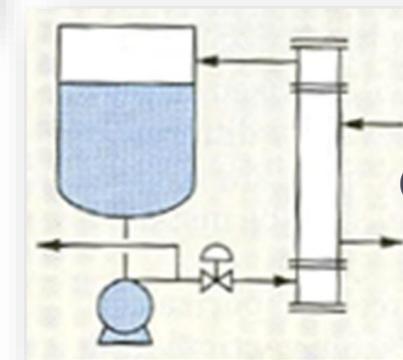
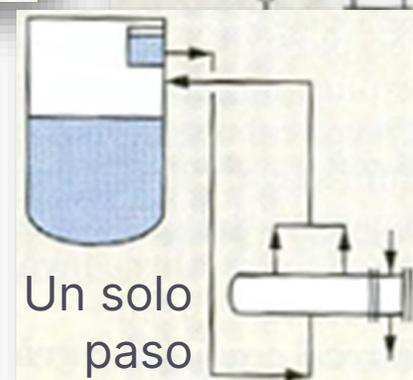
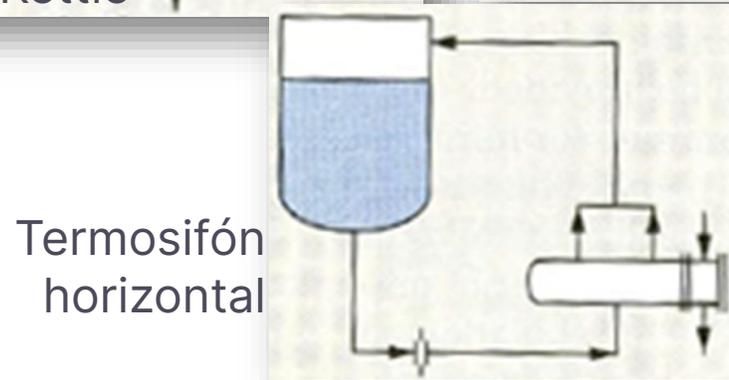
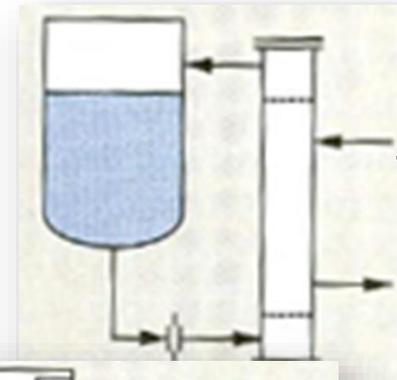
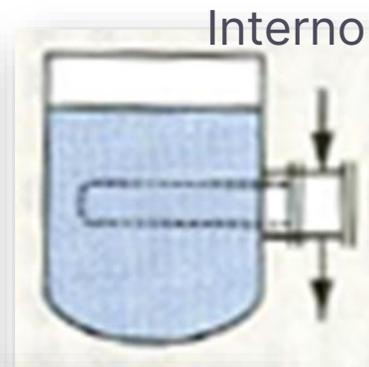
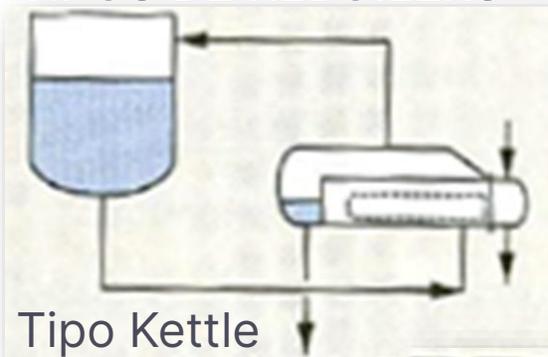
Un reboiler es un intercambiador de calor que se emplea para calentar el líquido de interés. Normalmente se emplea vapor de agua como flujo que cede calor al fluido a calentar. Este se hace pasar por los tubos y la temperatura de salida de la corriente de líquido al que se ha transferido calor se suele controlar con una sonda. El caudal de vapor se regulará en función de que la temperatura sea inferior o superior a la deseada.

En las torres de destilación, los reboilers se sitúan en los fondos para calentar la mezcla líquida que va a ser destilada.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.2. Reboilers

#### TIPOS DE REBOILERS:



## H.4. CONSUMOS

### H.4.2. Reboilers



Interno



Termosifón vertical

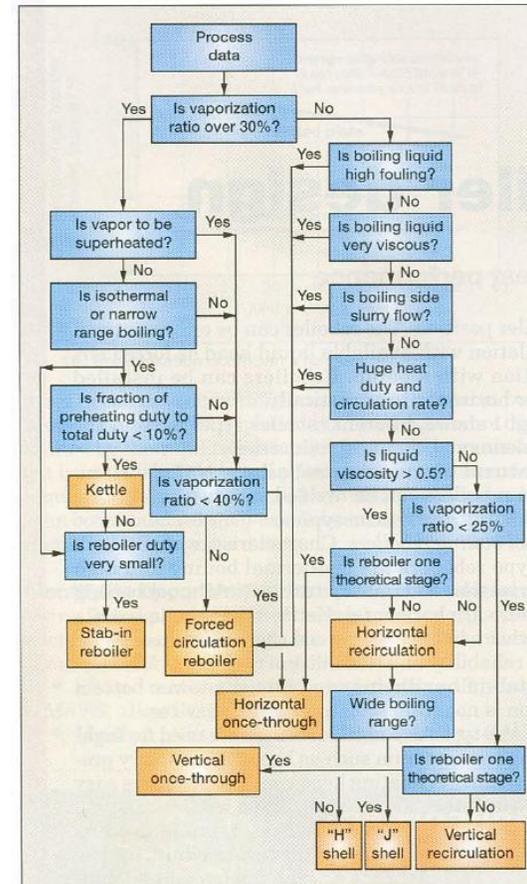


Termosifón horizontal

## H.4. CONSUMOS

### H.4.2. Reboilers

#### PROCESO DE SELECCIÓN:



## H.4. CONSUMOS

### H.4.2. Reboilers

#### CARACTERÍSTICAS:

- ✓ Utilizar preferentemente vapor saturado. El vapor sobrecalentado genera una zona seca cerca de la placa portatubos, que puede ocasionar rotura de estos.
- ✓ Evitar el subenfriamiento del condensado, que demanda gran área de baja transferencia.
- ✓ Se recomienda instalar una trampa de vapor para un mejor aprovechamiento energético.
- ✓ Usar baja presión siempre que sea posible, excepto si proviene de vapor de media presión laminado.
- ✓ En el diseño, considerar el diferencial de presión de la válvula reguladora de caudal.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.2. Reboilers

#### OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN LAS TORRES DE DESTILACIÓN:

Existen diferentes alternativas de ahorro de energía, tanto en el reboiler como en el condensador:

- ✓ Optimización del caudal de reflujo
- ✓ Acondicionamiento de la temperatura de alimentación
- ✓ Ubicación de la alimentación
- ✓ Enfriamientos/calentamientos laterales

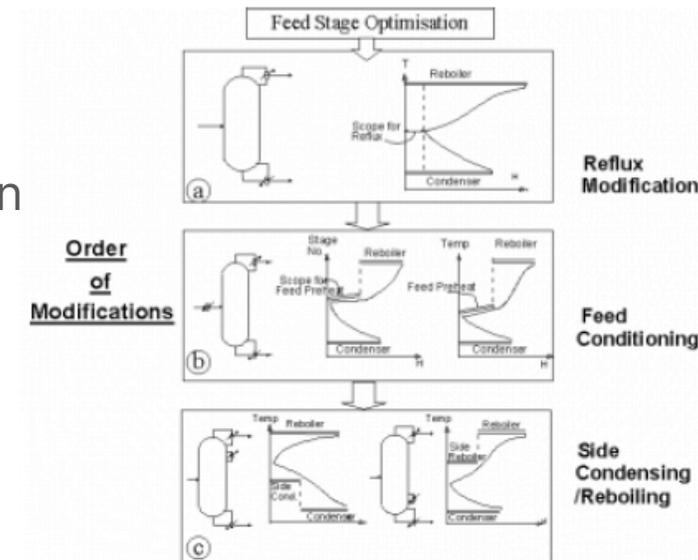


Figure 2: Using Column Grand Composite Curve to identify column modifications

## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Recuperación de condensado

La recuperación del condensado es un proceso que reutiliza el agua y el calor sensible contenidos en el condensado descargado. Se usa para:

- ✓ Obtener agua caliente de alimentación
- ✓ Precalentamiento
- ✓ Disponer de vapor a menor presión
- ✓ Agua caliente para otros usos

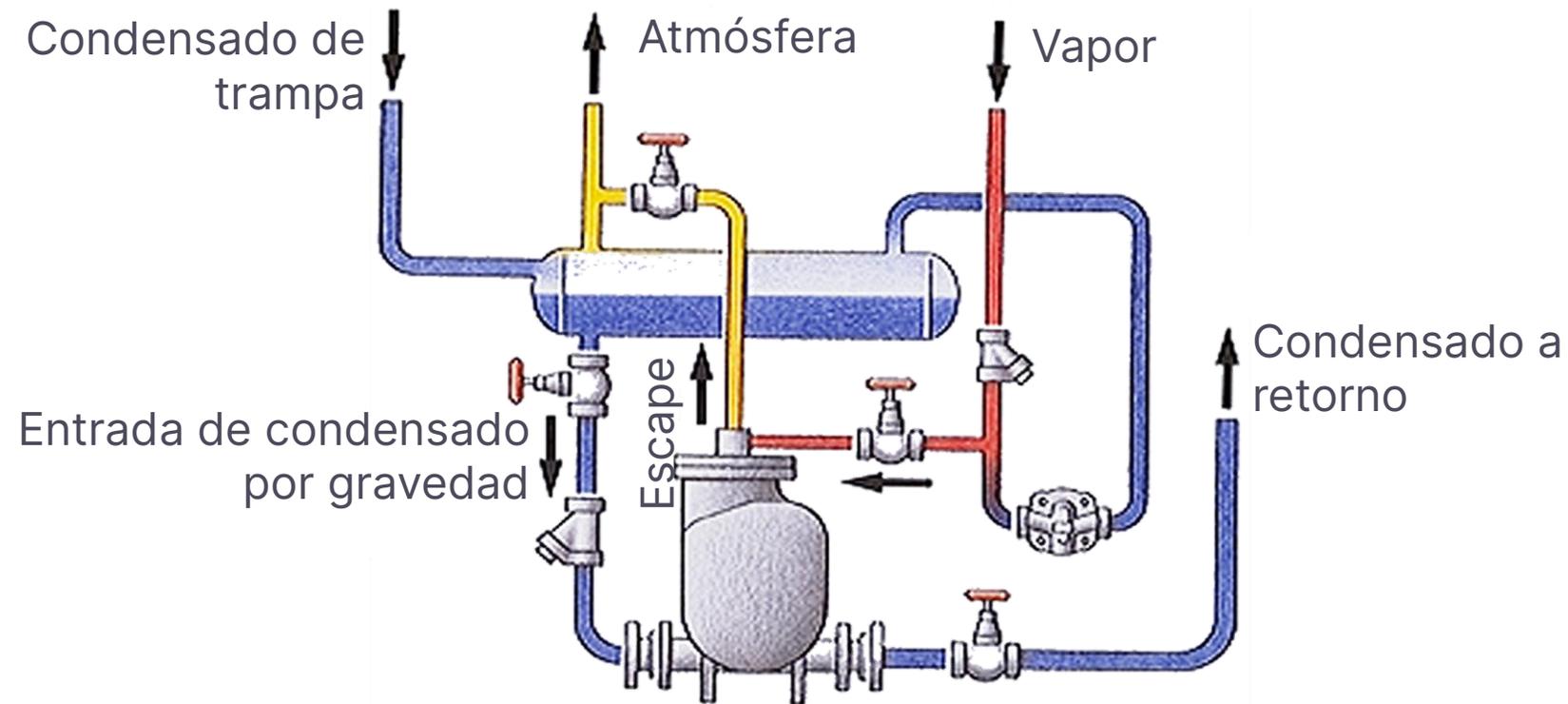
Los principales beneficios son:

- ✓ Reducción de costos de combustibles
- ✓ Disminución de gastos relacionados con agua
- ✓ Impactos positivos en seguridad y ambiente

## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Recuperación de condensado

#### INSTALACIÓN DE BOMBAS ACCIONADAS POR VAPOR



## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Recuperación de condensado

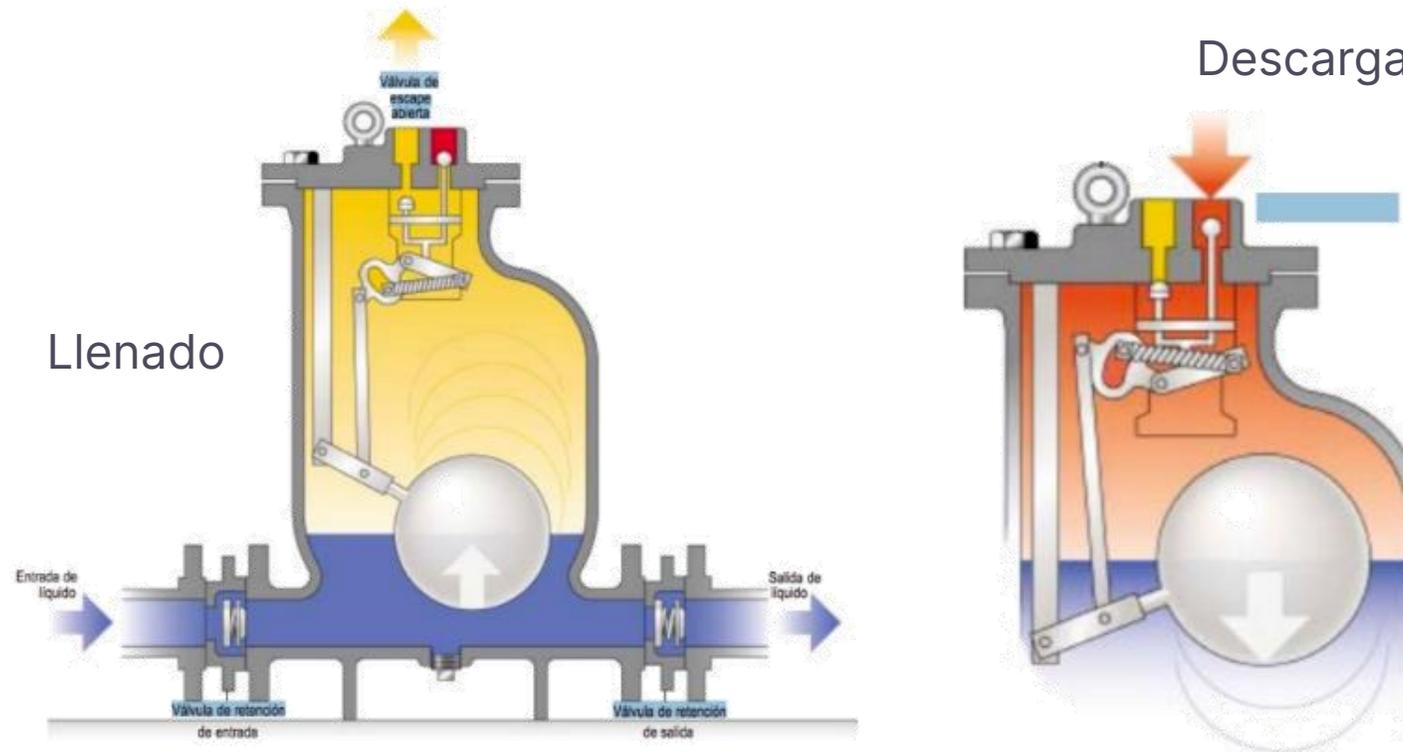
#### BENEFICIOS DE LAS BOMBAS DE CONDENSADO MECÁNICAS

- ✓ Elimina el condensado bajo todas las condiciones de carga, incluso vacío.
- ✓ No necesita potencia eléctrica (accionada con vapor o aire).
- ✓ Especialmente adecuada para lugares peligrosos.
- ✓ Eliminación de problemas de cavitación reduciendo mantenimiento.
- ✓ No hay sellos mecánicos o estopadas por donde pueda fugar.
- ✓ Disponible en una gama de materiales, tamaños y conexiones para adaptarse a una gran variedad de aplicaciones.

## H.4. CONSUMOS

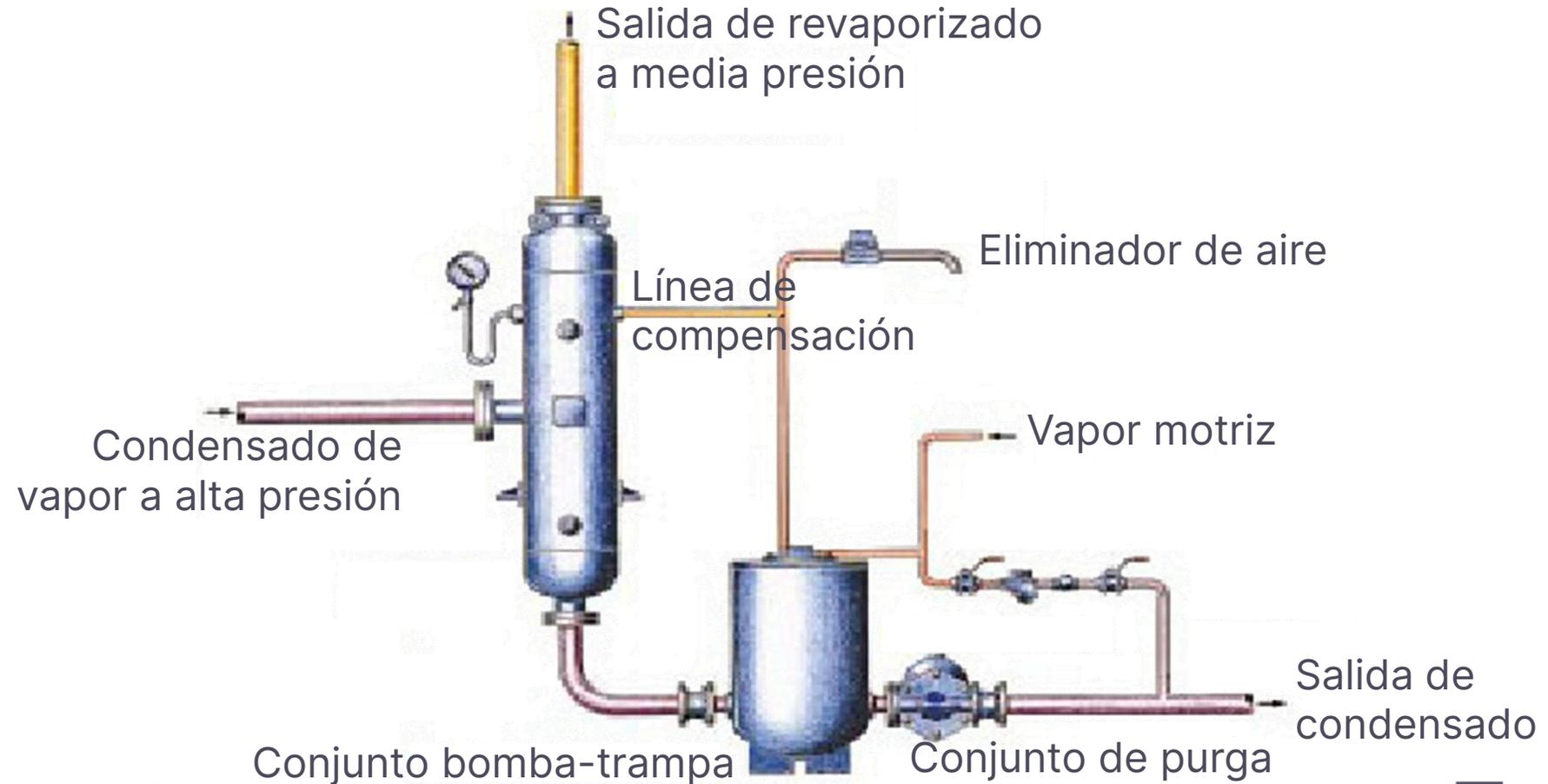
### H.4.3. Recuperación de condensado

#### FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS DE CONDENSADO ACCIONADAS POR VAPOR



## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Recuperación de condensado

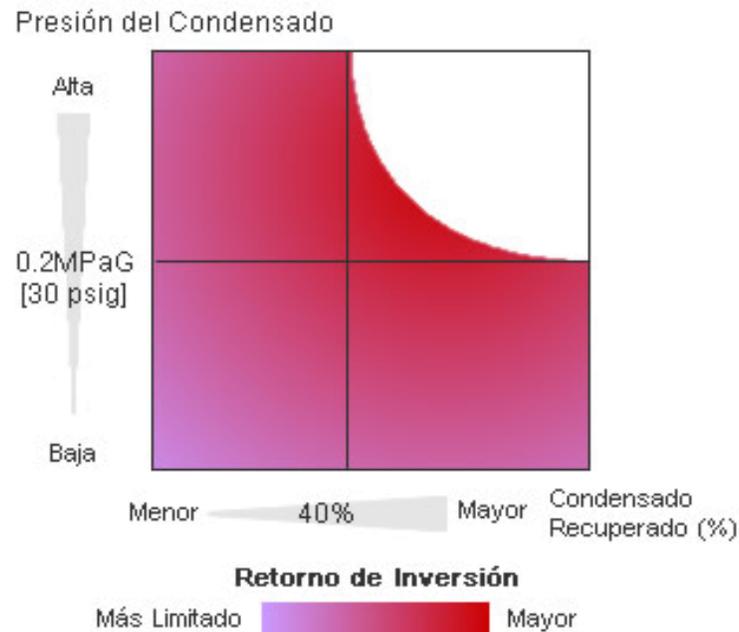


## H.4. CONSUMOS

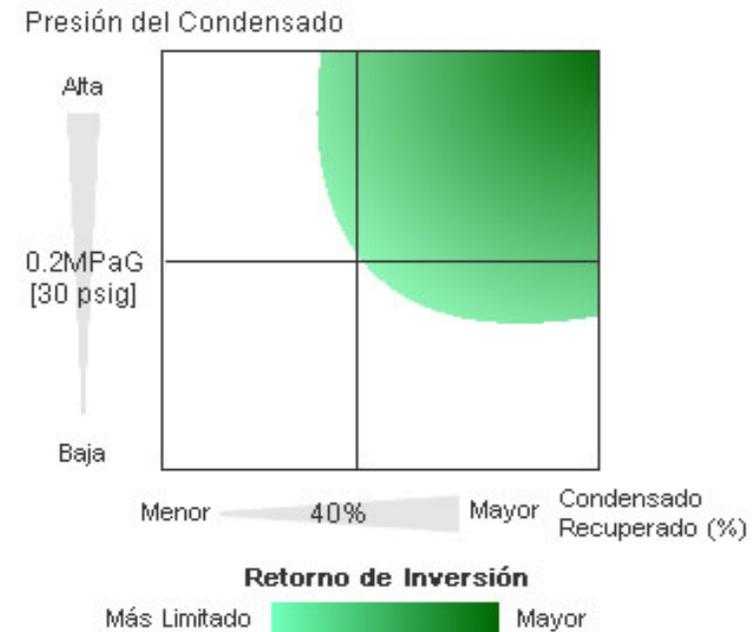
### H.4.3. Recuperación de condensado

¿CONVIENE VENTEAR O PRESURIZAR?

**Sistema de Recuperación Venteado**

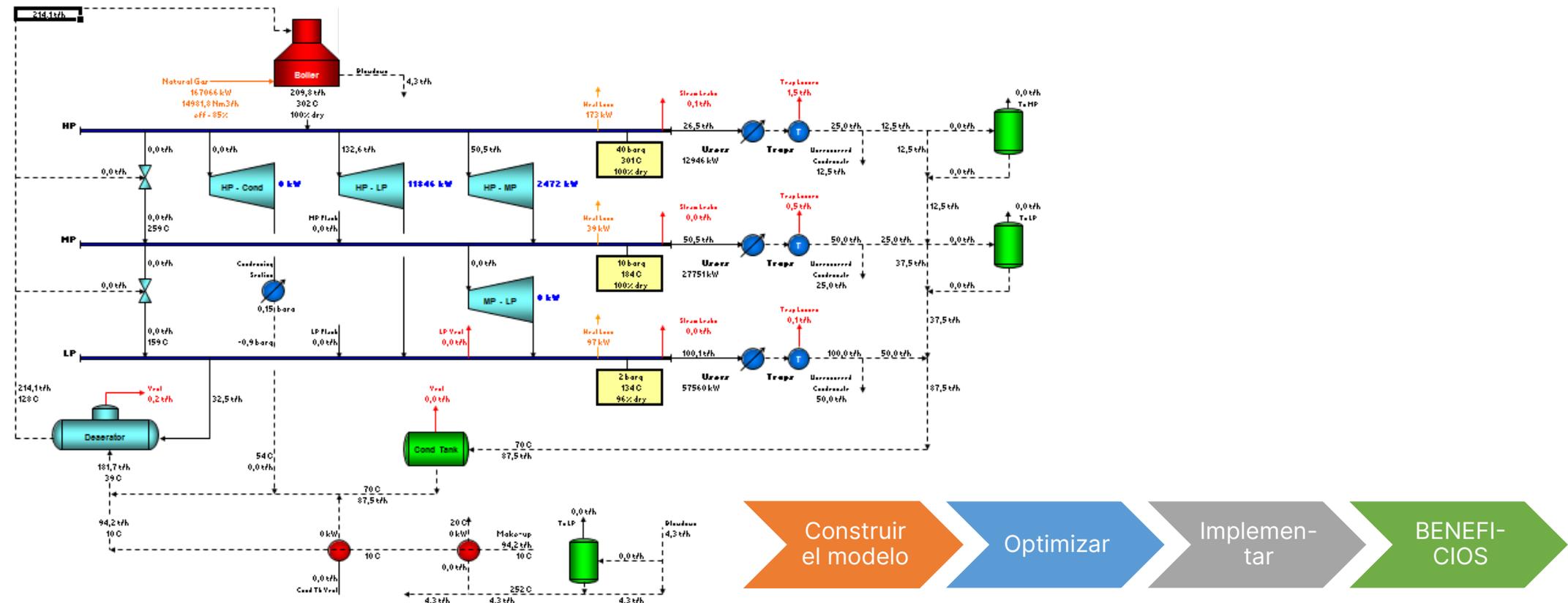


**Sistema de Recuperación Presurizado**



## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes



## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes

#### Objetivos

- Optimizar el sistema de vapor.
- Analizar diferentes alternativas de operación.

#### Modalidad de utilización

- En línea, conectado con el sistema de información de plantas.
- Fuera de línea.

#### Aplicaciones

- Optimización operativa.
- Evaluación de alternativas de operación. Modificación o nuevo equipamiento.
- Desarrollar estrategias de operación (por ejemplo, para paradas de planta).

#### Softwares disponibles en el mercado

- Visual Mesa (Soteica).
- Prosteam (KBC - Yokogawa).
- SSAT (US DOE).

## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes. Caso USDOE

Construir  
el modelo

Optimizar

Implemen-  
-tar

BENEFI-  
CIOS

## Steam Modeler

[Overview](#)

[Create Base Model](#)

[Reload Model](#)

## Using the Steam System Modeler

[watch tutorial](#)

[view guide](#)

### Step 1: Generate a Base Model

There are 3 ways to generate a Base Model:

- Manually enter specific steam system details [\[link\]](#)
- Load an example [\[below\]](#)
- Reload a previously downloaded model [\[link\]](#)

### Step 2: Generate an Adjusted Model

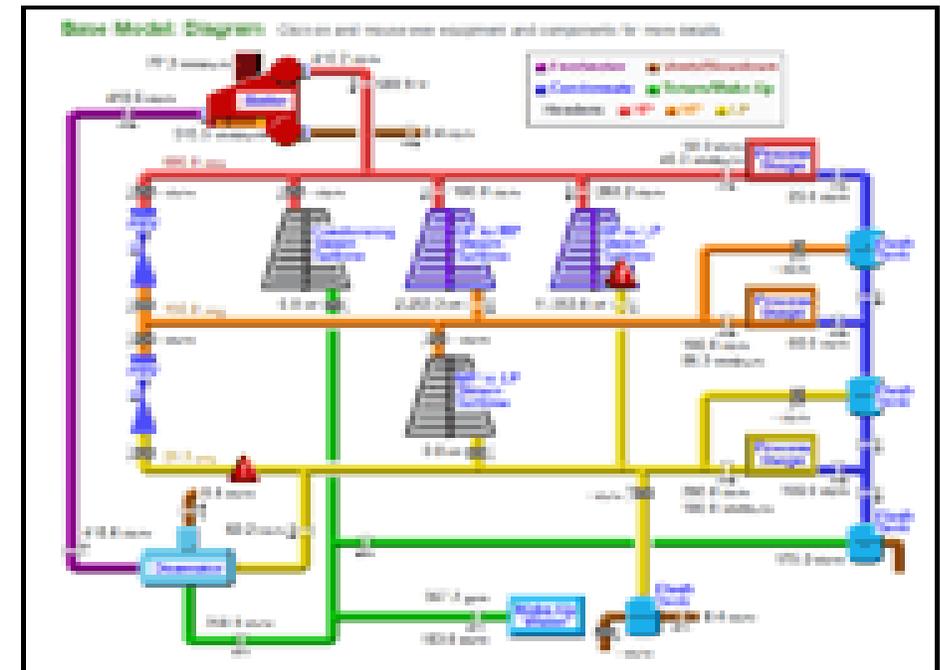
A series of projects and system adjustments may be selected and combined with the Base Model to generate an Adjusted Model.

### Step 3: Compare Base Model to Adjusted Model

A summary of Base Model vs Adjusted Model metrics will be generated once both a Base Model and Adjusted Model have been created.

A generated model may also be downloaded as an excel file and re-uploaded later.

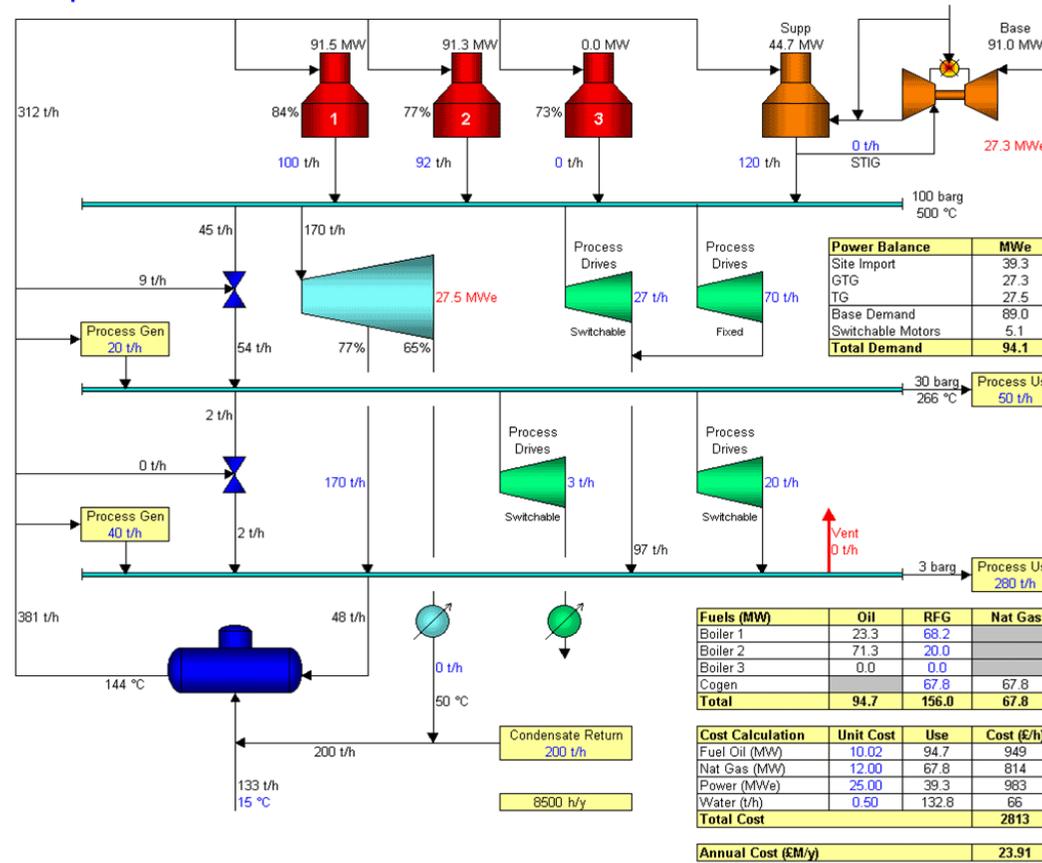
<https://www.energy.gov/eere/amo/articles/steam-system-modeler>



# H.4. CONSUMOS

## H.4.3. Modelado de redes.

Optimised Operation



## H.4. CONSUMOS

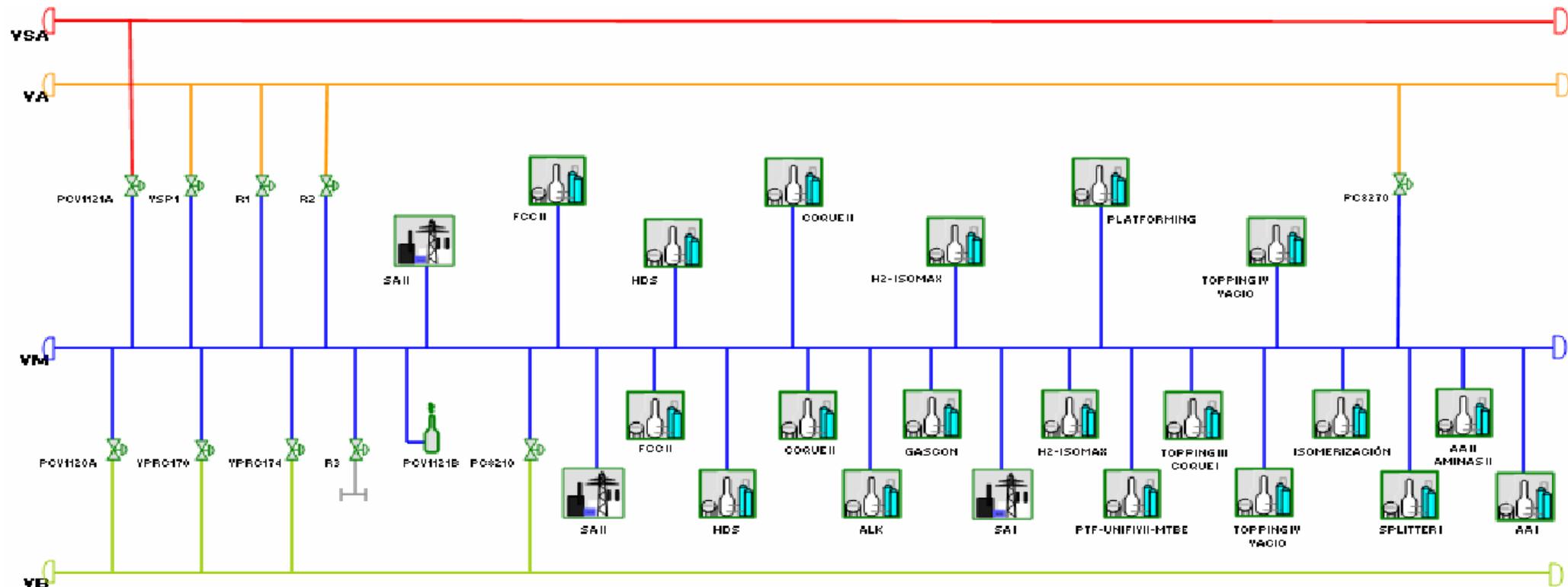
### H.4.3. Modelado de redes.

Construir  
el modelo

Optimizar

Implemen-  
-tar

BENEFI-  
CIOS



## H.4. CONSUMOS

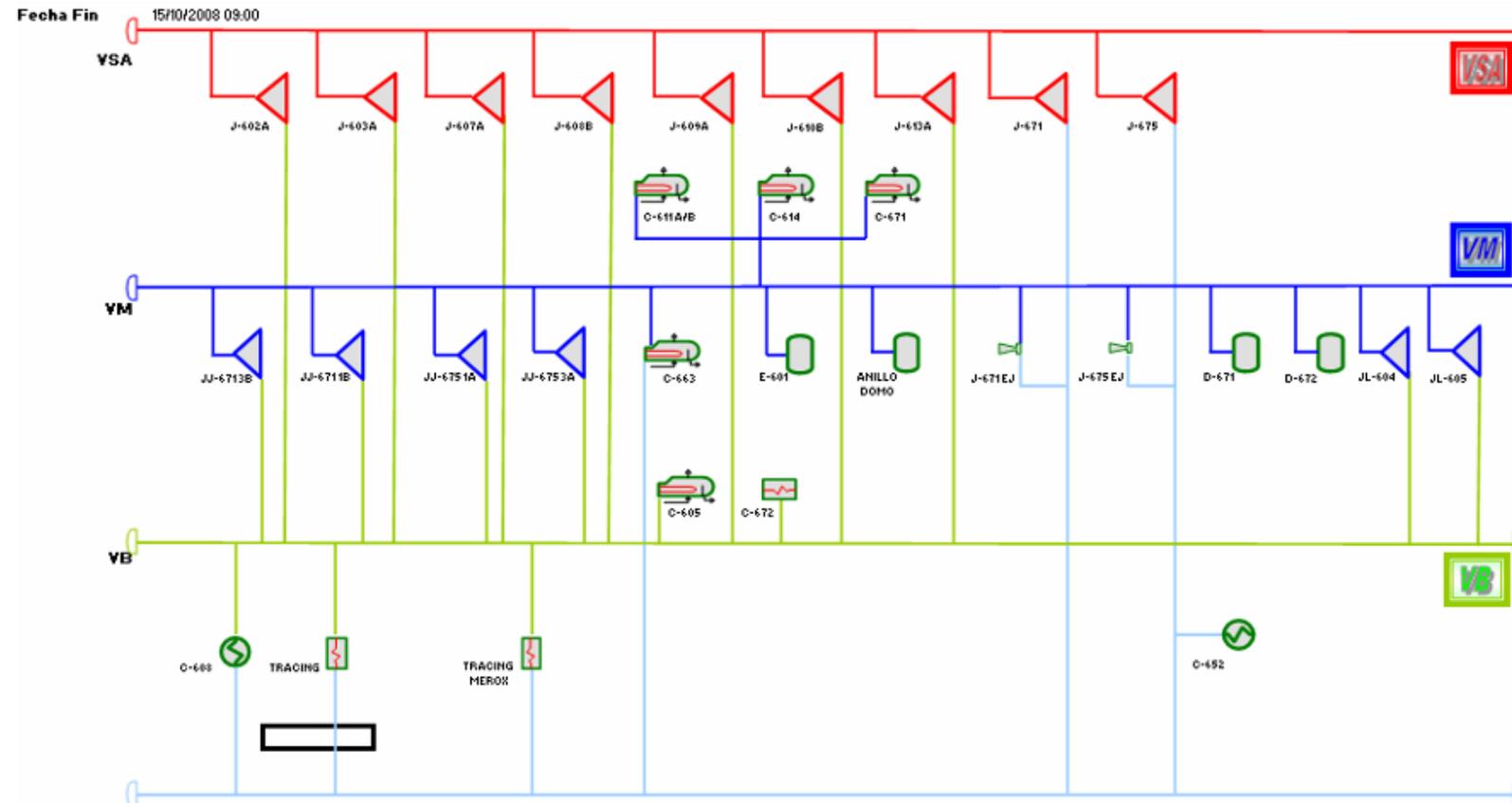
### H.4.3. Modelado de redes.

Construir  
el modelo

Optimizar

Implemen-  
-tar

BENEFI-  
CIOS



## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes.



### OPTIMIZACIÓN

Un modelo matemático de optimización, brinda recomendaciones acerca de cómo operar el sistema para alcanzar:

- ✓ Mínimo económico
- ✓ Mínimo teórico
- Variables de Optimización son aquellas variables donde se tiene una elección relativamente libre sobre el valor que puede tener.
- Variables de Restricción son aquellas variables que no pueden ser elegidas libremente por el optimizador pero deben ser limitadas por razones prácticas de operación.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes.



### IMPLEMENTACIÓN

Una vez implementados los cambios sugeridos por el modelo se puede volver a correr la optimización y debería aparecer un potencial de mejora muy bajo. Para ello:

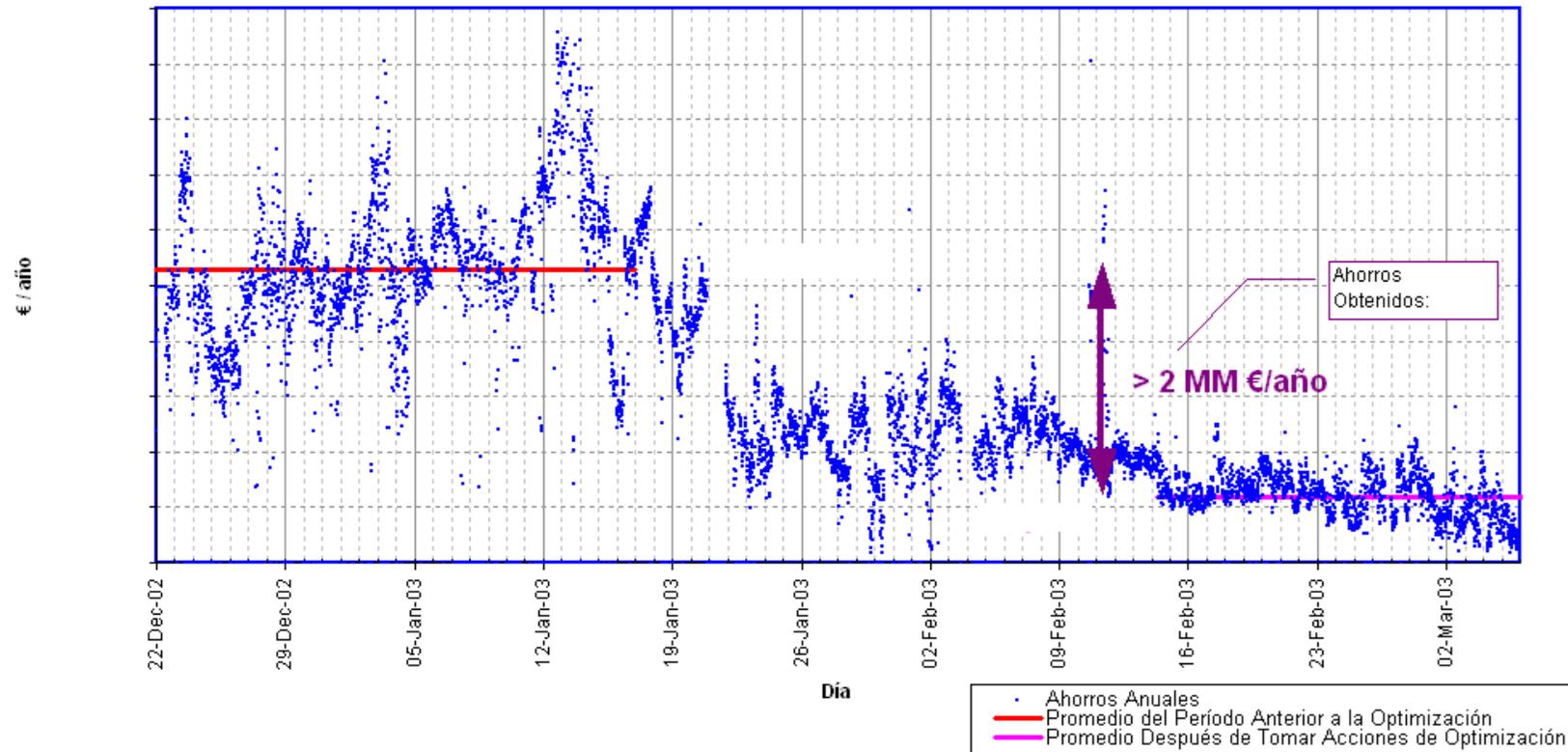
- ✓ Deben definirse como libres las variables que efectivamente se pueden modificar.
- ✓ Buscar de implementar conjuntamente todos los cambios sugeridos.
- ✓ Tener presente que la frecuencia del ciclo *Optimizar-Implementar* dependerá de cada instalación.
- ✓ Se deberá actualizar el modelo con todos los cambios que surjan en equipamiento y/o maniobras operativas.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes.



**Optimización Visual Mesa**  
Ahorros Anuales Predichos - Siguiendo las Sugerencias de Optimización



## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes.



### EVALUACIÓN GLOBAL DE UN SISTEMA DE VAPOR

El objetivo es asistir al usuario en:

- ✓ Desarrollar una mayor conciencia de la amplitud de las oportunidades para mejorar el sistema de vapor de su planta.
- ✓ Identificar acciones para reducir los costos asociados a la producción de vapor.
- ✓ Permitir la comparación de un sistema de vapor con las mejores prácticas de la industria.
- ✓ Comparar el sistema de vapor de varias plantas.

## H.4. CONSUMOS

### H.4.3. Modelado de redes.

#### EVALUACIÓN GLOBAL DE UN SISTEMA DE VAPOR

##### Steam System Savings Identified by Industry\*

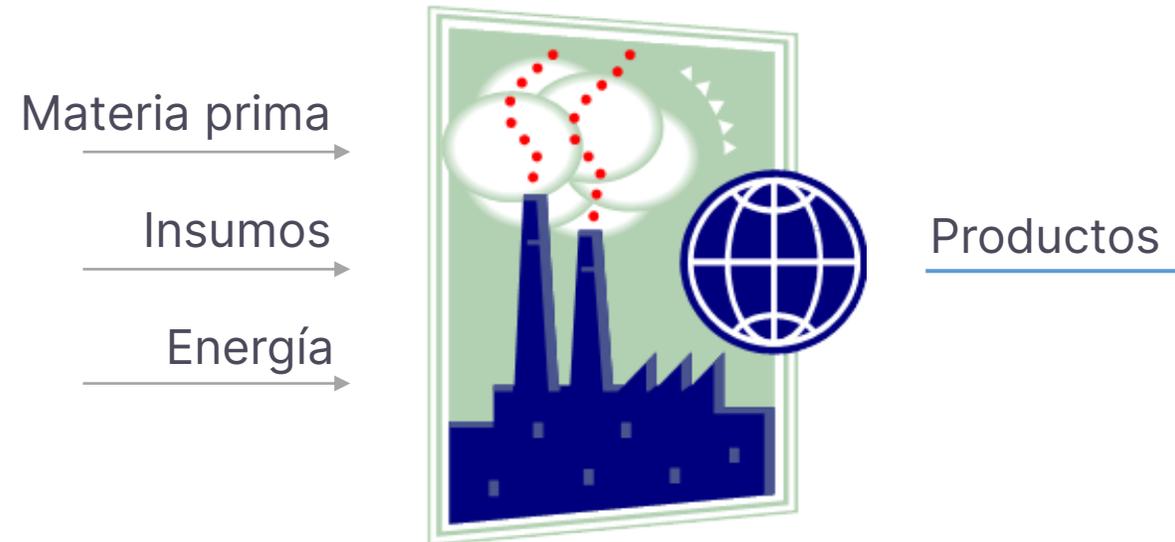
Industry (No. of Assessments)	Average Energy Savings (kWh/year)	Average \$ Savings (Annual)
Aerospace (1)	66,610	\$594,000
Agriculture (3)	150,937	\$1,221,457
Automotive (20)	136,699	\$1,090,246
Chemical (53)	492,885	\$3,378,441
Electronics (3)	68,888	\$253,803
Ethanol (4)	106,514	\$907,939
Food Processing (49)	56,685	\$712,396
Forest Products (57)	294,955	\$3,765,957
General Manufacturing (24)	74,033	\$589,625
Mining (1)	59,391	\$562,515
Petroleum (9)	531,119	\$4,959,038
Plastics (7)	241,361	\$1,484,233
Rubber (4)	100,066	\$1,475,729
Steel (6)	660,194	\$6,551,367
Textiles (6)	74,414	\$1,072,248

\* As of September 2008

# H.5. COGENERACIÓN

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones



¿Cómo cubre la industria estas necesidades? Por lo general:

- ✓ Compra electricidad de la red
- ✓ Genera, puertas adentro, su propia energía térmica
- ✓ En lo referido a requerimientos de frío, las industrias también autogeneran

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones: Sistemas No Integrados

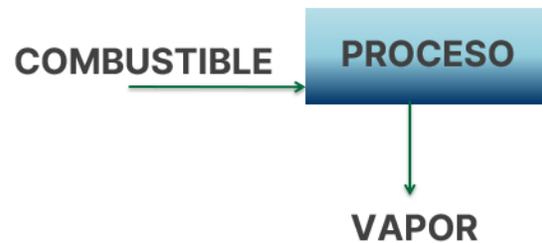
Sistemas NO integrados → MONOPROPÓSITO

Combustible a trabajo: (*Work only*)

Máquinas térmicas, motores térmicos, centrales termoeléctricas convencionales

Máquinas de combustión interna y externa

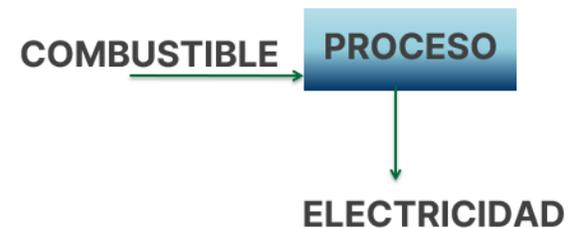
**Generación de VAPOR**



Combustible a calor: (*Heat only*)

Hornos, calderas, quemadores, entre otros

**Generación de ELECTRICIDAD**



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones: Combustible a calor

PROCESO: calderas y hornos convencionales

- ✓ Entrada de energía: combustible (gas) + aire
  - Gases de combustión
- ✓ Salida de energía: Vapor de agua saturado
  - Turbinas que operan dentro de **un rango de velocidades a contrapresión o,**
  - Turbinas a **potencia fija,** pueden trabajar a condensación, o contrapresión
- ✓ Fuente fría a 30°C aproximadamente

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones: Eficiencias típicas de sistemas no integrados

Tecnología	Eficiencia Neta Típica
Motores de ciclo Otto	30 %
Motores de ciclo Diésel	40 %
Turbinas de gas antiguas	20-30 %
Turbinas de gas modernas	30-40 % y superior
Turbinas de vapor a condensación chica	20-30 %
Turbinas de vapor subcríticas grandes	30-40 %
Turbinas de vapor supercríticas	> 40 %
Calderas Industriales	70-90 %
Generadores de vapor de centrales	88-95 %

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones: Integración de procesos

La **ineficiencia** intrínseca de los **procesos no integrados** puede ser remediado mediante la integración

#### Tipos de Integraciones

- ✓ Por encima de la aplicación energética (Topping)
- ✓ Por debajo de la misma (Bottoming)
- ✓ O por ambas formas a la vez

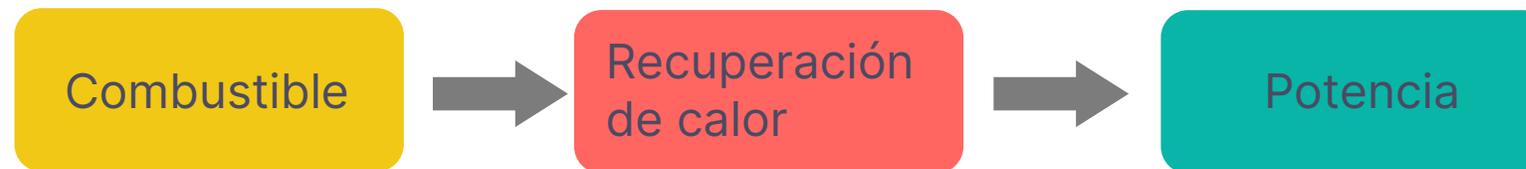
## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones: Ciclos integrados

Integración por Topping: integración por encima de la aplicación térmica (se logra mayor eficiencia):

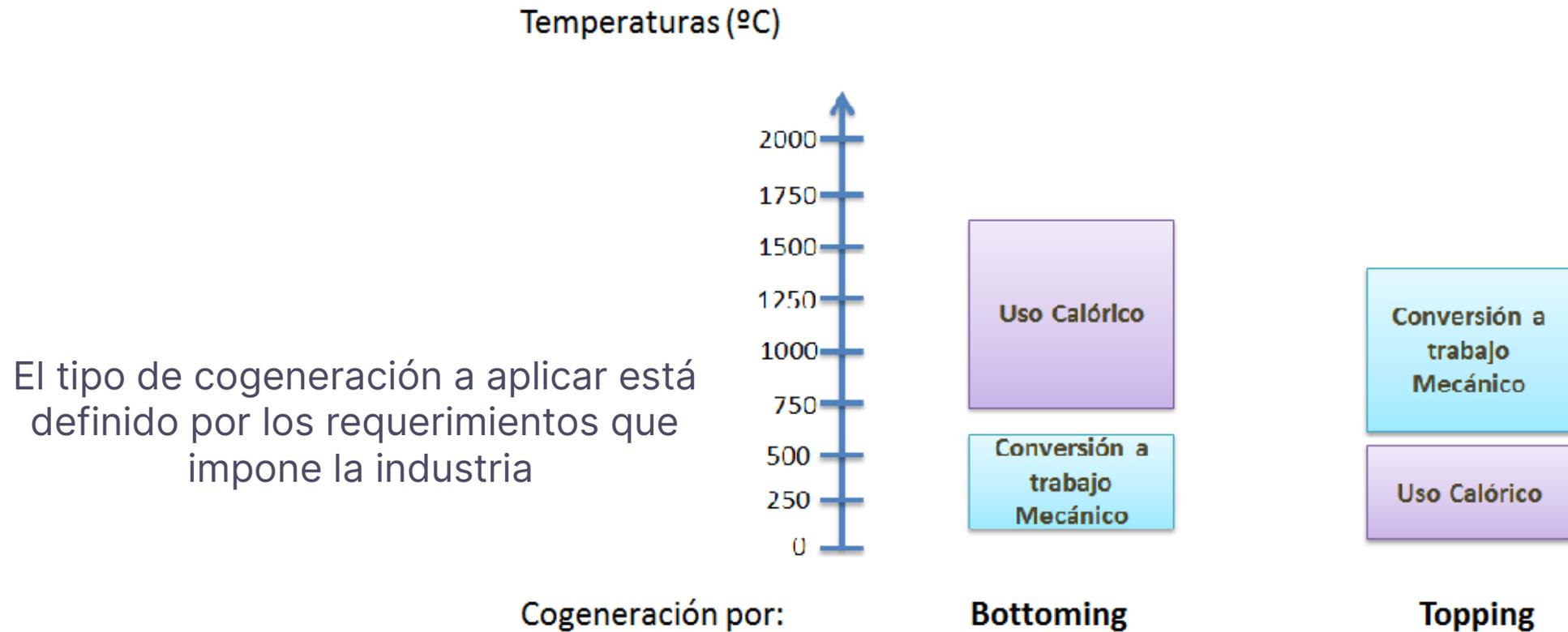


Integración por Bottoming: integración por debajo de la aplicación térmica (se dispone de alta temperatura para usos calóricos):



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.1. Introducción y definiciones: Comparativa de ciclos integrados



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.2. Esquemas de generación de vapor y electricidad

Ciclo de Cogeneración, o CHP (por *Combined Heat and Power*), es un proceso integrado para la «obtención» de energía en varias de sus formas a partir de un recurso de energía térmica, que minimiza la degradación y la pérdida de parte de la energía.

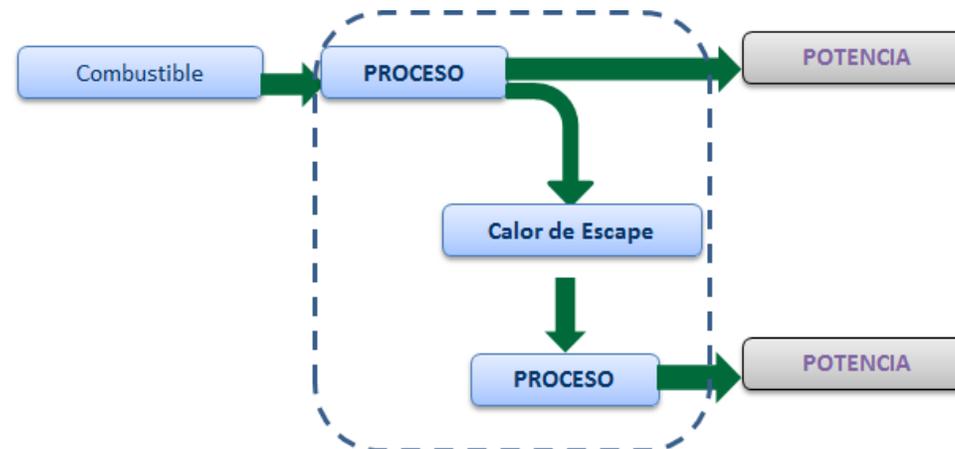
La **Cogeneración** es un «sistema de **producción de electricidad a partir de combustibles**» **basado en el aprovechamiento del calor** para atender una demanda térmica económicamente justificable.

Este **aprovechamiento del calor** es la base de su mayor eficiencia respecto a las **centrales del tipo convencional**.

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.2. Esquemas de generación de vapor y electricidad

**Ciclo Combinado** surge de la combinación de turbina de gas y turbina de vapor para maximizar la transferencia de energía en la forma de trabajo.

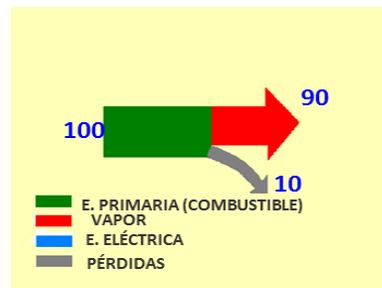
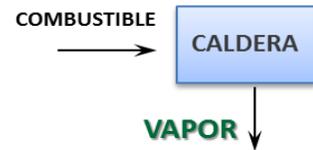


### Ciclos de Cogeneración vs. Ciclos Combinados

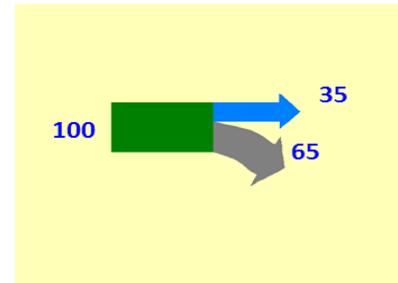
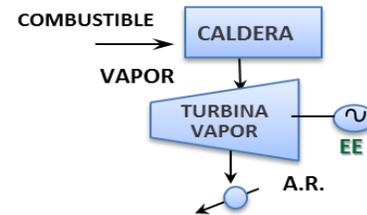
- Distintos campos de aplicación
- No compiten entre ellos

# H.5. COGENERACIÓN

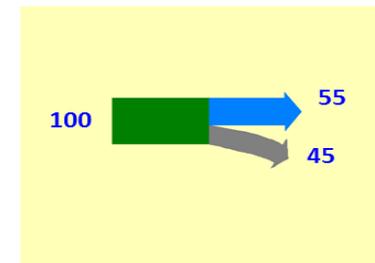
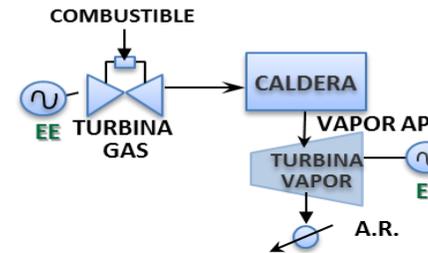
## H.5.2. Esquemas de generación de vapor y electricidad



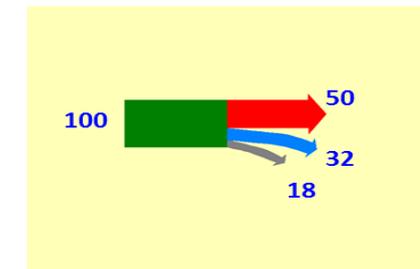
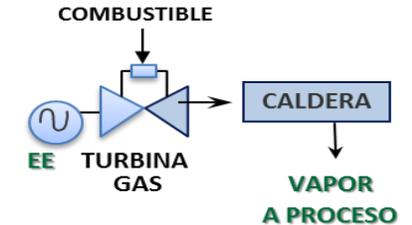
- Rendimiento 90 % PCI
- Pérdidas 10 % en caldera



- Rendimiento eléctrico 35 % PCI,
- Pérdidas: 65 %  
10 % pérdidas en caldera.  
55 % pérdidas en torre refrigeración



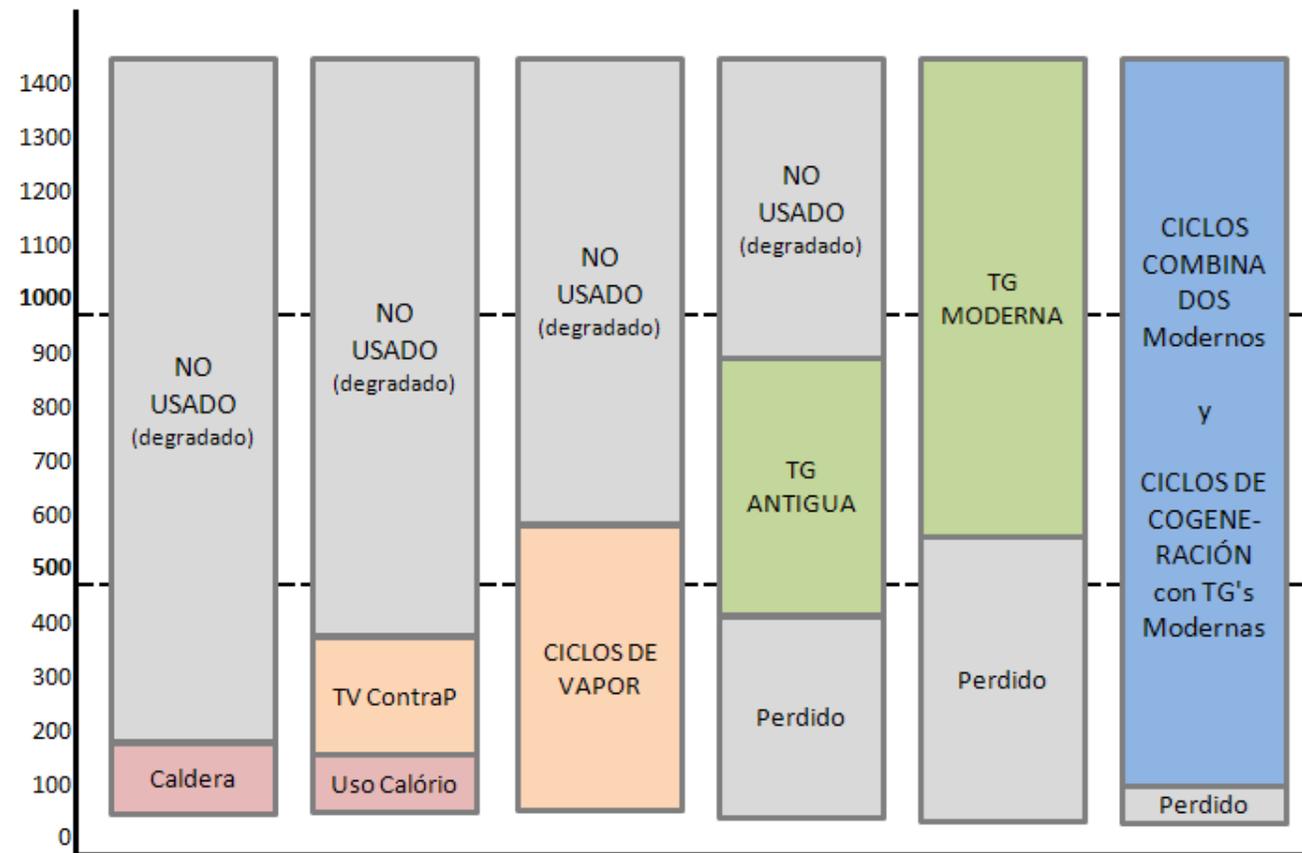
- Rendimiento eléctrico 55 % PCI
- Pérdidas 45 %
  - 15 % pérdidas en TG+caldera
  - 30 % pérdidas en torre refrig.



- Vapor, rendimiento 90 % PCI
- Rendimiento eléctrico equivalente 72 % - 79 %

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.2. Esquemas de generación de vapor y electricidad



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración

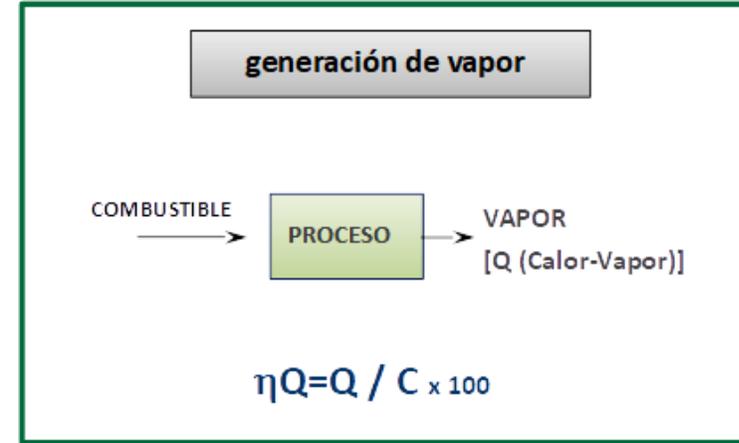
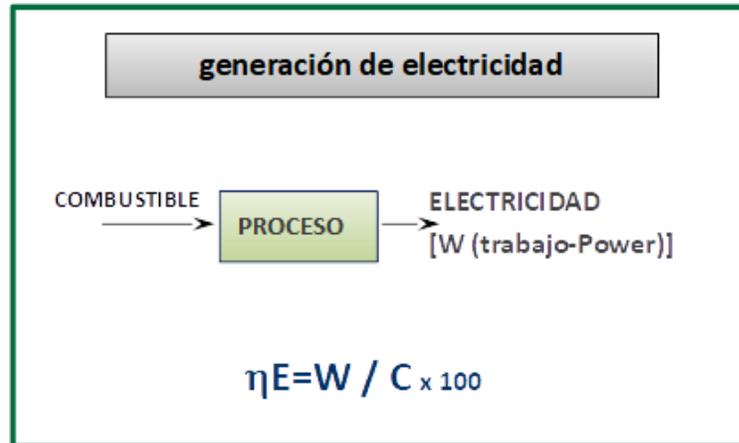
- ✓ El trabajo se puede convertir 100 % en calor
- ✓ El calor no se puede convertir en 100 % en trabajo (en ciclos)

El sistema de Cogeneración produce **dos energéticos de calidades diferente**, con lo cual la asignación de costos se hace:

- Método físico: por cantidades de energía entregada
  - Método termodinámico: por las cantidades de trabajo que las energías entregadas tienen
- ✓ Jacek Marecki, especialista, recomienda la asignación de costos de los energéticos por criterios comerciales y no técnicos.

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración



En un sistema CHP, los flujos de energía de interés son:



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración

RENDIMIENTO TÉRMICO:

$$\eta_T = \frac{(W + Q)}{C} * 100$$

RENDIMIENTO ELÉCTRICO EQUIVALENTE:

$$\eta_{EE} = \frac{W}{C - \left( \frac{Q}{(\eta_Q)} \right)} * 100$$

RENDIMIENTO PARA CATEGORIZACIÓN DE INSTALACIONES DE COGENERACIÓN:

$$\eta_{CHPF} = \frac{W + k * Q}{C} * 100$$

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración

#### AHORRO DE ENERGÍA PRIMARIA:

EP es el consumo de energía primaria necesario para la producción monopropósito

$$EP = \frac{E}{\eta_E} + \frac{Q}{\eta_Q}$$

#### AHORRO PORCENTUAL DE ENERGÍA PRIMARIA

El ahorro porcentual de energía primaria (PES) es el cociente entre el ahorro de energía primaria y el consumo de energía primaria monopropósito

$$PES(\%) = \frac{AEP}{EP} * 100$$

#### AHORRO DE ENERGÍA PRIMARIA:

$$AEP = \frac{E}{\eta_E} + \frac{Q}{\eta_Q} - C_{cog}$$

$$PES(\%) = \left( 1 - \frac{C_{cog}}{\frac{E}{\eta_E} + \frac{Q}{\eta_Q}} \right) \times 100$$

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración

#### RENDIMIENTO TÉRMICO GLOBAL DE LA COGENERACIÓN

$$\eta_T = \frac{(W + Q)}{C} * 100$$

#### COMPARACIÓN CON UN SISTEMA MONOPROPÓSITO



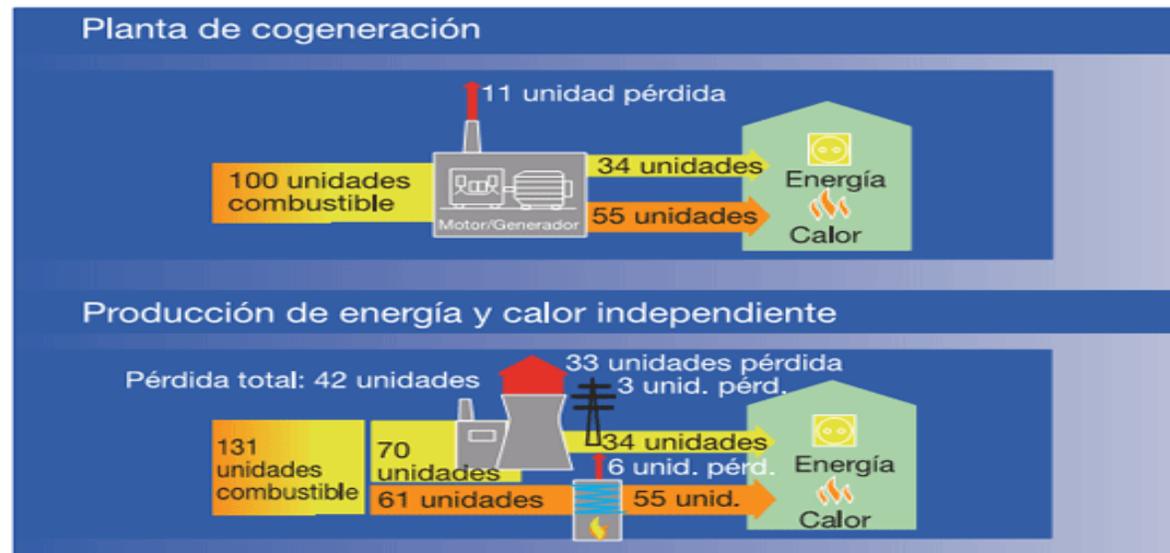
## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración

#### RENDIMIENTO TÉRMICO GLOBAL DE LA COGENERACIÓN

$$\eta_T = \frac{(W + Q)}{C} \times 100$$

#### COMPARACIÓN CON UN SISTEMA MONOPROPÓSITO



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.3. Calidad de un sistema de cogeneración

La relación  $W/Q$  se llama «FACTOR ENERGÉTICO»:

- ✓ Factor energético de la demanda
- ✓ Factor energético del suministro

El óptimo se alcanza cuando:

$$\left(\frac{W}{Q}\right)_{demanda} = \left(\frac{W}{Q}\right)_{suministro}$$

Si no se cumple, se incluyen mecanismos de flexibilización, que terminan degradando los resultados del sistema.

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.4. Potencial a cogenerar: determinación del potencial en una industria

#### Determinación de la demanda térmica

- Determinación de la carga calórica
- Detección de las particularidades de la demanda calórica.

*No siempre todo el vapor puede ser cubierto por procesos de cogeneración.*

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.4. Potencial a cogenerar: determinación de la demanda térmica – análisis de demanda

#### OBJETIVOS:

- ✓ Definir los datos básicos
- ✓ Determinar la demanda de calor útil y la forma en que es utilizado

¿Qué hay que determinar?

Tipología de la demanda

Características de la demanda

Modelización de la demanda

Equipos de producción de la demanda

Vapor, agua caliente, aceite térmico, agua fría

Temperatura y presión de consumo, temperatura de retorno, porcentaje de retorno de condensados

Perfil diario, semanal y mensual.

Caldera de vapor y/o aceite térmico y/o agua caliente (rendimiento), chiller eléctrico COP)

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.4. Potencial a cogenerar: determinación del potencial en una industria

#### Determinación de la demanda térmica

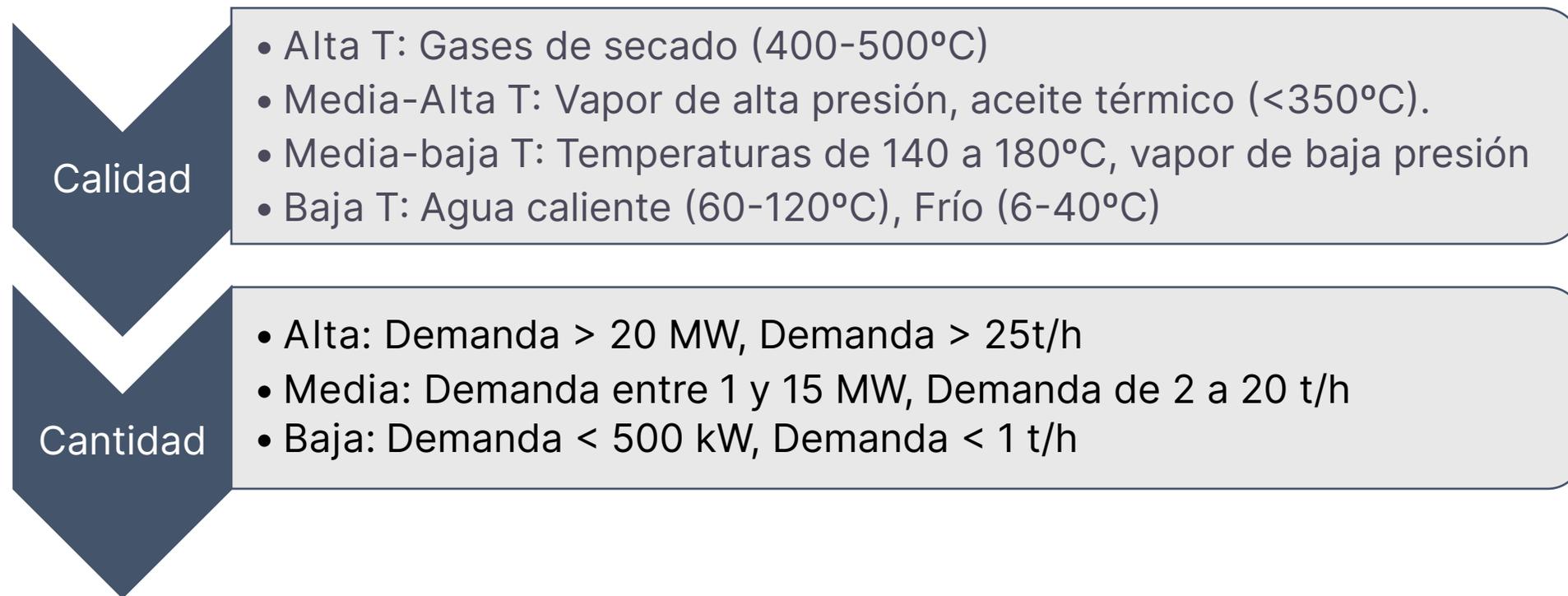
- Determinación de la carga calórica
- Detección de las particularidades de la demanda calórica.
- No siempre todo el vapor puede ser cubierto por procesos de cogeneración

*Se busca la manera de cubrir el demanda térmica con cogeneración.  
Ajustes de la planta de cogeneración*

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.4. Potencial a cogenerar: determinación del potencial en una industria

#### SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA DEMANDA:



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.4. Potencial a cogenerar: tecnología según la cantidad y calidad

Turbina de gas	Calidad	Cantidad
Ciclo simple	Alta/Media/Baja	Alta/Media
Ciclo combinado	Alta/Media/Baja	Alta/Media
Trigeneración (1)	Media/Baja	Alta/Media
Secado	Alta	Alta/Media
Microtrigeneración	Media/Baja	Baja

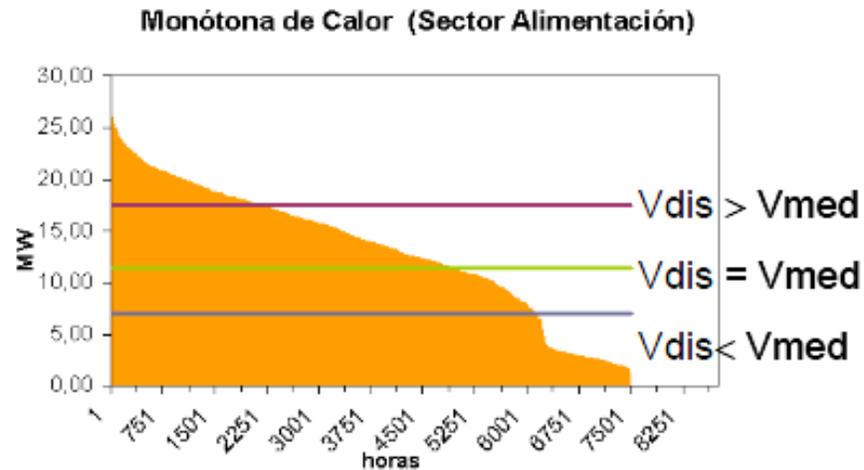
Motor de gas	Calidad	Cantidad
Ciclo simple (2)	Alta/Media/Baja	Media
Trigeneración (1)	Media/Baja	Media
Secado	Alta	Media
Microtrigeneración	Media/Baja	Baja

- (1) Generalmente de frío mediante máquinas de absorción de BrLi calidad baja y Amoníaco calidad media
- (2) El 50 % de la capacidad de producción de calor es siempre agua caliente (camisas).

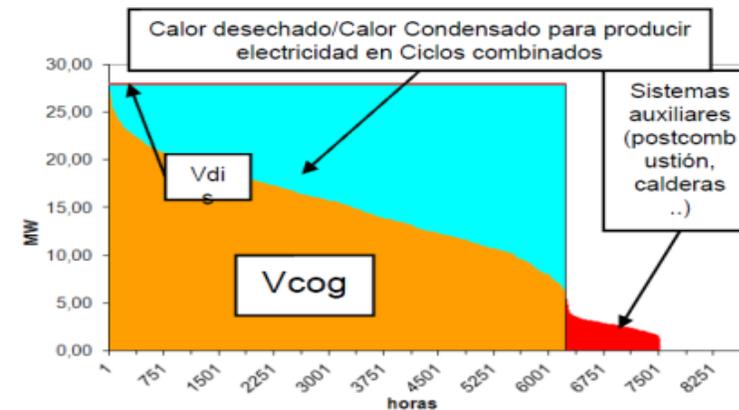
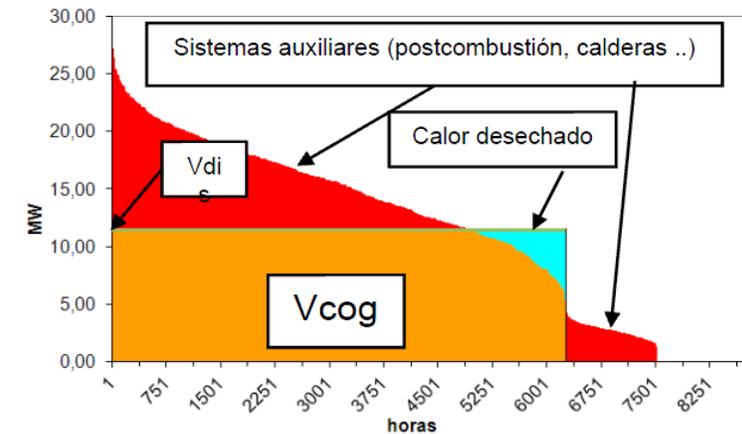
## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.4. Potencial a cogenerar: potencia térmica

- Tres posibles potenciales analizables



- Alternancia e implicancia



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.5. Aplicaciones

#### COGENERACIÓN DE TOPPING:

- ✓ Ciclo de POTENCIA por encima del ciclo de CALOR
- ✓ Mayor aprovechamiento de todo el potencial (salto de T)
- ✓ Aplicable a casos en los cuales la demanda térmica está por debajo de los 450-600°C (aprox.)

#### COGENERACIÓN DE BOTTOMING:

- ✓ Ciclo de CALOR por encima del ciclo de POTENCIA
- ✓ Menores rendimientos (no aprovecha todo el salto de temperatura)
- ✓ El proceso requiere de muy alta temperaturas (en general, mayores a 500°C)

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.5. Aplicaciones: turbina de gas a ciclo simple

#### CARACTERÍSTICAS:

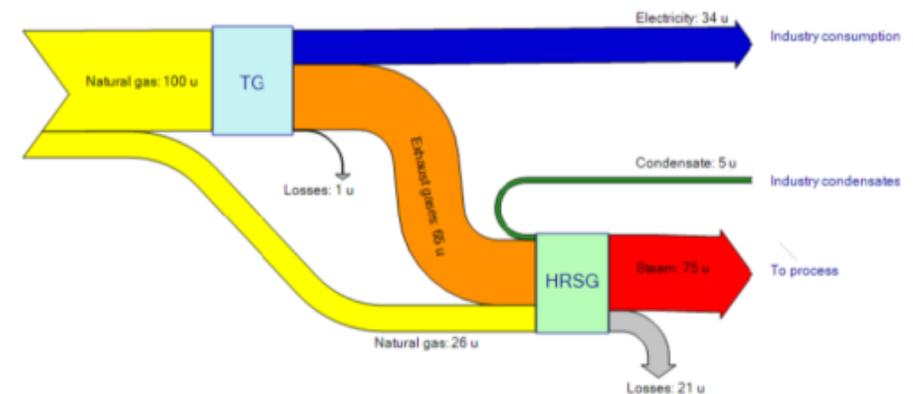
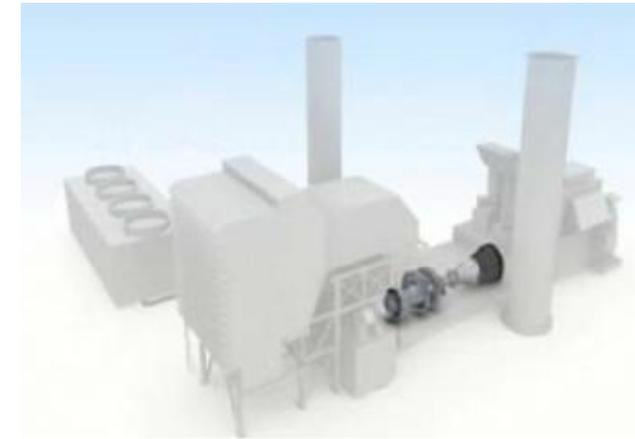
- ✓ Demanda de vapor > 10 t/h
- ✓ Turbinas > 4 MW
- ✓  $30 \% < \eta_{\text{eléct}} < 40 \%$
- ✓  $\eta_{\text{global}} \approx 80-85 \%$

#### USOS:

Industria del papel, químicas, refinerías, entre otros

#### OTRAS CARACTERÍSTICAS:

Operativamente muy simple y robusto



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.5. Aplicaciones: motores de combustión interna

#### CARACTERÍSTICAS:

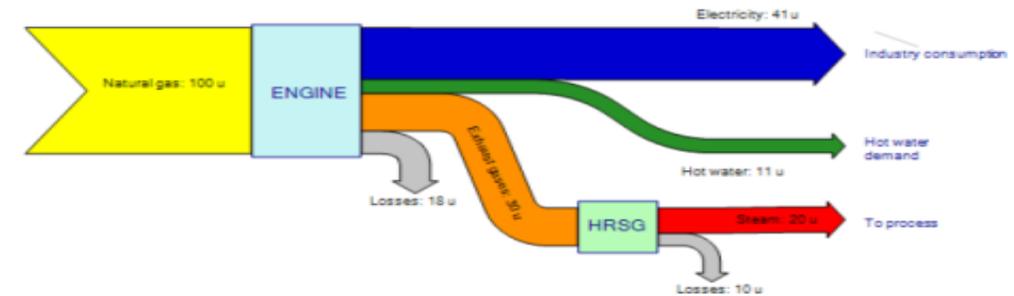
- ✓ Demanda de vapor > 10 t/h
- ✓ 1 MW < Potencias < varios MW
- ✓ 30 % <  $\eta_{\text{eléct}}$  < 50 %
- ✓  $\eta_{\text{global}} \approx 70$  %

#### USOS:

Industria textil, química, alimenticia.

#### OTRAS CARACTERÍSTICAS:

Operativamente muy simple y robusto

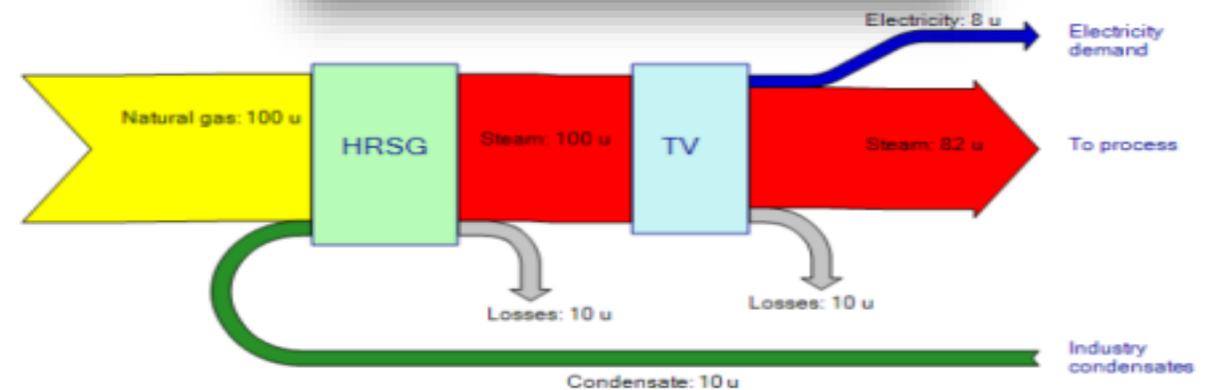


## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.5. Aplicaciones: ciclo simple con turbina de vapor

#### CARACTERÍSTICAS:

- ✓ Hace mucho que se usa en cogeneración
- ✓ Bajo  $\eta_{\text{eléct}}$
- ✓ Rendimientos globales buenos  
si se emplean TV a contrapresión
- ✓ Baja relación electricidad-calor útil
- ✓ Elevada confiabilidad



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.5. Aplicaciones: ciclo combinado a contrapresión

#### CARACTERÍSTICAS:

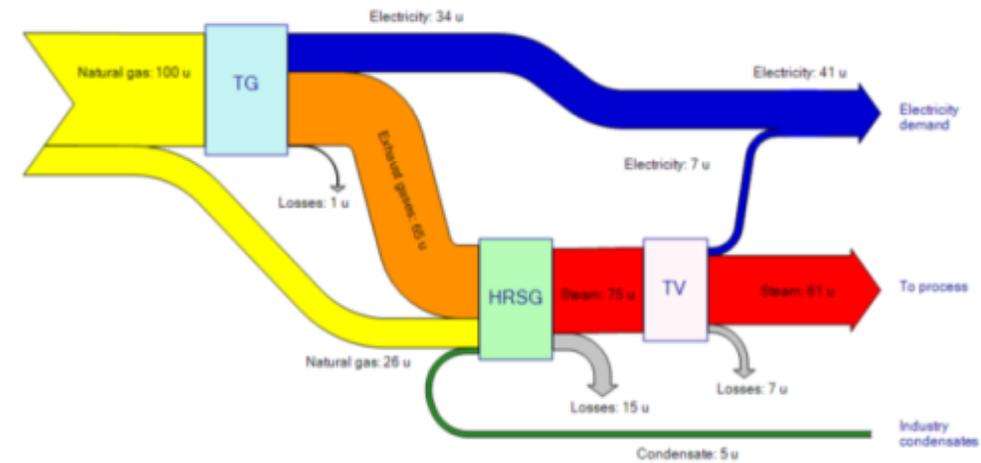
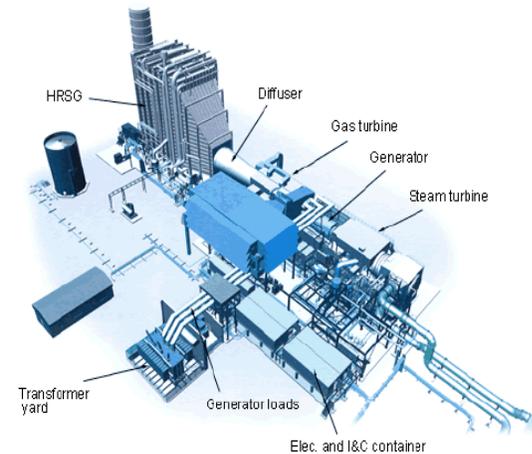
- ✓  $\eta_{\text{eléct}}$  superior al simple
- ✓ Alta relación electricidad-calor útil
- ✓  $7 \text{ MW} < \text{Potencias} < 400 \text{ MW}$

#### USOS:

Sectores varios

#### OTRAS CARACTERÍSTICAS:

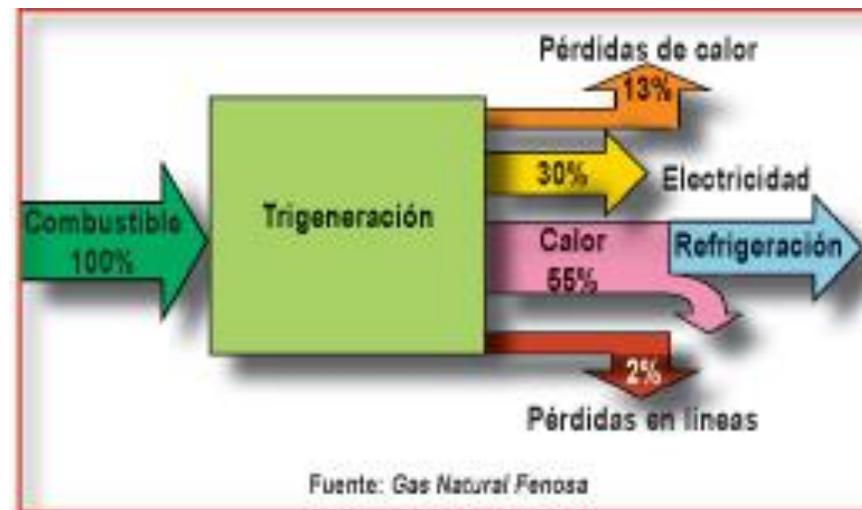
Las TV a contrapresión dan un margen acotado de flexibilidad



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.5. Aplicaciones: trigeneración

- ✓ A la generación de electricidad y vapor, se le agrega la producción de “frío” (agua a 7°C), mediante una máquina de absorción y una torre de refrigeración.
- ✓ Puede darse con motores de CI, TG, Calderas + TV y CC con TV



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales

#### Generación de Potencia

- Turbinas de gas
- Microturbinas
- Motores de combustión interna
- Turbinas de vapor

#### Generación de Calor

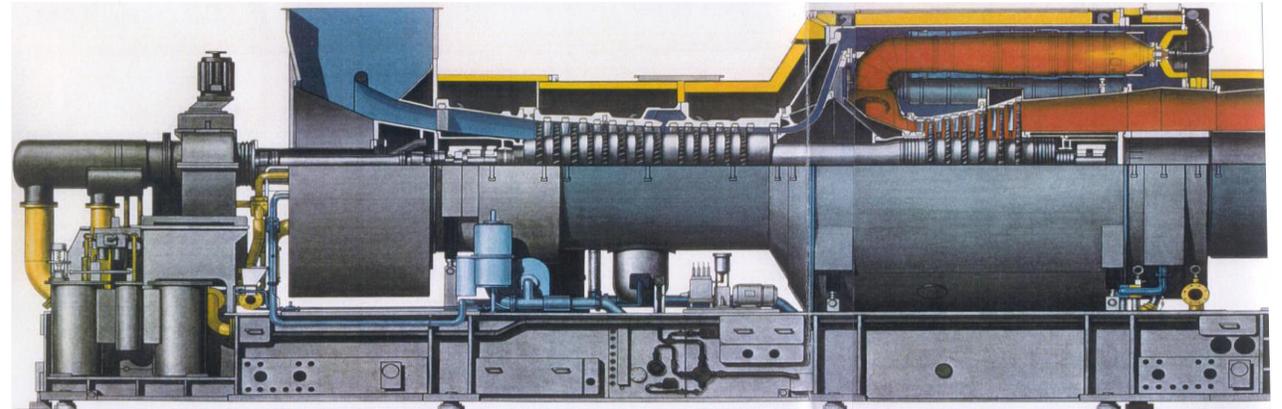
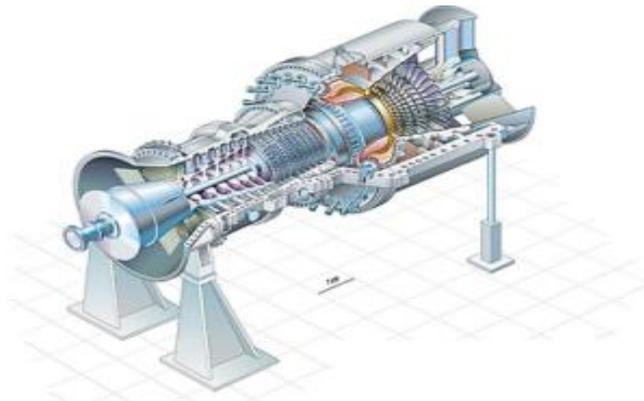
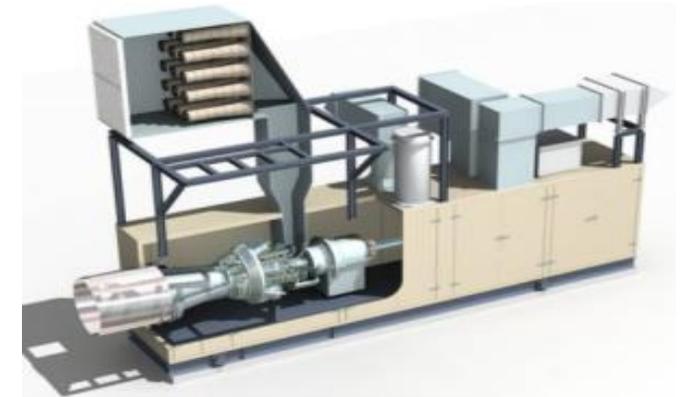
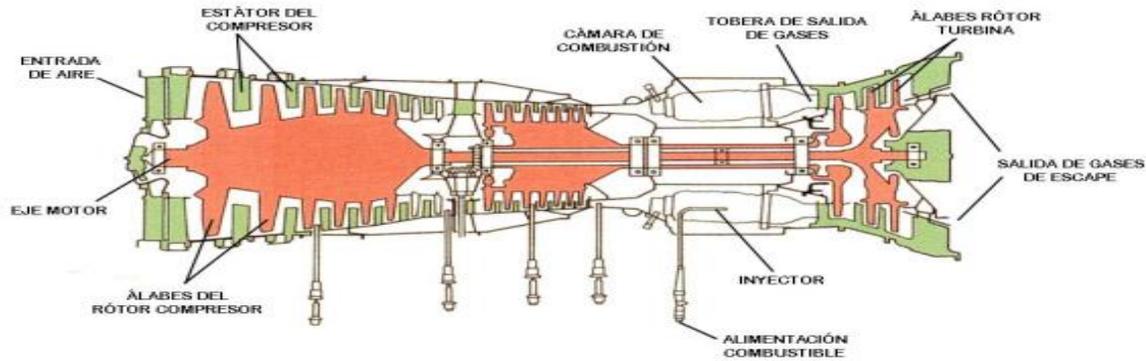
- Calderas/Recuperadores de Calor
- Hornos
- Intercambiadores

#### Generación de frío

- Unidad de Absorción

## H.5. COGENERACIÓN

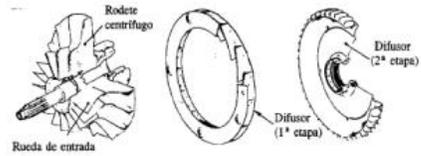
### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas



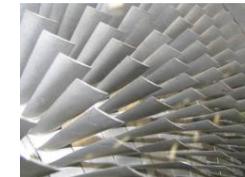
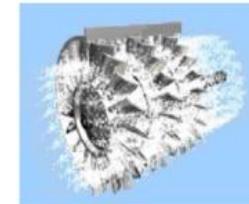
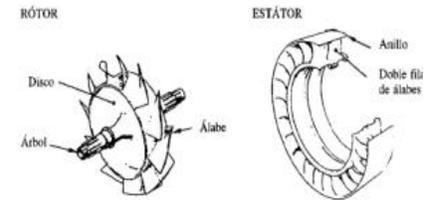
## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas

#### Compresor centrífugo



#### Compresor axial



#### Álabes



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas



Relación Combustible/aire  $\ll$  Relación Estequiométrica

Permite controlar la temperatura, si no serían muy elevadas para los materiales constructivos de las turbinas.



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas



- Turbogenerador de 2\*5.7 MW
- Caldera de recuperación, acuotubular con postcombustión
- Vapor saturado a 14 bar
- Uso: sector petroquímico

- Turbogenerador de 3.5 MW
- Ciclo abierto
- Uso: sector investigación



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas (eficiencias)

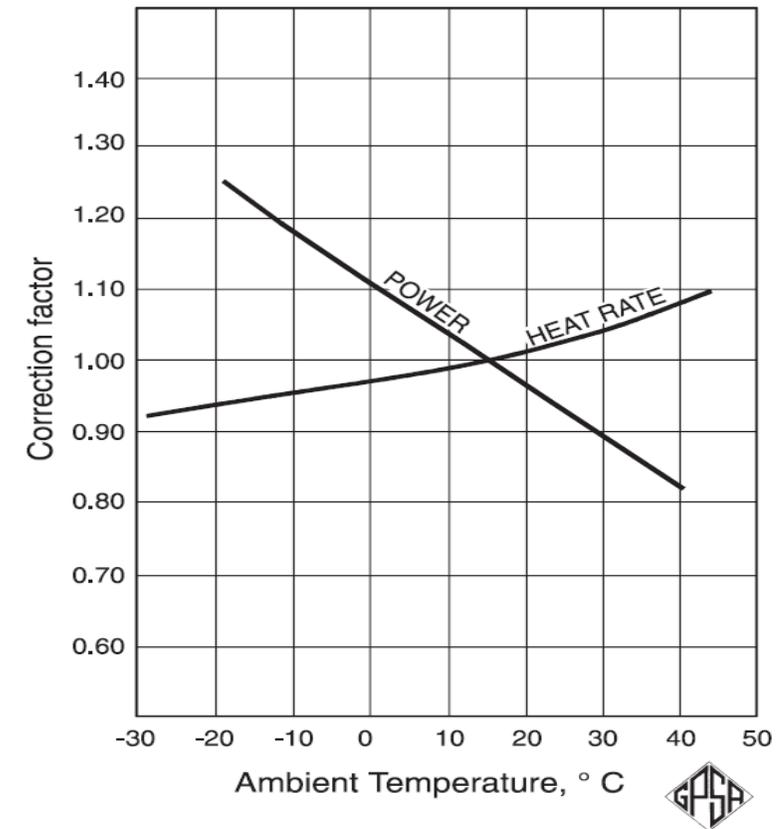
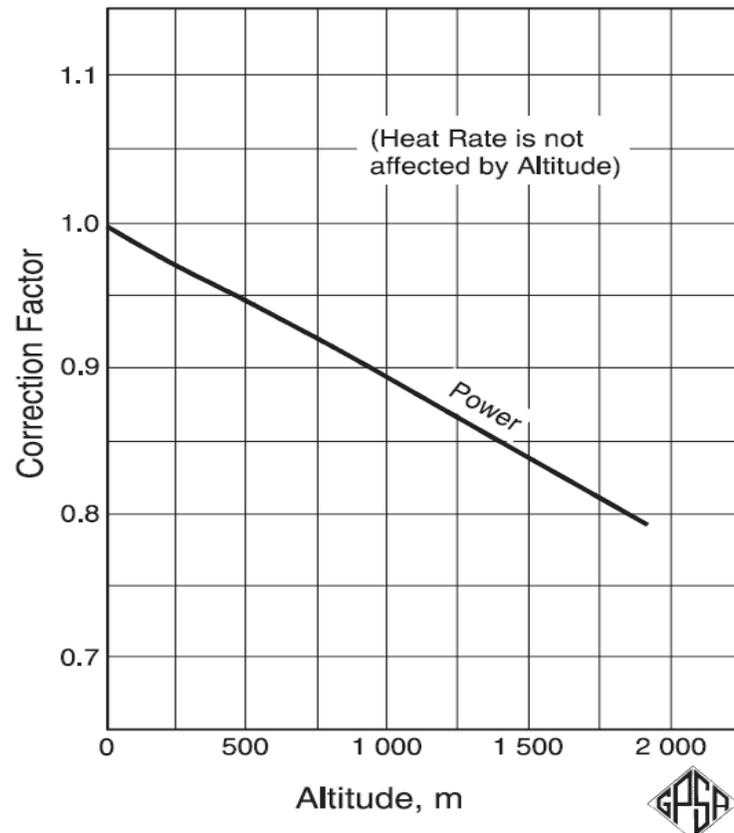
La relación de consumo de combustible y potencia son muy dependientes de las condiciones ambientales (temperatura, altitud, presión y humedad ambiente).

El fabricante provee su hoja de datos en condiciones de ISO 2314:

- Temperatura ambiente = 15°C
- Altitud a nivel del mar = 0
- Presión atmosférica = 101,325 kPa (abs)
- Humedad relativa = 60%

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas (eficiencias)

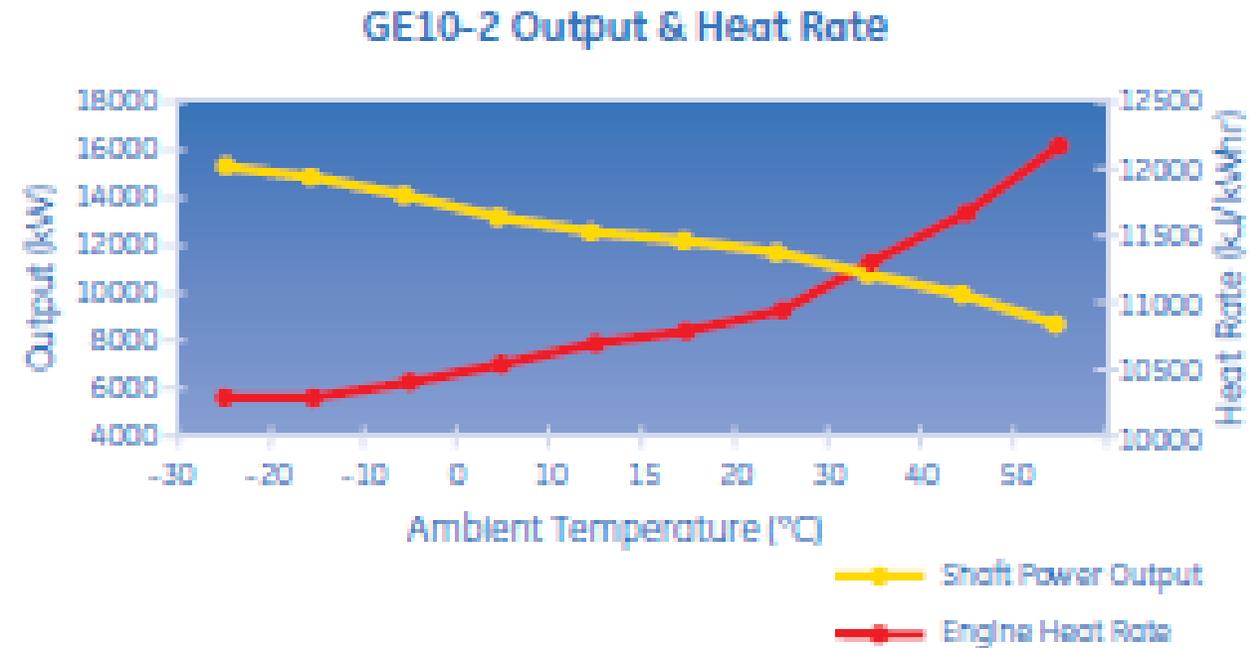


## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas (eficiencias)

#### GE10-2 (ISO Conditions Standard Combustor)

Electrical Output (kW)	11982
Electrical Efficiency (%)	33.3
Exhaust Flow (kg/sec)	47.0
Exhaust Temperature (°C)	480



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: turbina de gas (eficiencias)

#### Generator Drive (ISO conditions - natural gas - electrical generator terminals)

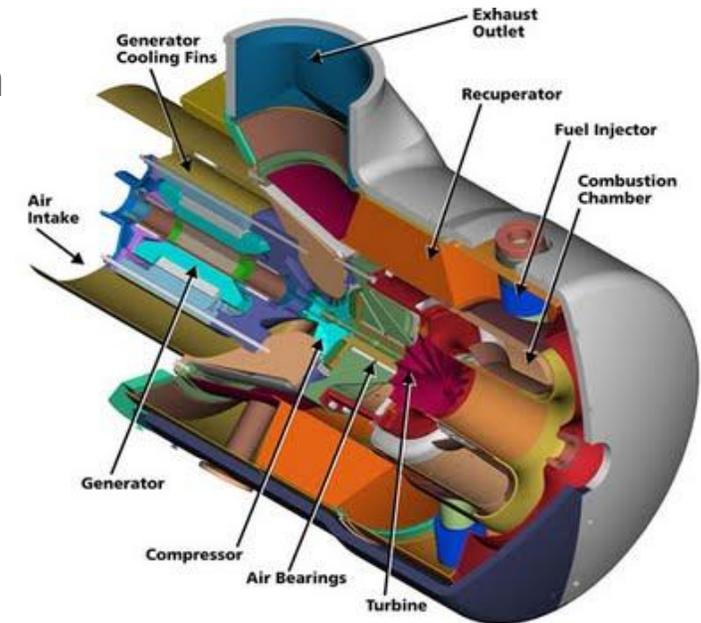
	ISO RATED POWER kW	HEAT RATE kJ/kWh	EFFIC. %	PRESSURE RATIO	EXHAUST FLOW		TURBINE SPEED RPM	EXHAUST TEMPERATURE	
					kg/sec	lbs/sec		°C	°F
 GE10-1	11,250	11,489	31.4	15.5	47.5	104.7	11,000	482	900
 PGT16	13,720	10,295	35.0	20.2	47.3	104.3	7,900	491	919
 PGT20	17,464	10,238	35.2	15.7	62.5	137.7	6,500	475	887
 PGT25	22,417	9,919	36.3	17.9	68.9	151.9	6,500	525	976
 PGT25+	30,226	9,084	39.6	21.5	84.3	185.9	6,100	500	931
 PGT25+G4	33,057	9,047	40.0	23.2	89.6	197.7	6,100	510	950
 LM6000*	42,262	8,787	41.1	28.0	125.0	275.0	3,600	455	851
 LMS100*	98,196	7,997	45.0	40.0	206.9	456.0	3,600	417	782
 MS5001	26,830	12,687	28.4	10.5	125.2	276.1	5,094	483	901
 MS5002E*	31,100	10,285	35.0	17.0	102.0	225.0	5,714	511	952
 MS6001B	42,100	11,230	32.1	12.2	141.1	311.0	5,163	548	1,026
 MS7001EA	85,400	10,990	32.7	12.6	292.0	643.0	3,600	537	998
 MS9001E	126,100	10,650	33.8	12.6	418.0	921.0	3,000	543	1,009

(\*) DLE Combustion

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: microturbinas

- ✓ Puede operar conectada a la red eléctrica o en forma aislada
- ✓ Rendimiento eléctrico: 29 %
- ✓ Potencia eléctrica: 65kW
- ✓ Recuperación de calor para generación de agua caliente
- ✓ Potencia térmica: 120 kW
- ✓ Rendimiento total del sistema: 82 %
- ✓ Se instalan en forma individual o Multi-pack
- ✓ Opera en una variedad de combustibles (gas natural, biogás, gases de antorcha, diésel, propano, kerosene)

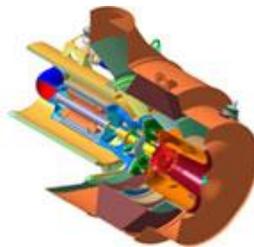
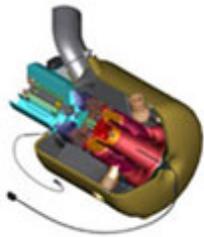


## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: microturbinas

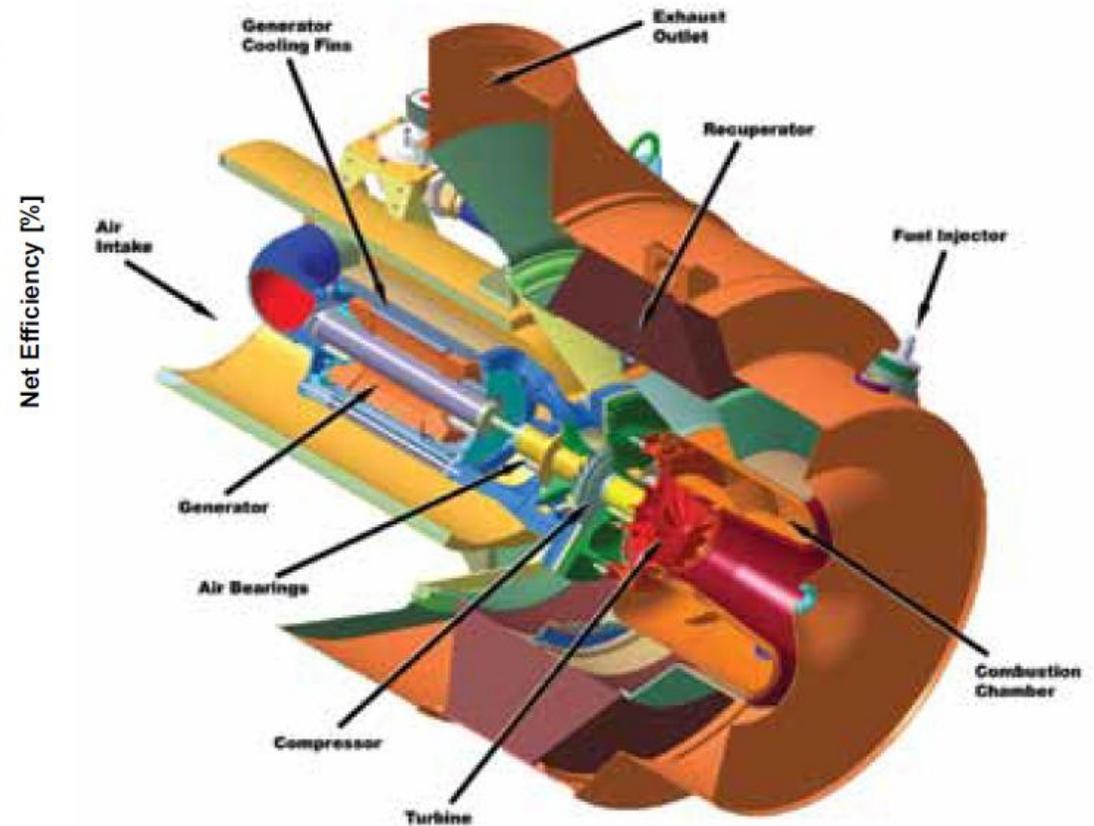
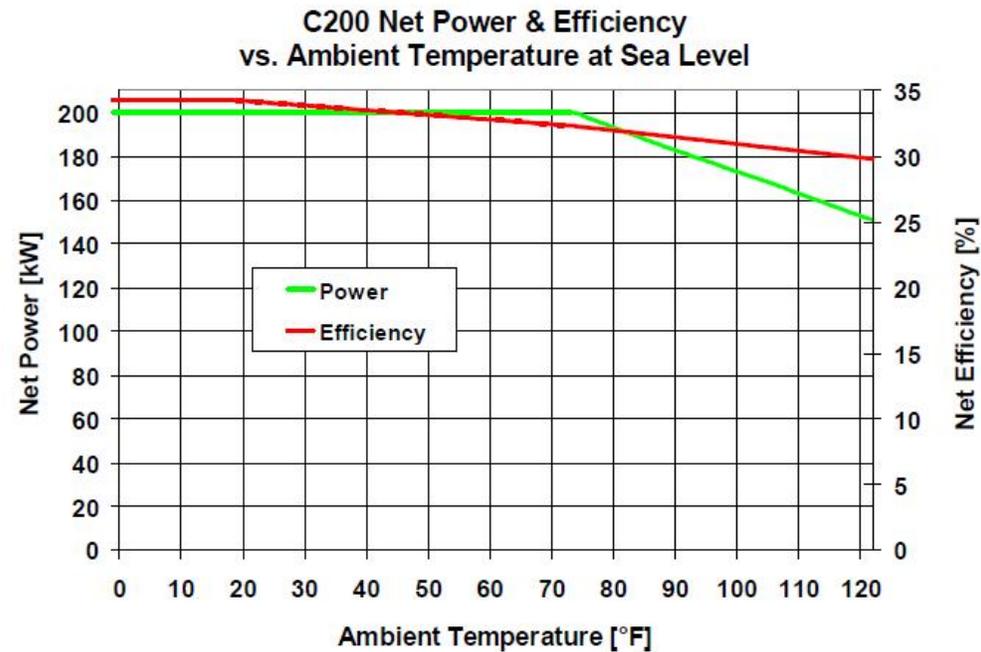


ejemplo de 3 microturbinas trabajando en paralelo.



## H.5. COGENERACIÓN

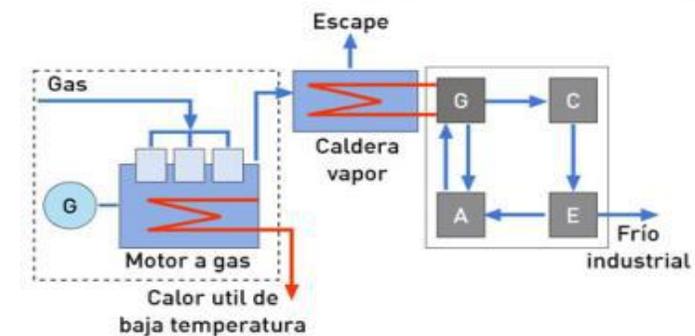
### H.5.6. Equipos principales: microturbinas (eficiencia)



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: motores de combustión interna

- La potencia oscila entre 10 kW y 50 MW
- Lo aconsejable en aplicaciones de uso industrial son motores  $> 1$  MW
- Operan con gas natural, gasoil y en algunos casos destilados refinados
- Requieren un sistema de refrigeración
- Recuperan calor a bajas temperaturas, lo que los hace más difícil de aplicar

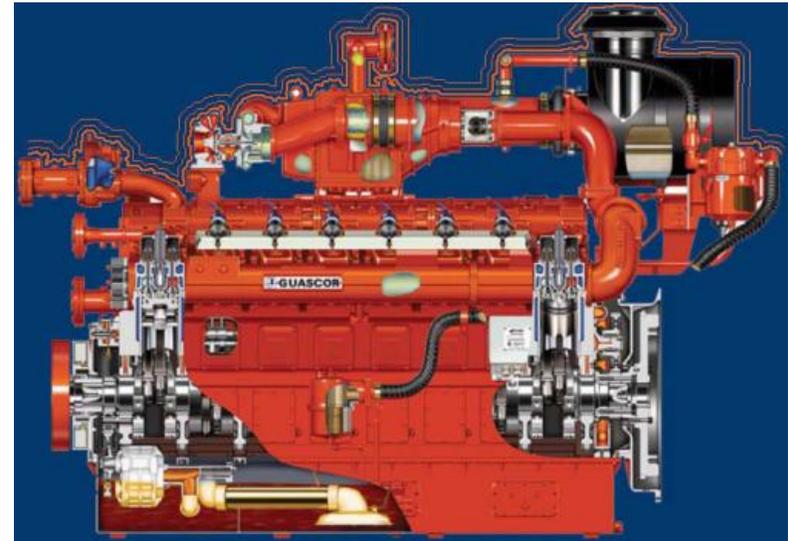
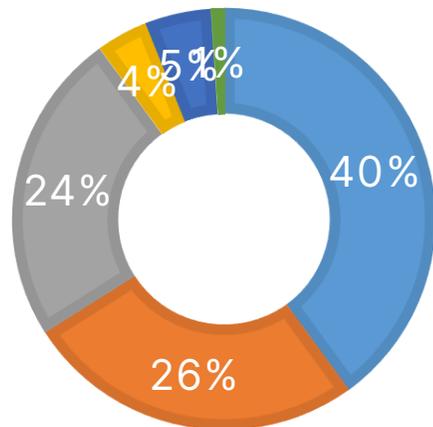


## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: motores de combustión interna

#### Transformación de la energía del combustible en MCI

- Mecánica
- Bloque/Cilindro
- Escape
- Aceite
- Intercooler
- Radiación



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos principales: motores de combustión interna



#### APLICACIONES REALES PARA:

- ✓ Calentamiento de Aire
- ✓ Vapor de baja presión y/o agua caliente

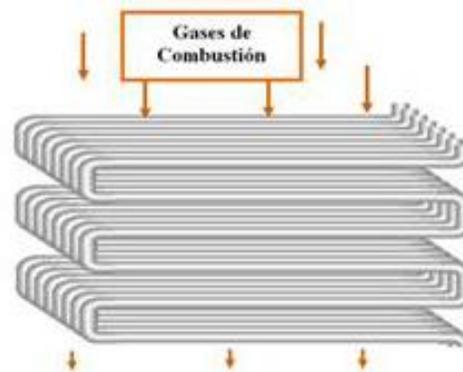
Por lo general hay varias versiones del mismo motor para cubrir distintas necesidades de calor

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos de calor: recuperador de gases calientes

Son intercambiadores de calor que recuperan el calor residual de los gases de escape para calentar otra corriente.

- ✓ En las calderas se incorporan con esta función: economizadores y precalentadores de aire.
- ✓ Se suelen emplear en hornos de procesos o en equipos de intercambio de ductos.



## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos de calor: horno de procesos

- ✓ Se aplican cuando el proceso requiere temperaturas muy elevadas (calentamiento directo del fluido de procesos)
- ✓ Aprovechamiento del calor residual para generar potencia



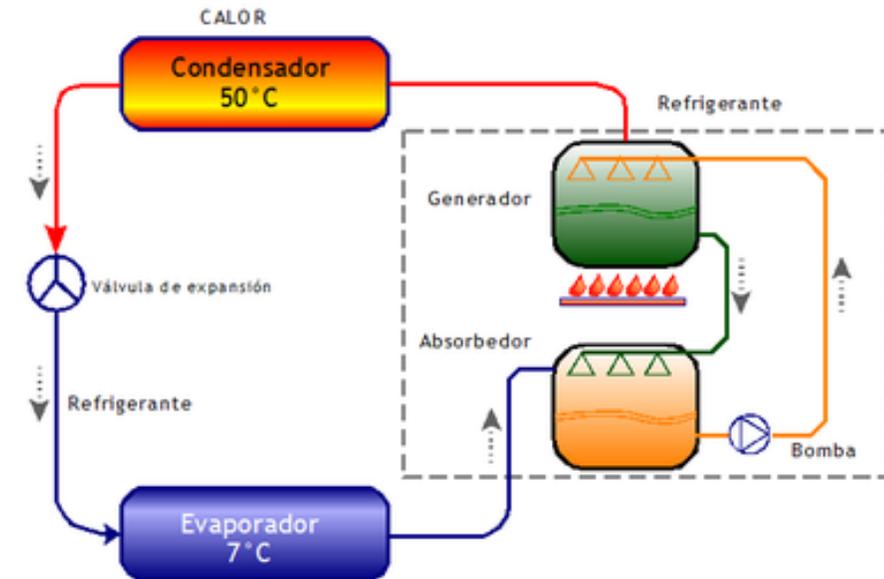
## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos de frío: máquinas de absorción

Generan frío a partir de energía térmica obtenida mediante recuperación

Se pueden clasificar:

1. Según nivel térmico
  - Basadas en LiBR → hasta 6°C
  - Basadas en NH<sub>3</sub> → hasta -40°C
2. Según grado de optimización
  - Simple Efecto
  - Doble Efecto



La máquina de absorción consta de cuatro partes principales: un evaporador, un absorbedor, un generador y un condensador

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Equipos de frío: máquinas de absorción

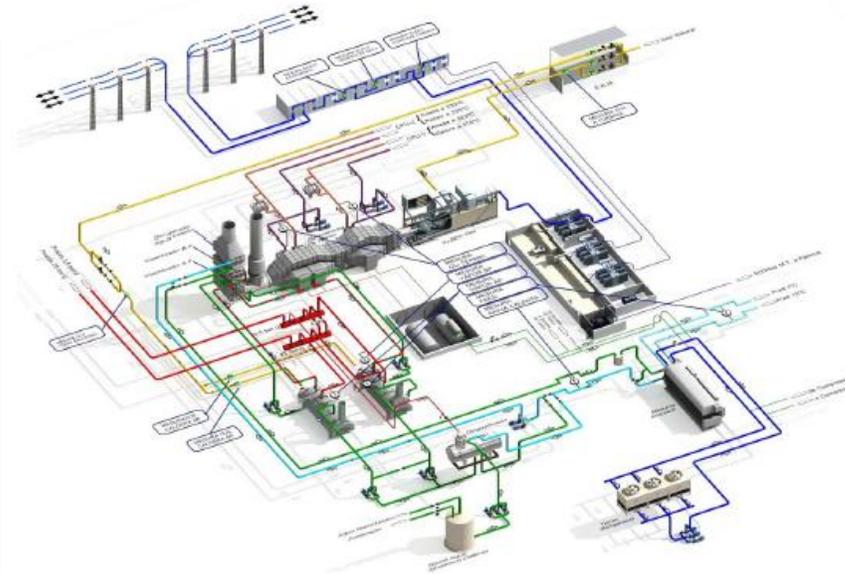


## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Ejemplo de aplicación: fibras textiles

CARACTERÍSTICAS PLANTA	
Cliente	La Seda Barcelona S.A.
Localización	El Prat de Llobregat
Tipo de combustible	Gas natural
Tipo de ciclo	Simple
Turbina de gas	SIEMENS SGT-300
Potencia eléctrica turbina	7,9 MW (ISO) 7,6 MW (on site, 15°C)
Potencia térmica en aceite Dowtherm-A	3.880 kW
Potencia térmica en aceite Santotherm 66	4.800 kW
Potencia térmica en vapor 25 barg por recuperacion	1.671 kW
Potencia térmica en vapor 3,5 barg por recuperacion	1.689 kW
Potencia térmica total en frio máquina absorción	1.700 kW

**Puesta en marcha: Mayo 2008**



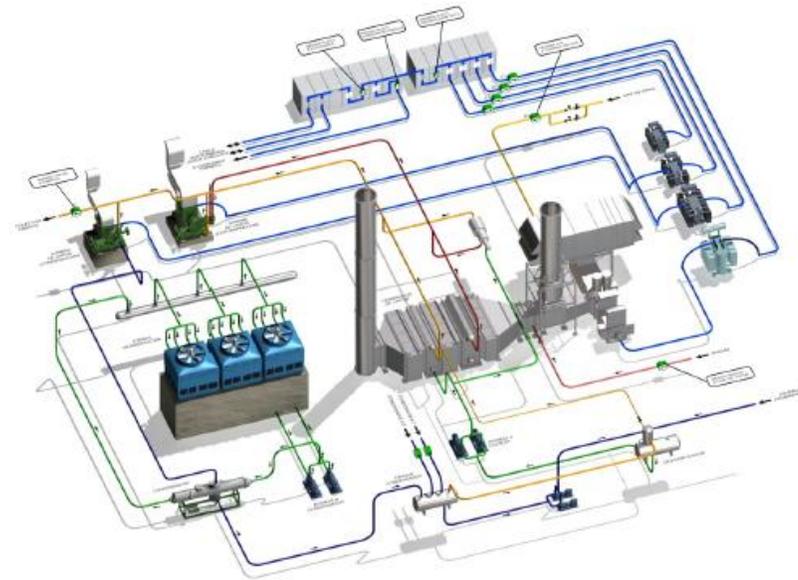
RENDIMIENTOS	
Rendimiento eléctrico (RE)	30,3 %
Rendimiento global (RG)	80,5 %
Rendimiento eléctrico equivalente (REE)	68,6%
Primary Energy Saving (PES)	14,6 %

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Ejemplo de aplicación: papelera

CARACTERÍSTICAS PLANTA	
Cliente Usuario	Cogeneración UFIC,S.A Unión Industrial Papelera S.A.
Localización	La Pobla de Claramunt
Tipo de combustible	Gas natural (en turbina) Biogás (postcombustión)
Tipo de ciclo	Combinado (33,6 MW)
Turbina de gas	GE LM 2500+PR (28 MW)
Turbina de vapor de contrapresión	PASCH KKK-CFR5 (3,9 MW)
Turbina de vapor de condensación	PASCH KKK-AFA6KD (1,7 MW)
Generador de vapor (con postcombustión) GEA	46,3 t/h a 40 bara/400° + 4,7 t/h a 10 bara/Sat

**Puesta en marcha: Septiembre 2008**



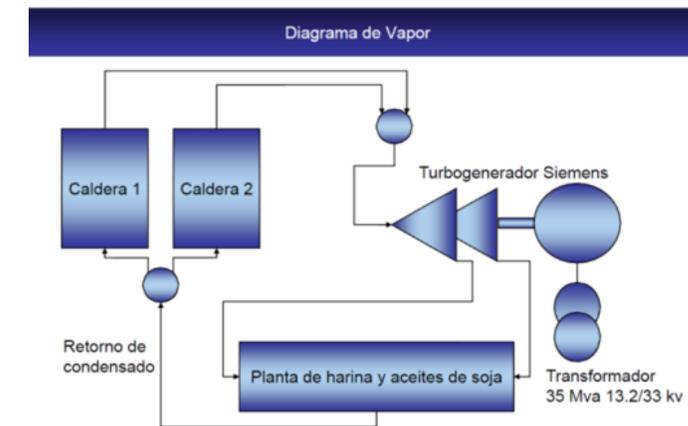
RENDIMIENTOS	
Rendimiento eléctrico (RE)	39,9 %
Rendimiento global (RG)	82,2 %
Rendimiento eléctrico equivalente (REE)	75,2%
Primary Energy Saving (PES)	20,1 %

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Ejemplo de aplicación: industria alimenticia

#### Características de la Planta

Empresa	XXX
Localización	Argentina
Tipo de combustible	GN – FO (ambos se consumen en calderas)
Tipo de Ciclo	Cogeneración (27 MW <sub>E</sub> )
TV a contrapresión con extracción	Siemens modelo SST300 27 MW Extracción @ 10 kg/cm <sup>2</sup> Contrapresión @ 7 kg/cm <sup>2</sup>
Caldera (tipo convencional)	2 Calderas marca Gonella licencia Babcock & Wilcox de 240 t/h de vapor sobrecalentado @ 65 kg/cm <sup>2</sup> y 480° C Quemadores duales

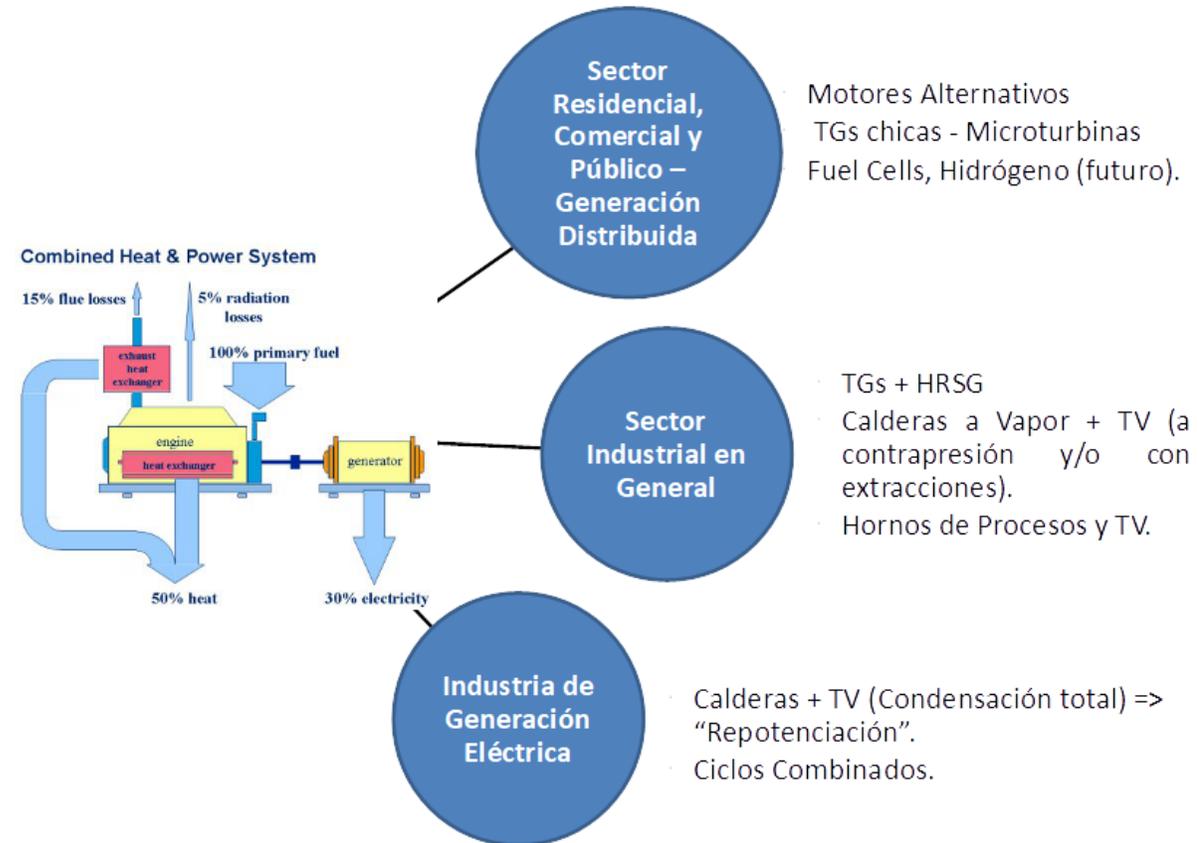


#### Rendimientos

Rendimiento Eléctrico (RE)	15,1 %
Rendimiento Global (RG)	89%
Rendimiento Eléctrico Equivalente (REE)	72,5%
Ahorro de Energía Primaria (PES)	22,7%

## H.5. COGENERACIÓN

### H.5.6. Ejemplo de aplicación: cogeneración



# Gracias por su atención.

eficiencia@santafe.gov.ar

Secretaría de Energía

*Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética*



Ministerio de  
Desarrollo Productivo