

# BOMBAS DE CALOR A ALTA TEMPERATURA APLICADAS A LA INDUSTRIA PAPELERA

Eva Arenas

Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

19/09/2024



# Bombas de calor industriales

- Se espera que jueguen un gran papel en la **descarbonización de la industria**.
- Permiten **recuperar calor residual** (típicamente 50-100°C) y elevarlo a temperaturas superiores, usando **electricidad renovable**.
- Para temperaturas de suministro menores de 100°C es una **tecnología madura y sólidamente implementada en la industria**.
- Reto para implementación **a más de 100°C**:
  - **Altas temperaturas y presiones de operación**.
  - Se requiere un análisis profundo de **fluidos de trabajo, tipos de ciclos y componentes clave** (compresor).

## ESTADO DEL ARTE:

Temperaturas suministro: **100-280°C**

Tecnologías con **TRL entre 4 y 9**

Potencias térmicas: **30 kW a 70 MW**

Costes específicos: **200-1500 €/kW**

Se prevé que se vaya disponiendo de modelos **comerciales**:

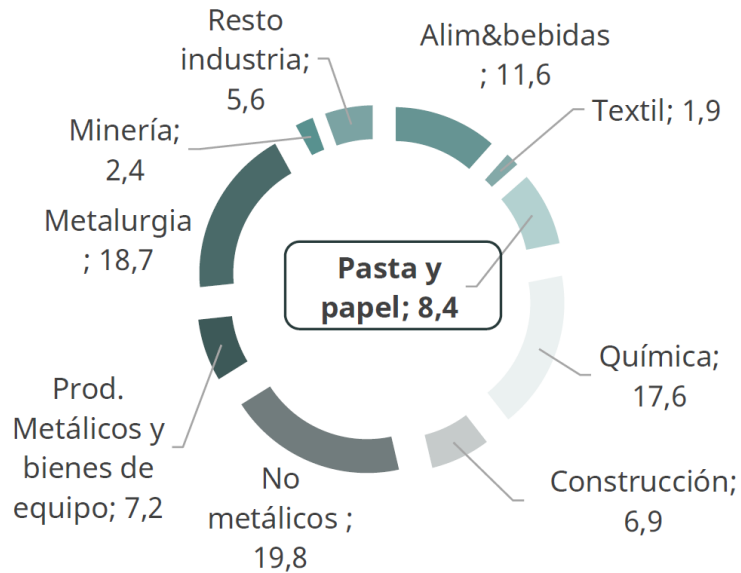
**2024-25 ----- 120°C**

**2025-26 ----- 160°C**

y superar esa barrera en 2026-27

# Bombas de calor en la industria papelera

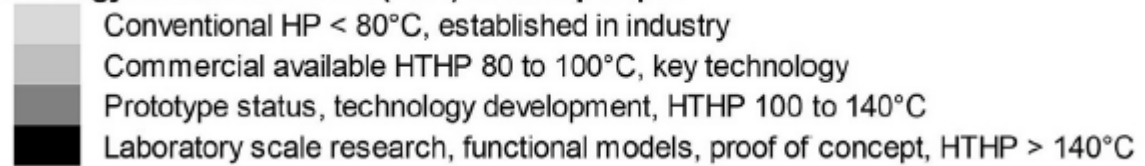
## Demanda energética final industria ES, (% , 2019)



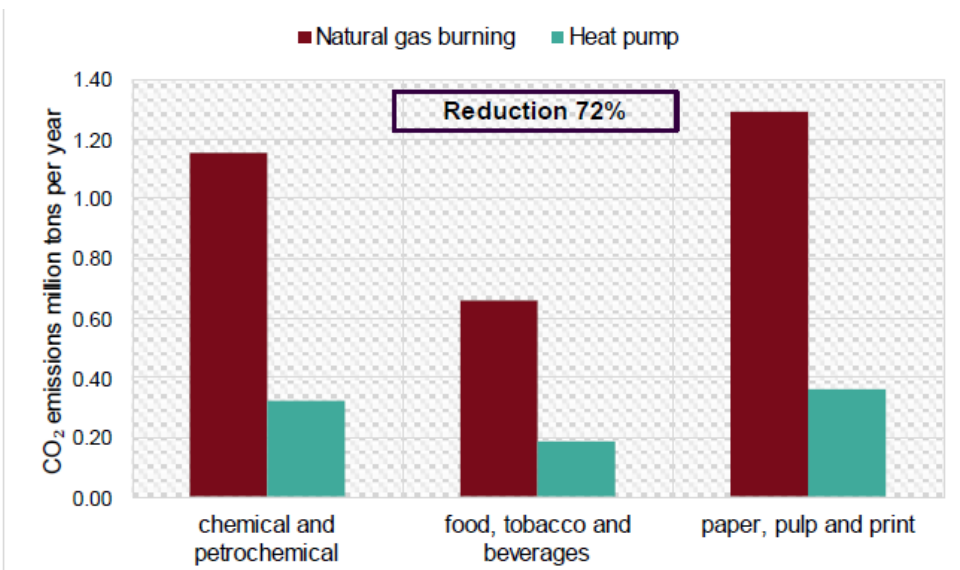
Fuente: ASPAPEL

Sector	Process	Temperature [°C]																			
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200										
Paper	Drying																				90 to 240
	Boiling																				110 to 180
	Bleaching																				40 to 150
	De-inking																				50 to 70

### Technology Readiness Level (TRL) of heat pumps:



Fuente: [Arpagaus et al. 2018](#)

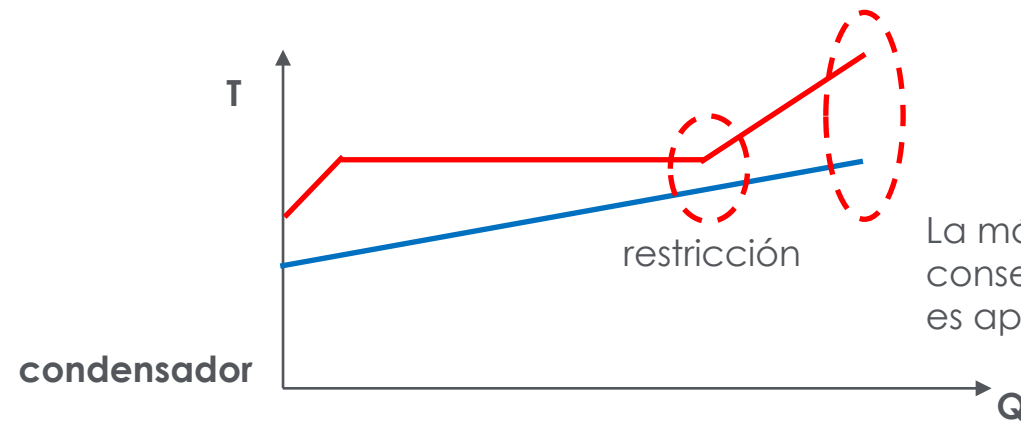
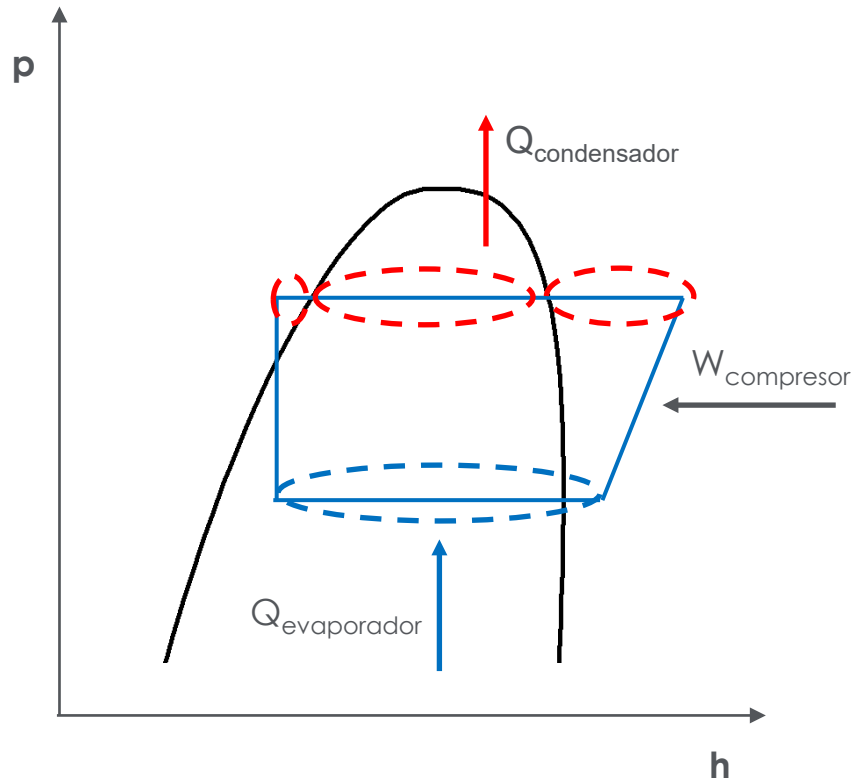


Fuente: [Annex 58 High Temperature Heat Pump](#)

# **CICLOS Y FLUIDOS PARA BOMBAS DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA**

# Ciclo Rankine inverso subcrítico

- Cualquier ciclo inverso puede actuar como bomba de calor.
- El ciclo convencional es un Rankine inverso.
- En la cesión de calor:
  - Tramos sensibles (variación de temperatura): principalmente desrecalentamiento, pero también subenfriamiento
  - Tramo de cambio de fase: temperatura constante: límite para cesión de calor
- Opcionalmente se puede usar un regenerador
- La propia sustancia limita las temperaturas de operación.



La máxima temperatura conseguida por la bomba no es aprovechable totalmente

# Ejemplo Rankine inverso subcrítico

Bombas de calor con agua como fuente con refrigerante PUREtec

## 61XWHZE

**BOMBAS DE CALOR AQUAFORCE**

- Tamaños compactos (a partir de 1000 mm de ancho) para mayor flexibilidad de instalación y manipulación
- Fácil acceso a los componentes más importantes para una gran funcionalidad



**CONTROL TOUCH PILOT™**

- Pantalla táctil fácil de usar
- Todos los parámetros principales se visualizan en una misma pantalla
- Acceso directo a los planos técnicos de la unidad y a los principales documentos de servicio
- Sencilla monitorización remota por Internet
- Acceso sencillo y seguro a los parámetros de las unidades

**CUADRO ELÉCTRICO PRESURIZADO**

- Ventilador integrado (de fuera a dentro)
- Interfaz para recibir un conducto de entrada de aire fresco
- Cierre hermético (nuevo diseño de cuadro y puertas de acceso)
- Detección del funcionamiento del ventilador antes de la puesta en marcha de la unidad

**INTERCAMBIADORES DE CALOR MULTITUBULARES**

- Tecnología de intercambiador Inundado para una transferencia de calor optimizada y una limpieza fácil de los tubos en el lado del agua
- Aislamiento térmico de espuma de poliuretano de serie
- Desagüe y vaciado de agua
- Presión de funcionamiento hasta 1000 kPa en el lado del agua

**COMPRESOR DE TORNILLO**

- Modelo de tornillo Carrier 06T
- Motor de alto rendimiento
- 100 000 horas de vida útil de operación de los cojinetes
- Válvula de comedera variable como mecanismo de control de la capacidad

**PUREtec**

**REFRIGERANTE PUREtec**

- Solución refrigerante a largo plazo
- Selección de HFO R-1234ze
- PCA<1 (ARS) o PCA<7 (ARI)
- ODP = 0

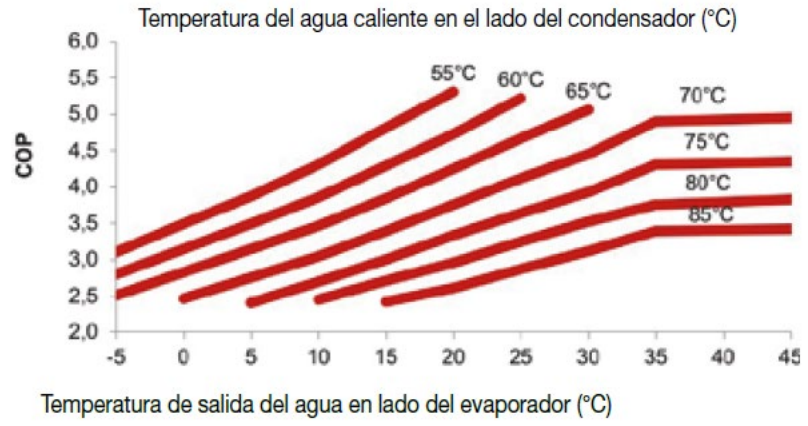
Ejemplo para climatización en redes de distrito de alta temperatura

[Carrier]

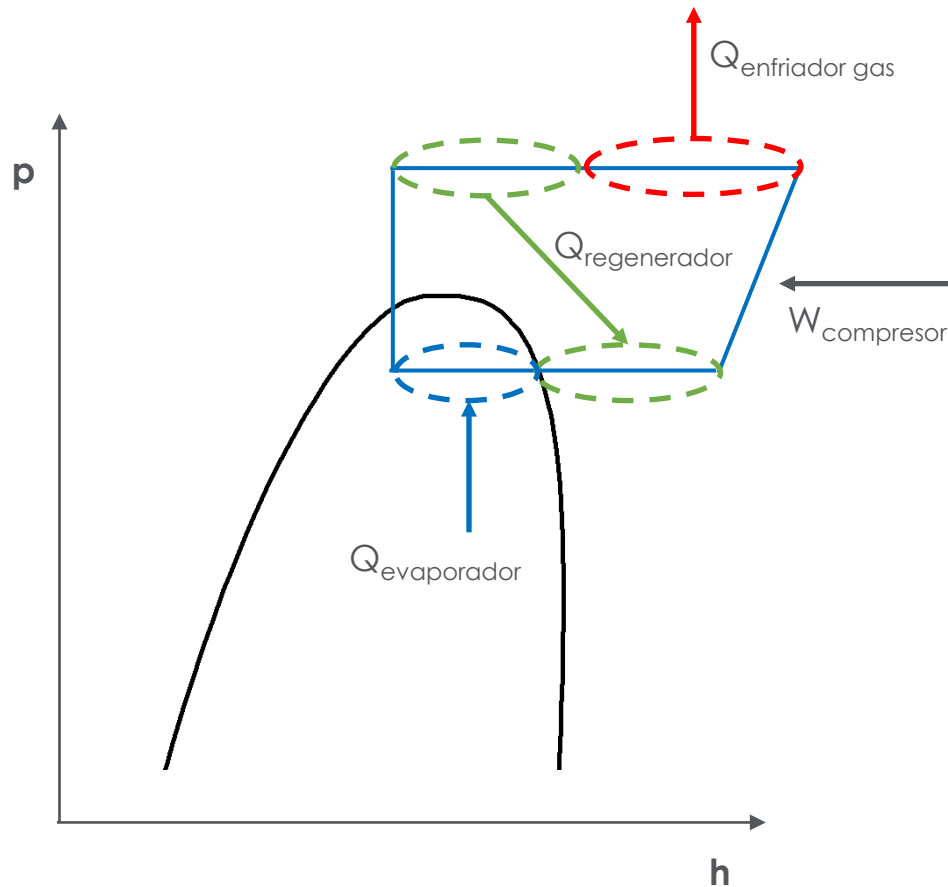
Existen otras tipologías, por debajo de 150°C, para aplicaciones industriales



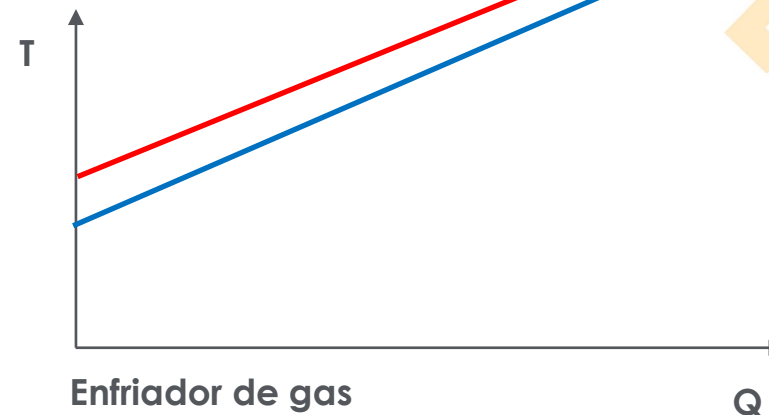
**COP DE 61XWHZE**



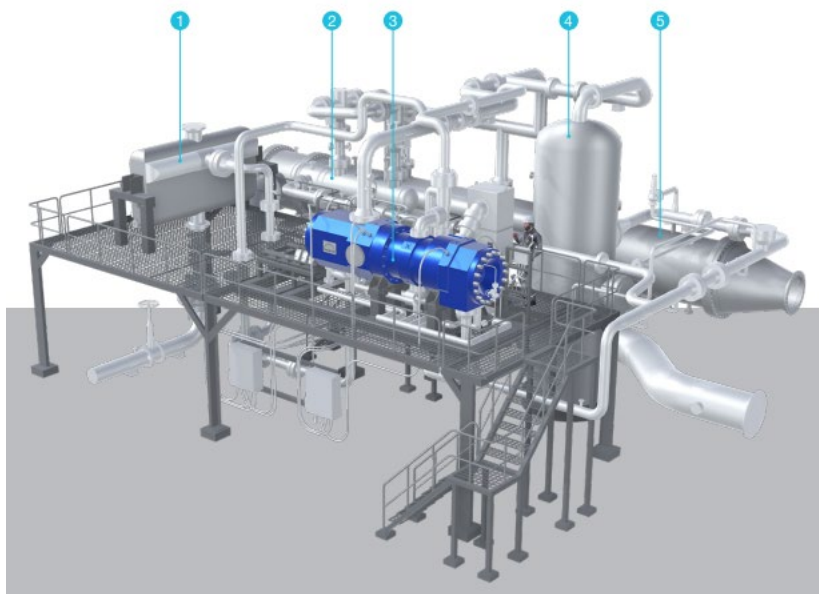
# Ciclo Rankine inverso transcrito



- La cesión de calor ocurre sin cambio de fase
- Normalmente se emplea un regenerador para precalentar la salida del evaporador y alcanzar así mayores temperaturas a la salida del compresor
- Opcionalmente se puede poner expansor (en zona monofásica)
- Ciclo muy apropiado para CO<sub>2</sub>



# Ejemplo Rankine inverso transcrito



- 1 Heat Sink HEX  
PCHE Type
- 2 Recuperator  
S&T, Plate or PCHE Type
- 3 HOFIM® Compressor  
and Expander
- 4 CO<sub>2</sub> Separator
- 5 Evaporator  
S&T, Plate or PCHE Type



Dismantled HOFIM® Heat Pump core unit

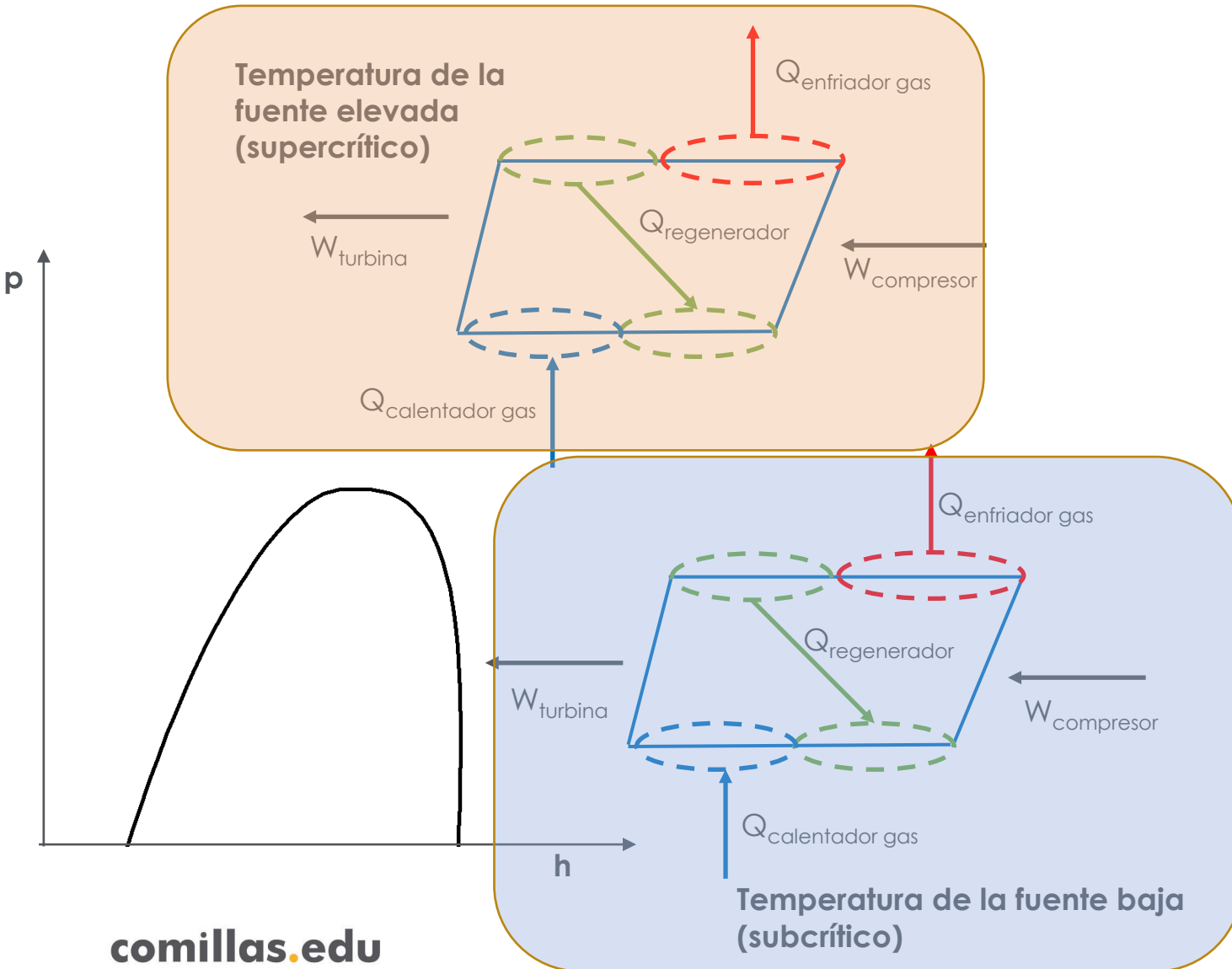
## Nominal Conditions

MAN Heat Pump		HPU28	HPU33	HPU43
Nominal reference conditions: - Heat sink supply / return temp.: 110°C / 40°C (230°F / 104°F) - Heat source temp.: 10°C (50°F)				
Unit				
No. compressors	Pcs.	1	1	1
Variable speed drive (VSD)		Yes	Yes	Yes
Max. thermal turndown	%	50	50	50
Refrigerant charge (CO <sub>2</sub> )	kg (lbs)	9'000 (19'841)	13'750 (30'313)	20'000 (44'092)
Electrical supply voltage <sup>1</sup>	kV	min. 4.16	min. 6	Min. 6
Heating capacity	kW <sub>th</sub> (MMBtu/h)	9'670 (33)	25'230 (86)	48'400 (165)
Cooling capacity	kW <sub>th</sub> (tons)	6'270 (1783)	16'730 (4757)	32'500 (9241)
Motor inlet power <sup>2</sup>	kW <sub>el</sub>	3'400	8'500	15'900
COP (Hot)	-	2.84	2.97	3.04
COP (Cold)	-	1.84	1.97	2.04
COP (total excl. pumps)	-	4.68	4.94	5.08
Dimensions (L/W/H)	m (ft)	12/8/8 (40/26/26)	16/8/8 (52/26/26)	19/10/8 (62/33/26)
Floor load	kN/m <sup>2</sup> (psf)		10 (209)	
Connections at heat sink	-	DN200 (4")	DN300 (12")	DN400 (16")
Connections at heat source	-	DN500 (20")	DN900 (36")	DN1400 (56")
Design pressure	Barg (psig)		180 (2610)	
Design temperature	°C (°F)		200 (392)	
Controller type	-		PLC (Programmable logic controller)	
Communication protocol	-		MODBUS/PROFINET/Ethernet	

<sup>1</sup> Higher voltages are possible <sup>2</sup> Higher motor power is possible (case specific)



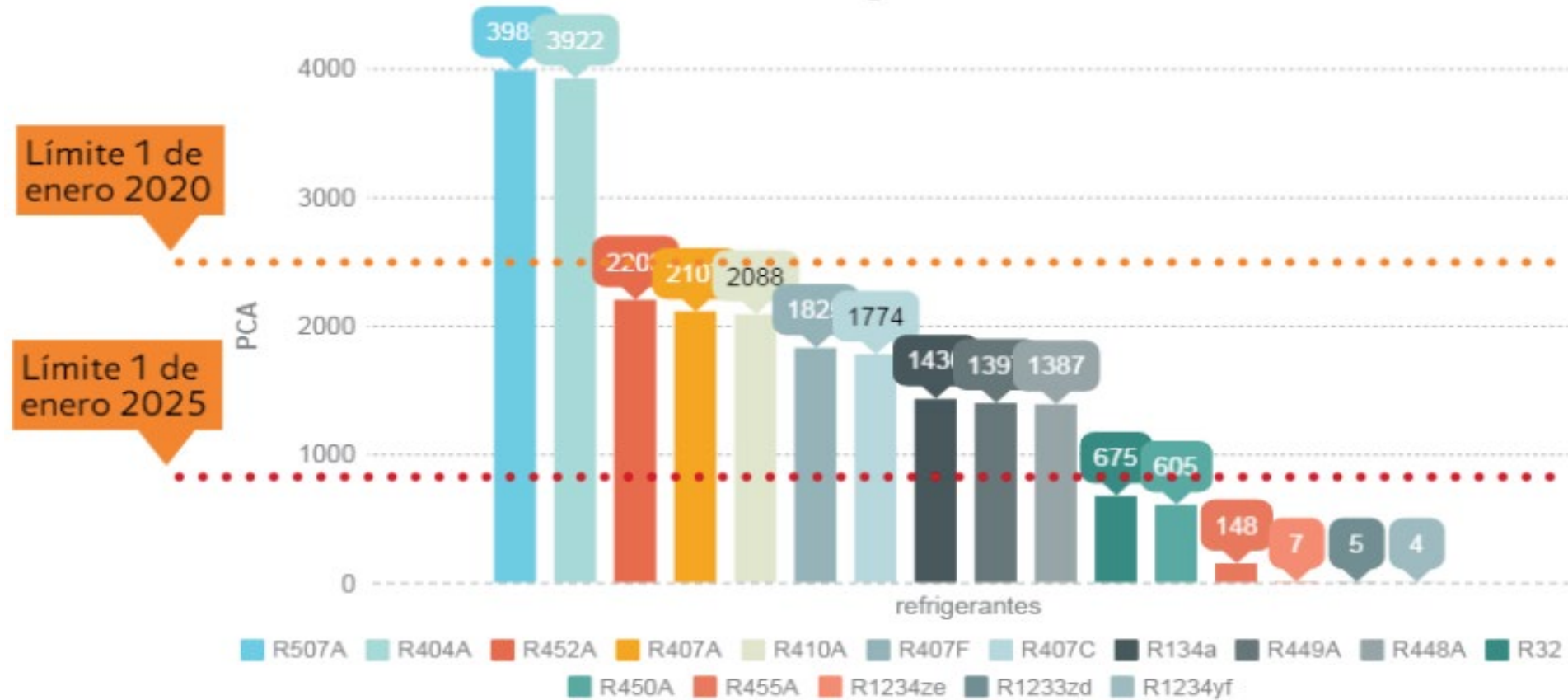
# Ciclo Brayton inverso



- Recorrido por un gas. La cesión de calor ocurre sin cambio de fase (más adecuado a fuentes/demandas sensibles)
- Se emplea regenerador
- CO2 muy adecuado para reducir tamaños
- Los equipos son turbomáquinas, no máquinas volumétricas (facilidad para alcanzar altas temperaturas)
- Es el ciclo de las "turbinas de gas", pero recorrido al revés y sin combustión

# Reglamento F-GAS











Nivel de PCA de los refrigerantes del mercado actual



[Calor y Frío.com]

# Reglamento F-GAS

## ALTERNATIVAS

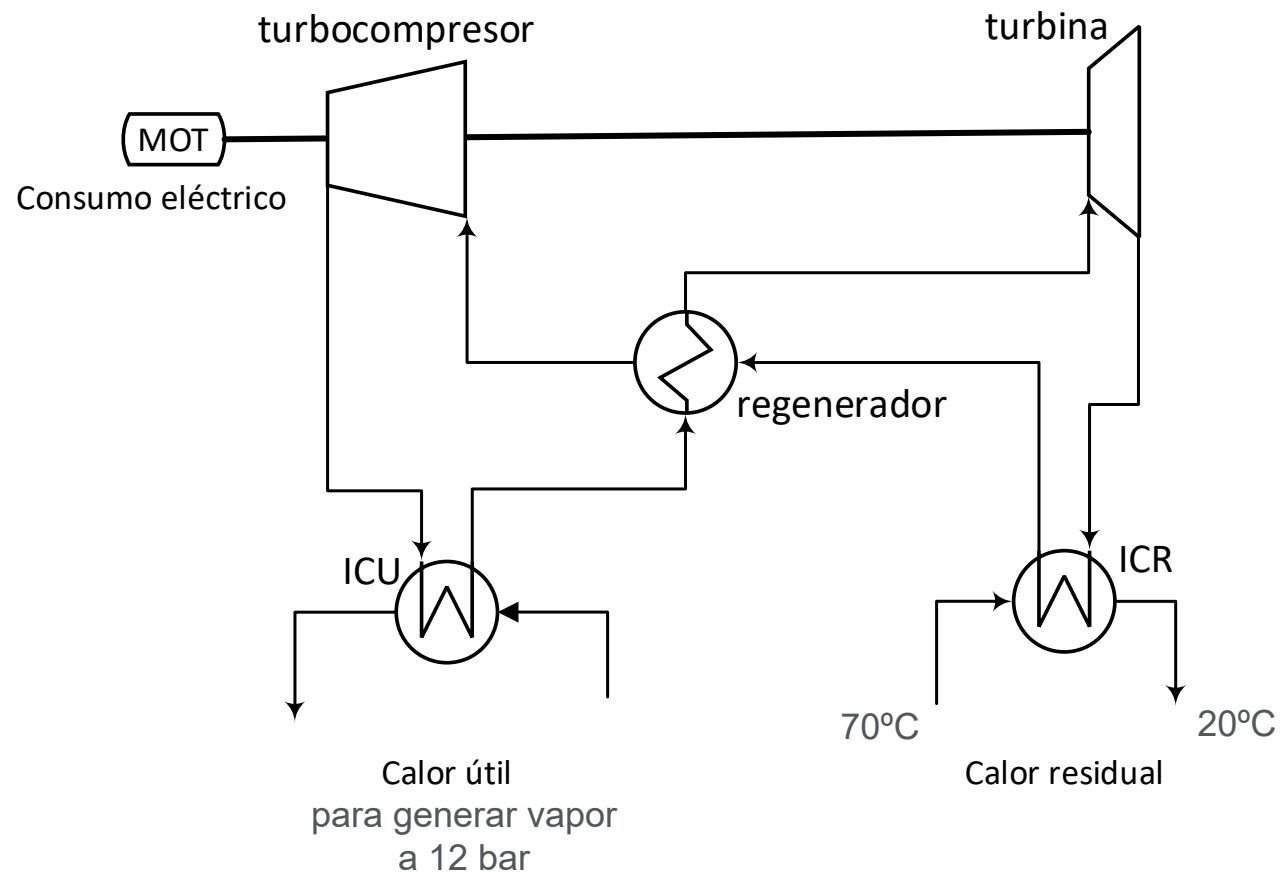
 <p>R32</p>	Tipo: HFC PCA: 675 Clase: A2L	 <p>DR55</p>	Tipo: HFC/HFO PCA: 676 Clase: A2L	 <p>R450A</p>	Tipo: HFC/HFO PCA: 605 Clase: A1	
 <p>1234ze</p>	Tipo: HFO PCA: 7 Clase: A2L	 <p>1233zd</p>	Tipo: HFO PCA: 4,5 Clase: A1	 <p>1234yf</p>	Tipo: HFO PCA: 4 Clase: A2L	
Refrigerantes naturales (no fluorados) 		 <p>R744 CO2</p>	Dióxido de carbono PCA: 1	 <p>R717 NH3</p>	Amoniaco PCA: 0	 <p>R290 R1270 R600</p>

\*Clases de seguridad ASHRAE  
A1 nula inflamabilidad  
A2L baja toxicidad, baja inflamabilidad



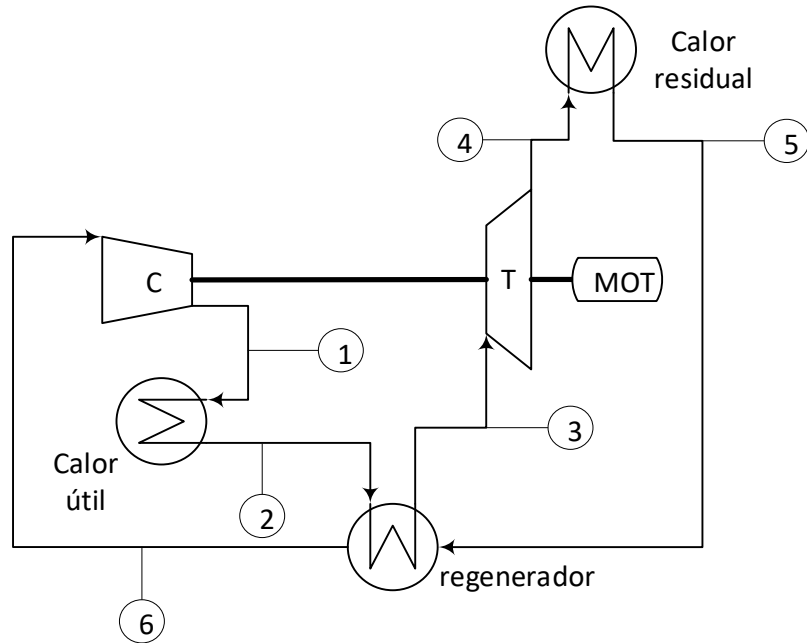
# NUEVO DISEÑO DE BOMBA DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA APLICADO A INDUSTRIA PAPELERA

# Aplicación: generación de vapor a partir de efluente de proceso



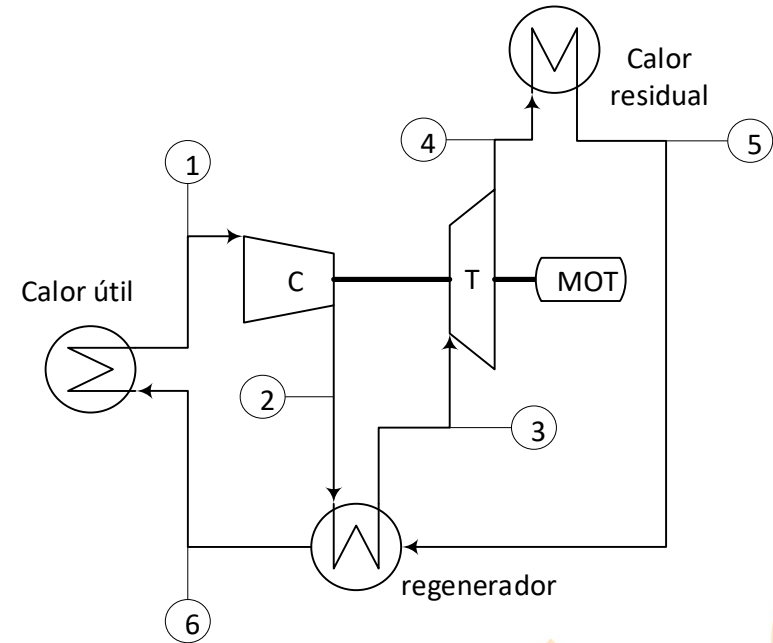
Brayton inverso

# Ciclo Brayton inverso. Variantes



Convencional

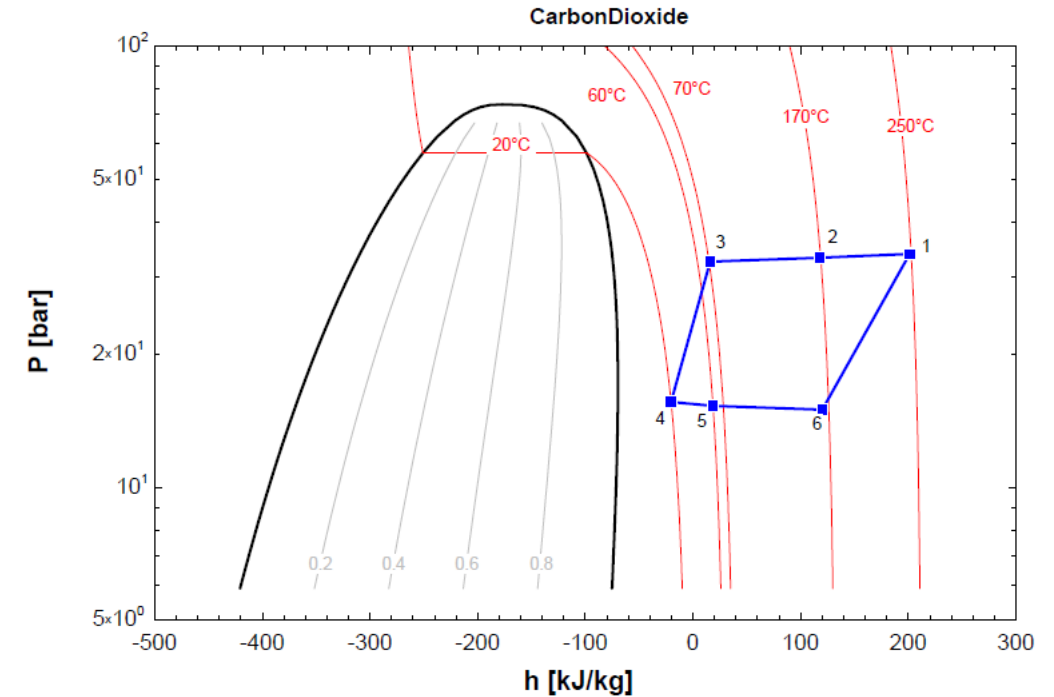
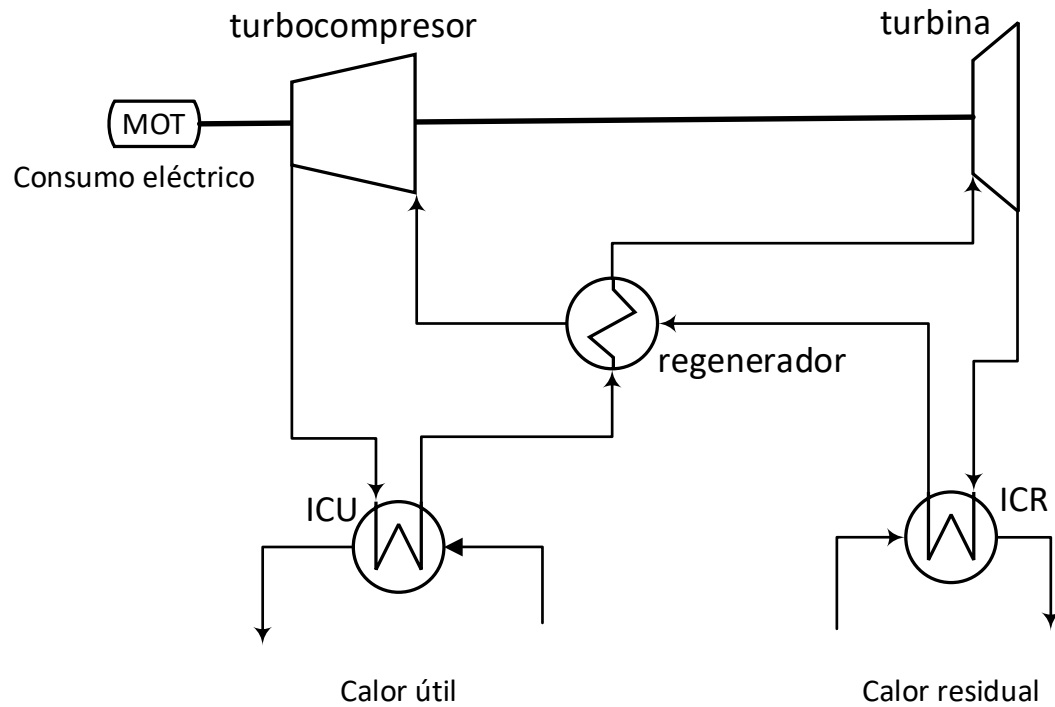
- El fluido de trabajo está en alta presión en el intercambiador de calor útil
- Dificulta almacenamiento en sales o cesión de calor a gases



Baja presión

- El intercambiador de calor útil se ha movido a baja presión
- Facilita almacenamiento en sales o cesión de calor a gases

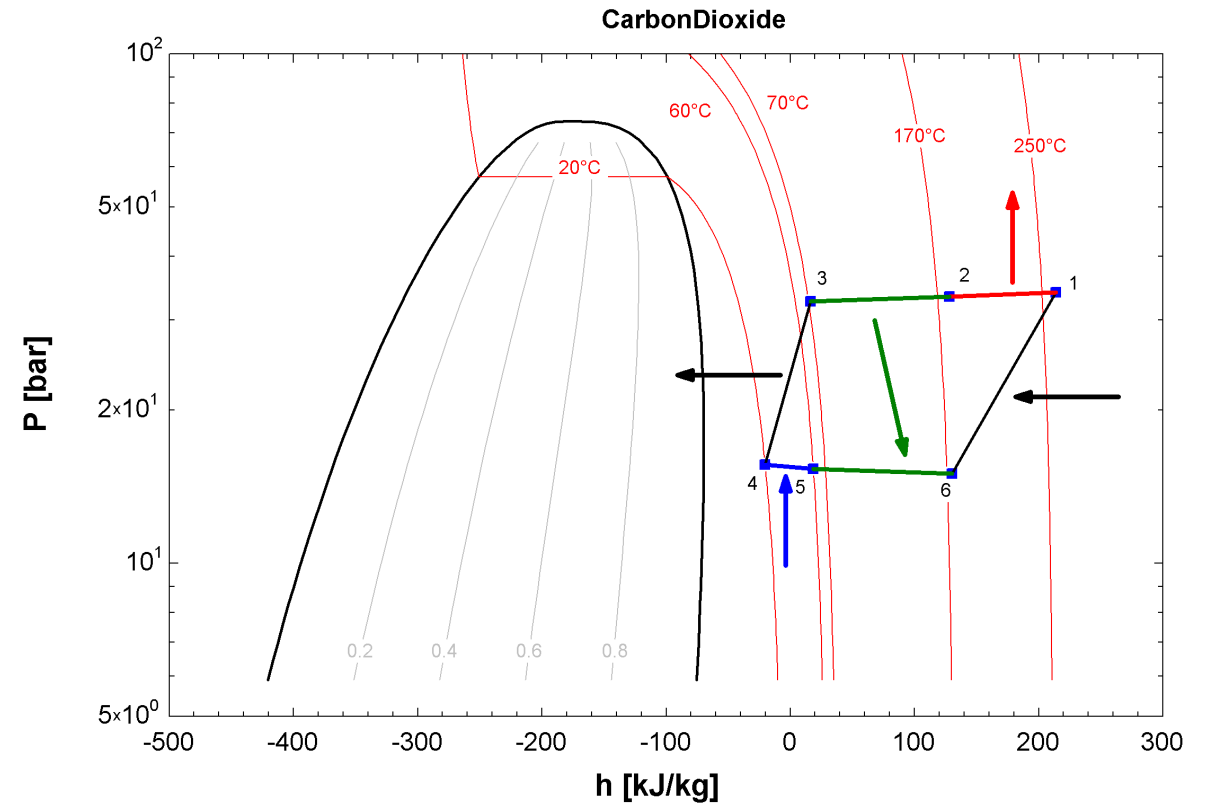
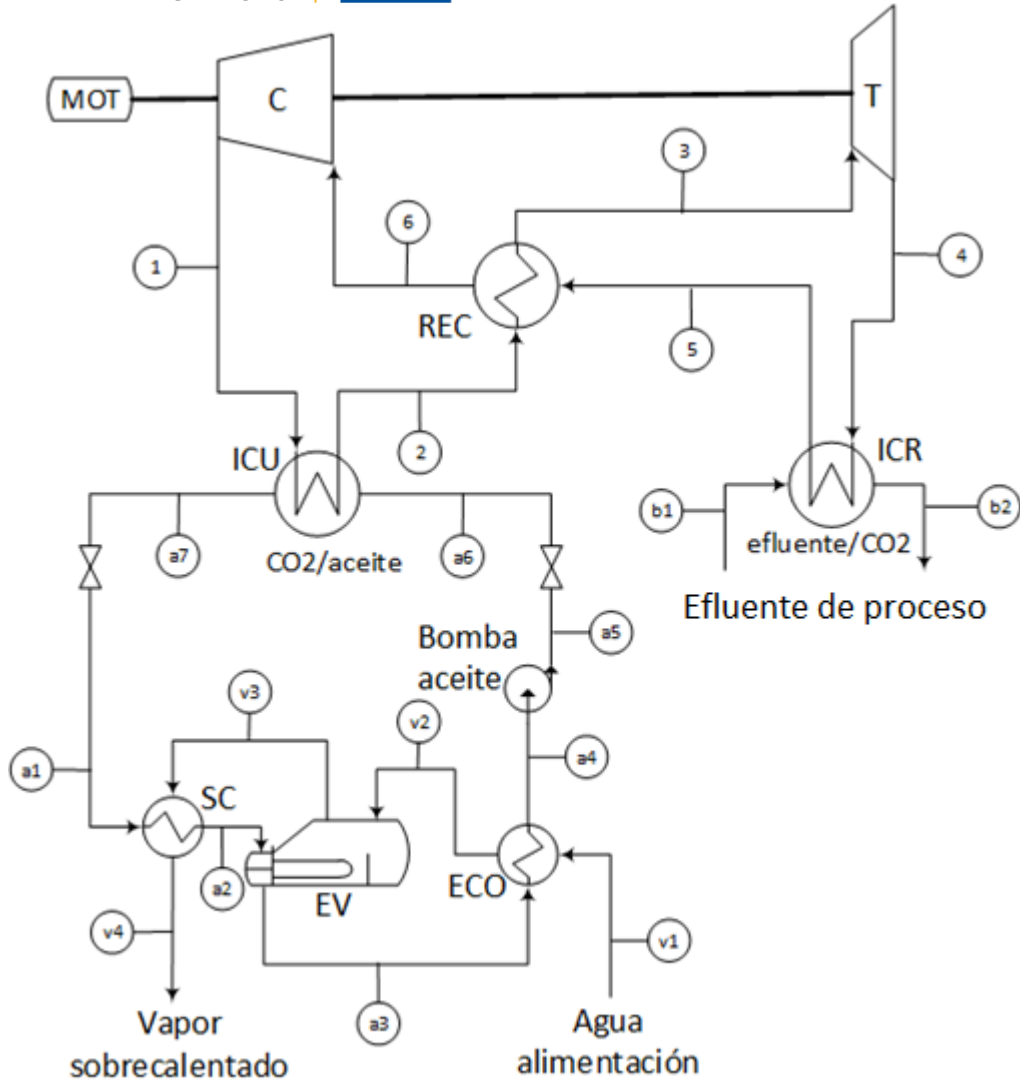
# Generación de vapor a partir de efluente de proceso



- Funcionamiento 24/7, no se requiere almacenamiento
- Alimentación 70 °C/20 °C; producción vapor a 12 bar

- Operación a “baja” temperatura (250 °C/170 °C)
- CO<sub>2</sub> en zona vapor sobrecalentado
- Presiones como en refrigeración industrial

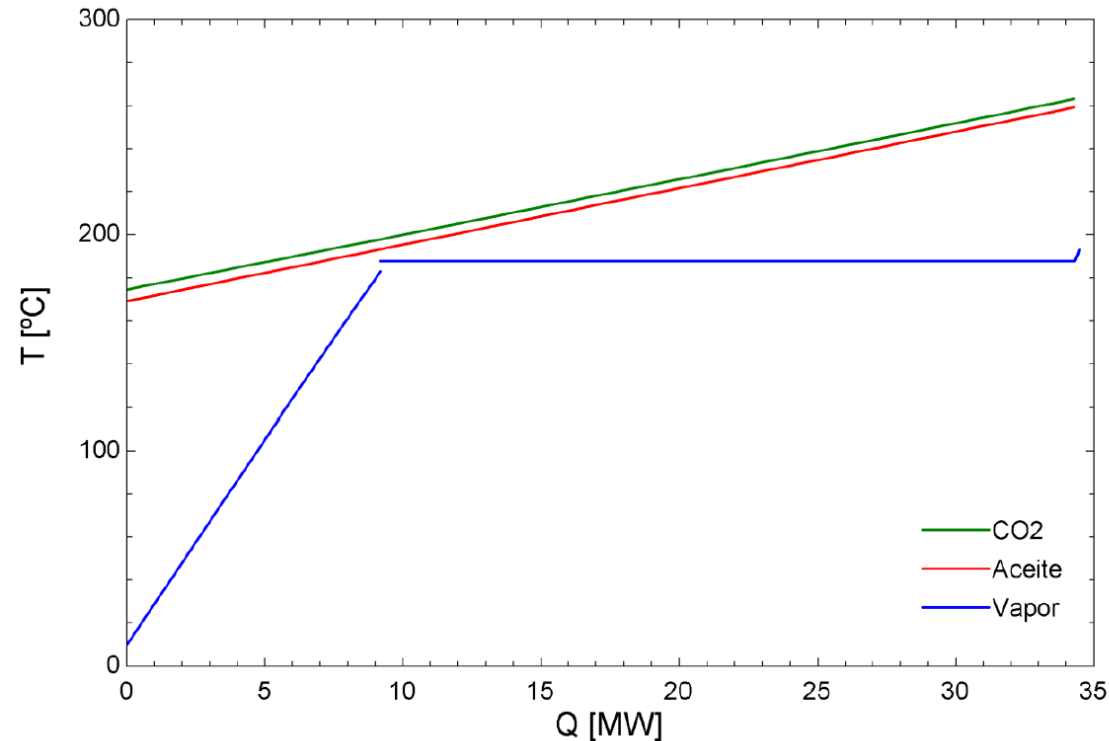
# Generación de vapor a partir de efluente de proceso



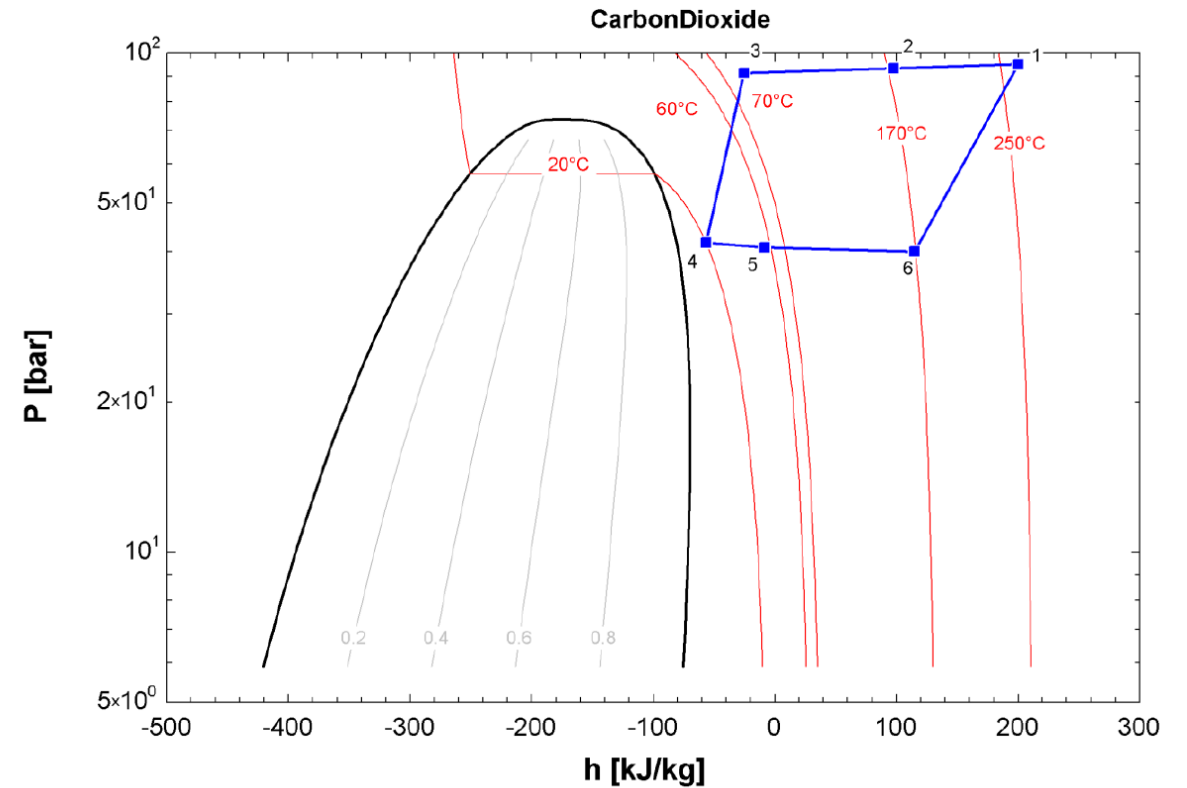
- CO2/Aceite para ceder calor al sumidero: ciclo convencional (alta presión)
- Agua/CO2 para tomar calor de la fuente: siempre está colocado en baja presión



# Escenario 1. Vapor a 12 bar

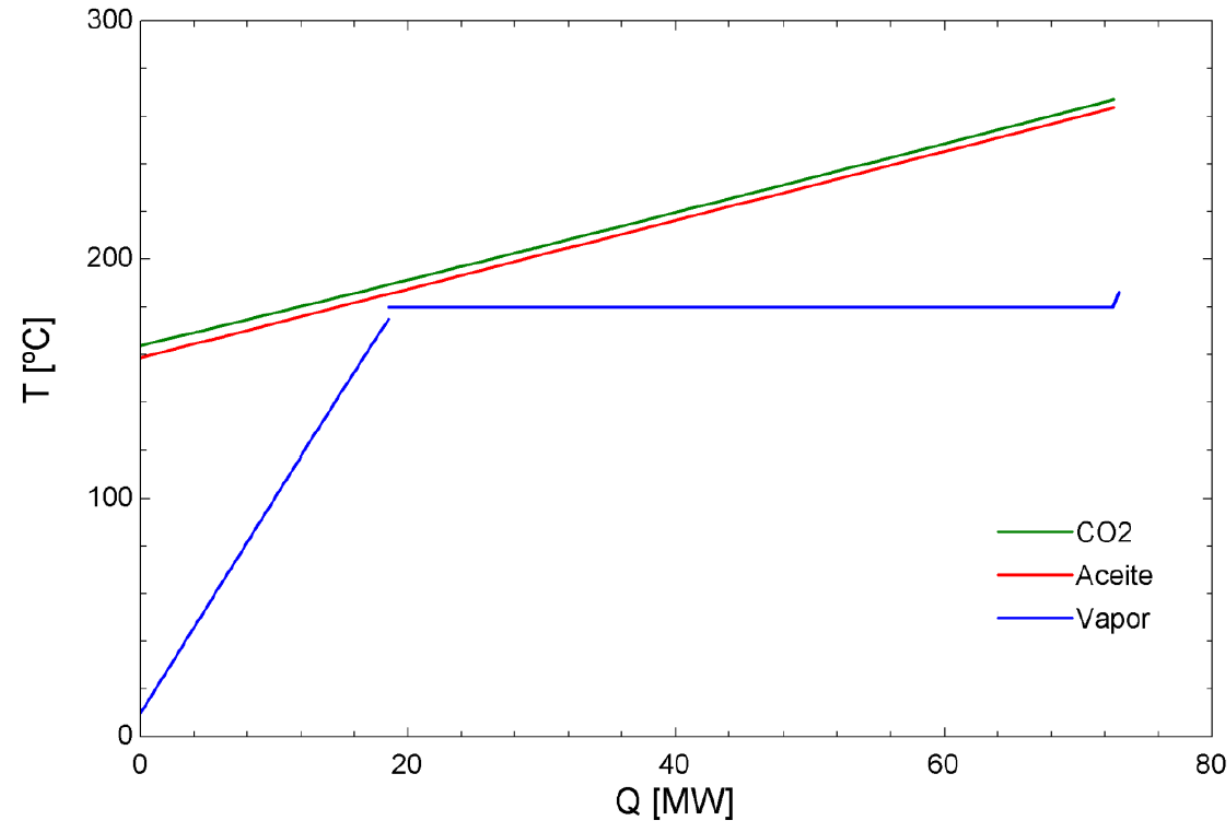


- Efluente: 387,4 m<sup>3</sup>/h / 60,87°C → 25°C
- Vapor: 10°C (río) → 193°C (10,98 barg); 45,05 t/h

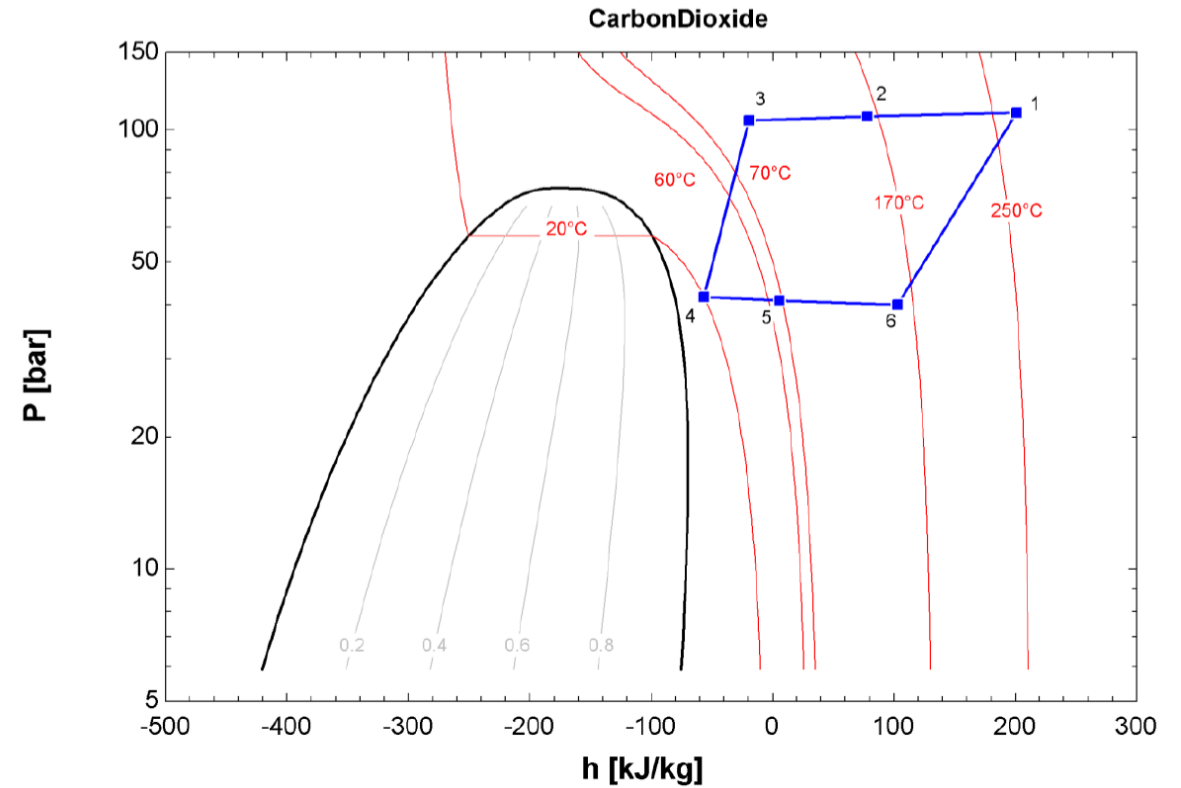


- Consumo bomba calor: 18,13 MWe
- Calor efluente: 16,14 MWt
- Calor vapor: 34,27 MWt (COP = 1,89)
- Consumo bomba aceite: 200 kWe
- Expansión a condensación: 7 MWe
- Expansión a contrapresión (actual): 5,6 MWe

## Escenario 2. Vapor a 10 bar



- Efluente: 660,5 m<sup>3</sup>/h / 73,03°C → 25°C
- Vapor: 10°C (río) → 186°C (9 barg); 95,6 t/h



- Consumo bomba calor: 35,8 MWe
- Calor efluente: 36,9 MWt
- Calor vapor: 72,7 MWt (COP = 2,03)
- Consumo bomba aceite: 360 kWe
- Expansión a condensación: 14 MWe
- Expansión a contrapresión (actual): 11,9 MWe

# Costes

Tabla 4.19: Inversión requerida por los intercambiadores

Inter.	UA [W/(m <sup>2</sup> K)]	PEC [€]	ONSC [€]	FCI [€]
ICU	4.341.593	5.030.473	6.539.614	8.174.518
ICR	2.207.637	3.020.128	3.926.166	4.907.708
REC	5.087.890	5.669.939	7.370.920	9.213.651
Total HXs		13.720.539	17.836.701	22.295.876

En cuanto al generador de vapor, se tiene:

- PEC: 1.861.625 €
- ONSC: 3.723.250€
- FCI: 4.654.062€

Tabla 4.20: Inversión requerida por equipos rotativos

	Potencia [MW]	PEC [€]	ONSC [€]	FCI [€]
Compresor	57,851	6.214.692	8.079.100	10.098.875
Turbina	22,067	1.020.367	1.326.477	1.658.096
Motor	35,784	3.493.448	4.541.482	5.676.853
Total		10.728.507	13.947.059	17.433.824

Sumando las partidas anteriores se obtiene una inversión total (FCI) de 44.383.762€, que referida al calor útil nominal resulta 611 €/kW, ligeramente superior con respecto a la horquilla (300 a 500 €/kW) dada por la IEA [12] para una bomba de calor de MAN, comparable con la proyectada.

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

[earenas@comillas.edu](mailto:earenas@comillas.edu)

