

BOMBA DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA PARA DESCARBONIZAR LA INDUSTRIA

Eva Arenas

Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

11/02/2025

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 BC ALTA TEMPERATURA:

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

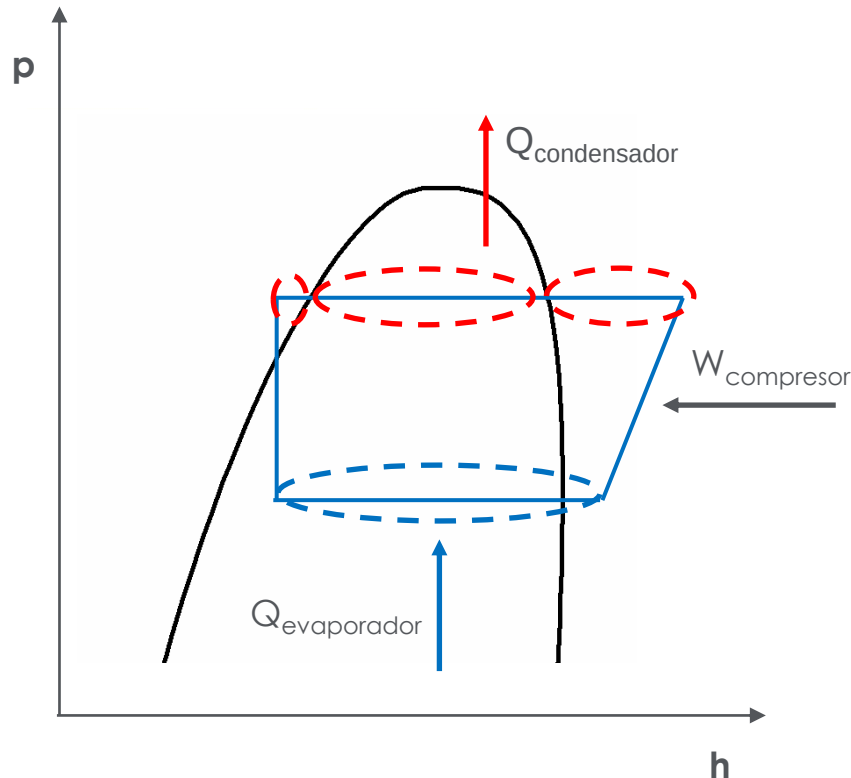
2025-26 ----- 160°C

y superar esa barrera en 2026-27

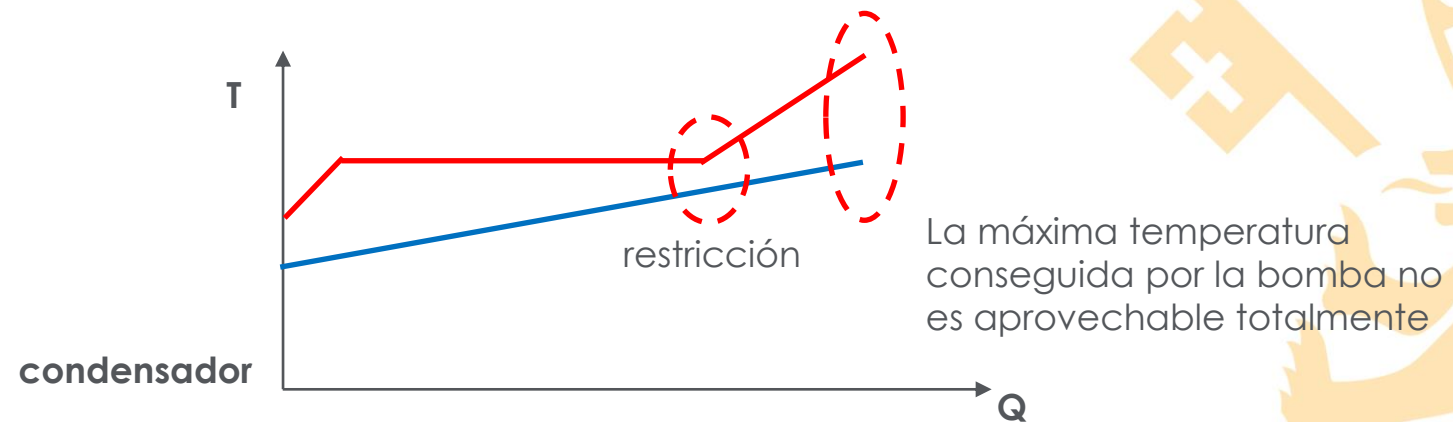
[Fuente: [TCP-IEA Annex 58 Task 1](#)]

CICLOS PARA BOMBAS DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA

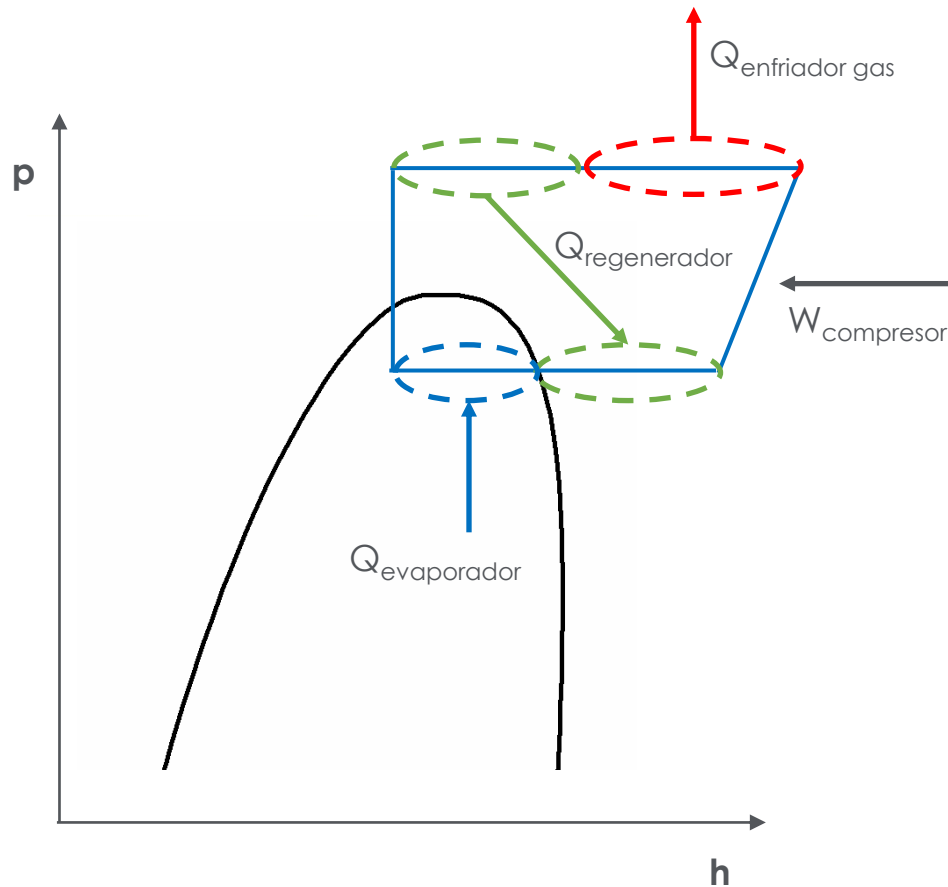
Bomba de calor convencional (Rankine inverso)



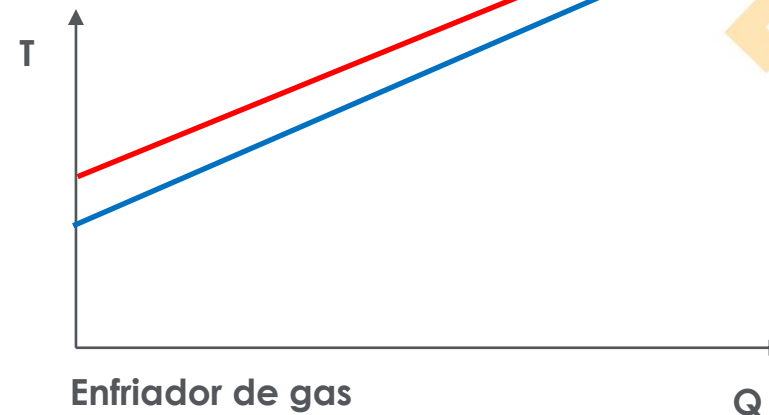
- Cualquier ciclo inverso puede actuar como bomba de calor.
- El ciclo convencional es un Rankine inverso.
- En la cesión de calor:
 - Tramos sensibles (variación de temperatura): principalmente desrecalentamiento, pero también subenfriamiento
 - Tramo de cambio de fase: temperatura constante: límite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



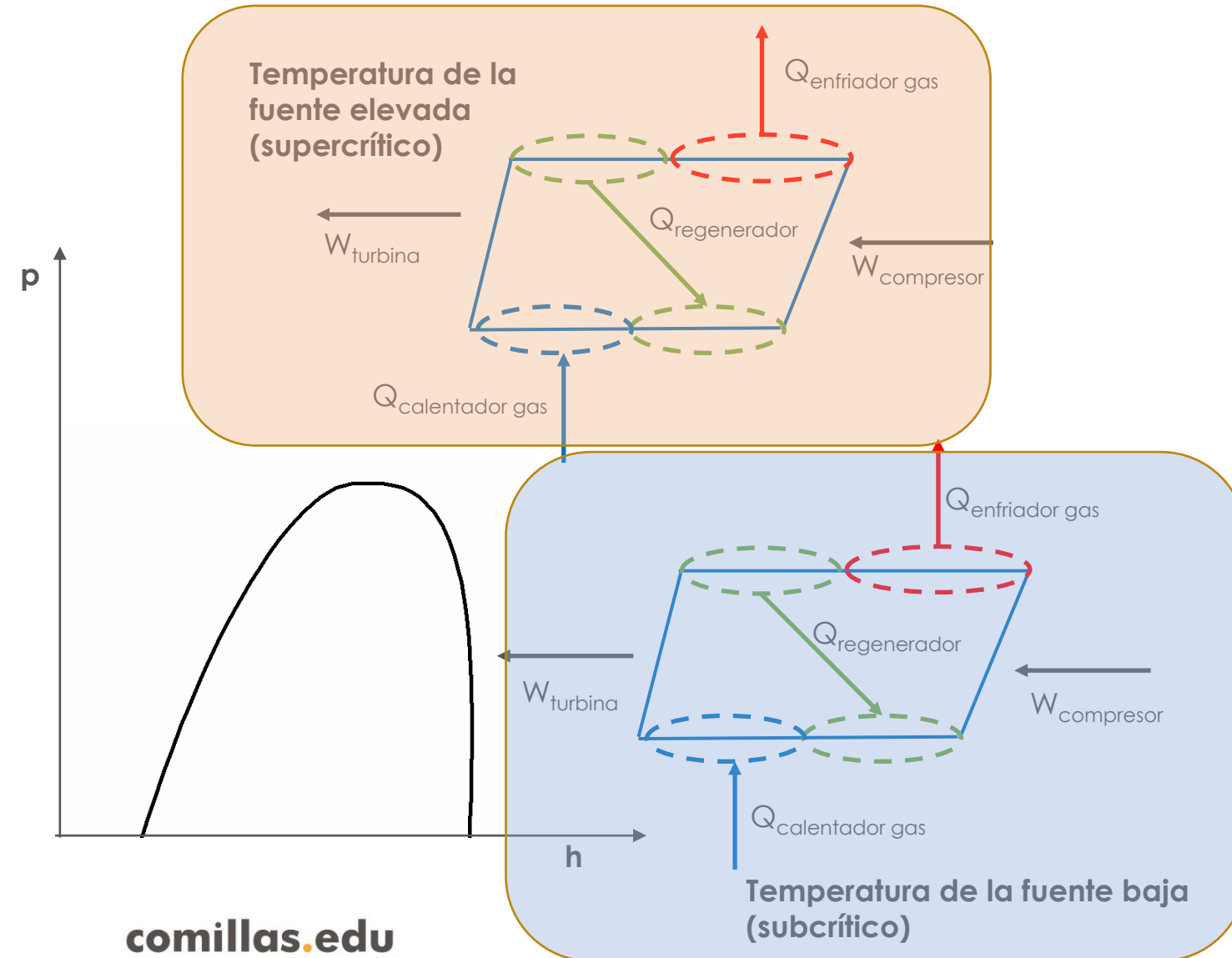
Ciclo Rankine inverso transcrito



- 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 CO₂

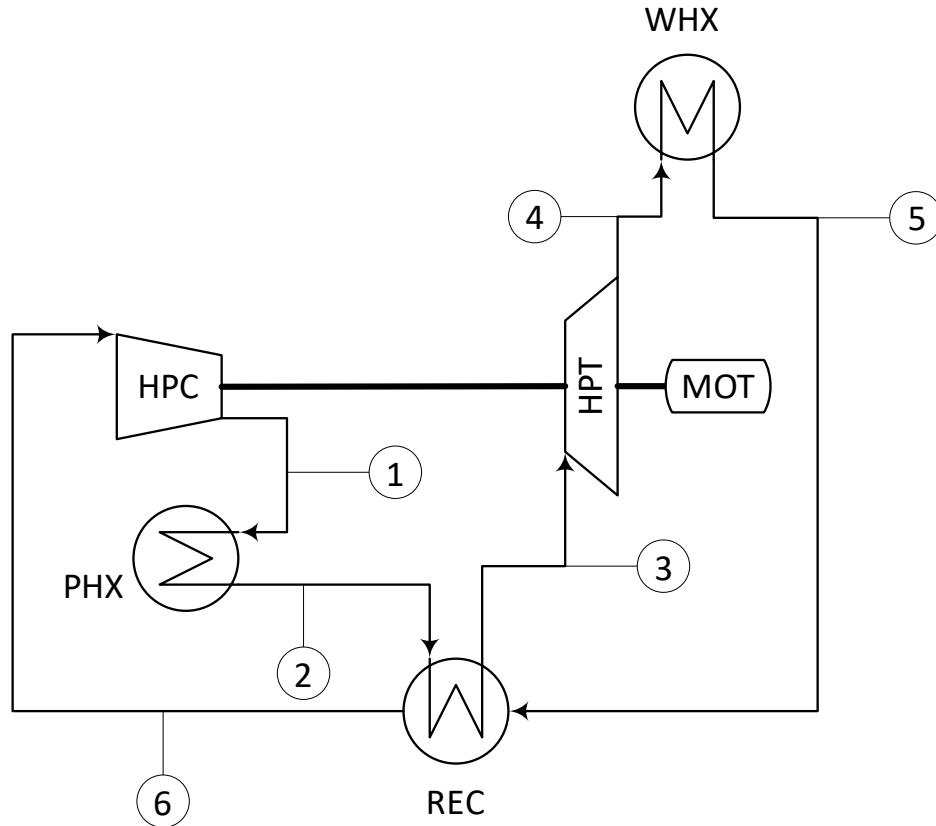


Ciclo Brayton inverso



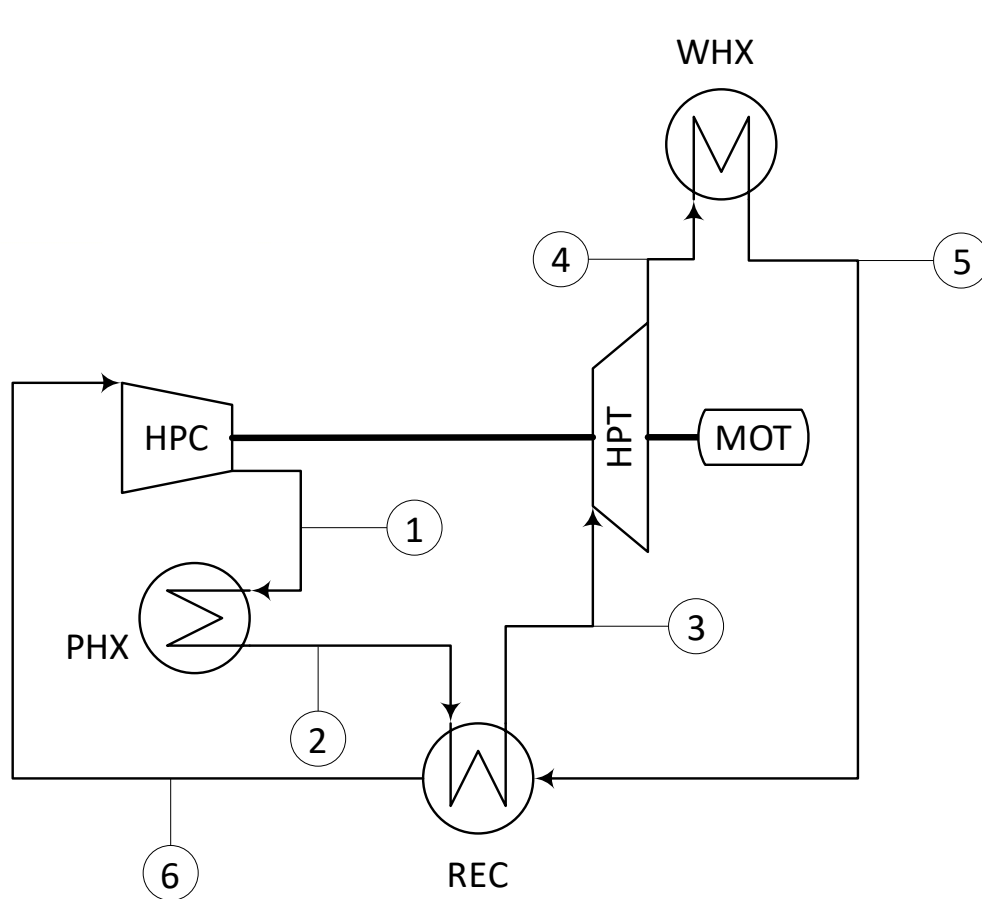
- Recorrido por un gas. La cesión de calor ocurre sin cambio de fase (más adecuado a fuentes/demandas sensibles)
- Se emplea regenerador
- CO2 muy adecuado para reducir tamaños
- Los equipos son turbomáquinas, no máquinas volumétricas (facilidad para alcanzar altas temperaturas)
- Es el ciclo de las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

Bomba de calor con ciclo Brayton inverso

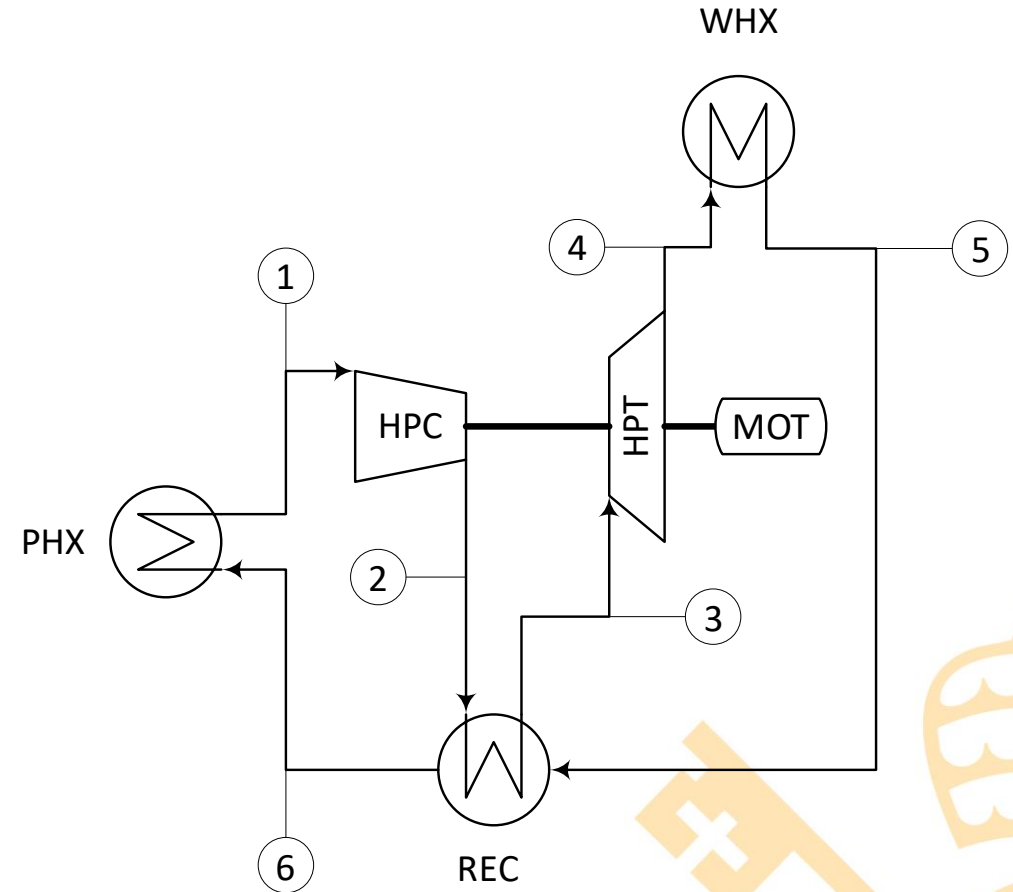


- WHX, intercambiador de calor de la fuente (calienta el gas), en el lado de baja presión
- PHX, intercambiador de calor del producto (enfría el gas), en el lado de alta presión

Bomba de calor con ciclo Brayton inverso



- PHX en el lado de alta presión
- Mejor opción sin almacenamiento técnico

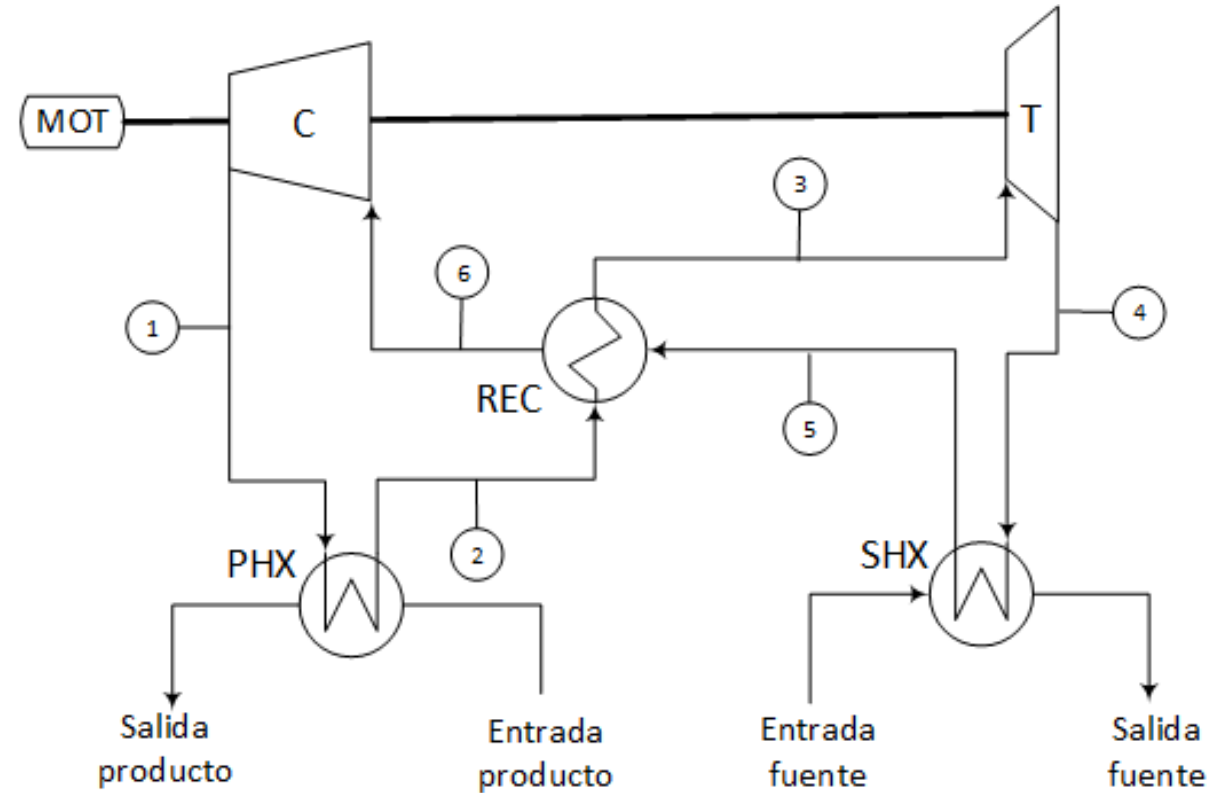


- PHX en el lado de baja presión
- Mejor opción si se requiere almacenamiento

APLICACIONES A RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL

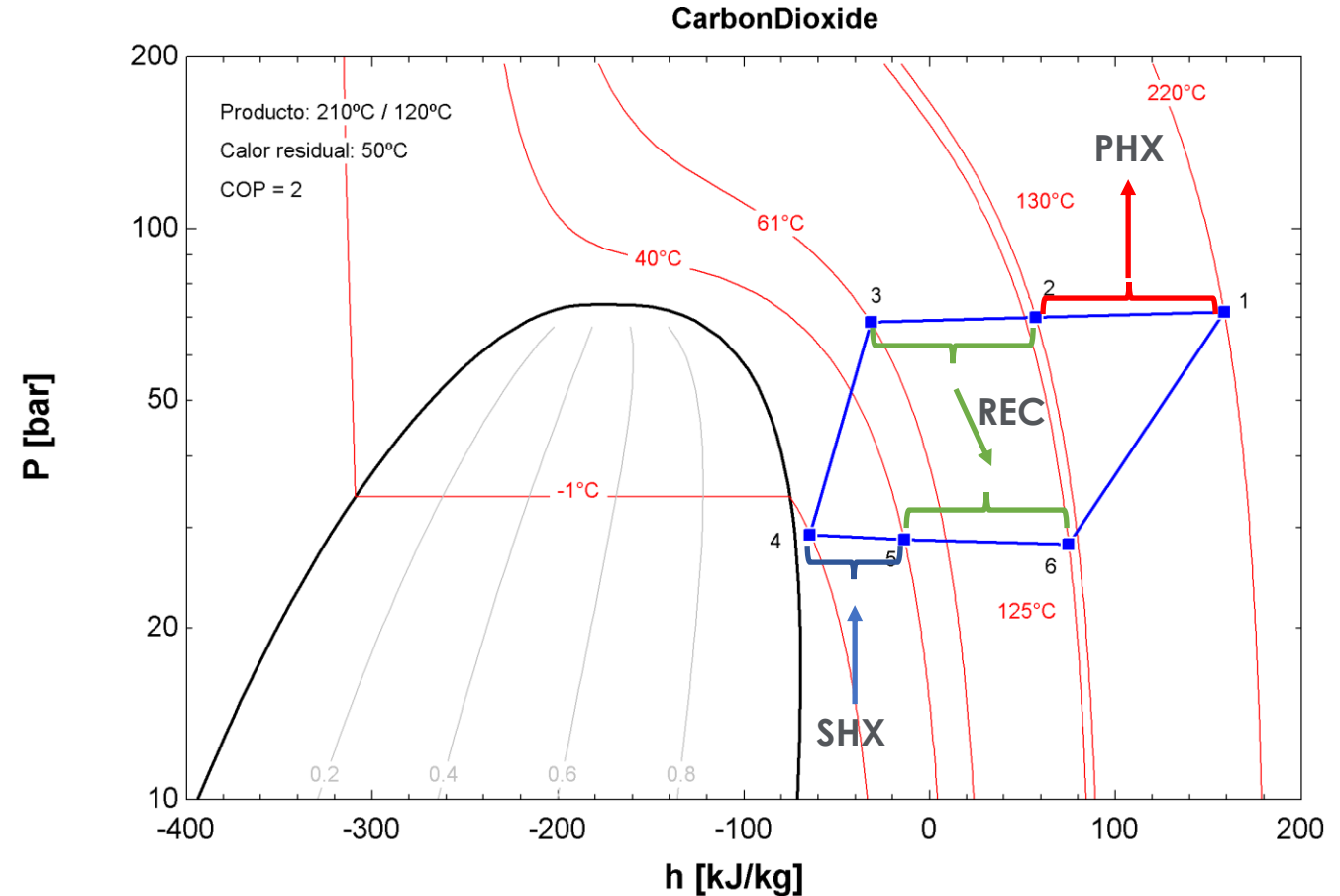
Aplicación 1: Producción de agua caliente

- Producto: agua caliente 210 °C/ 120 °C
- Fuente: dos casos: calor residual a 100 °C o 50 °C
- No es necesario almacenamiento térmico (por el tipo de proceso)
- Empleo de campo FV para alimentar la bomba de calor



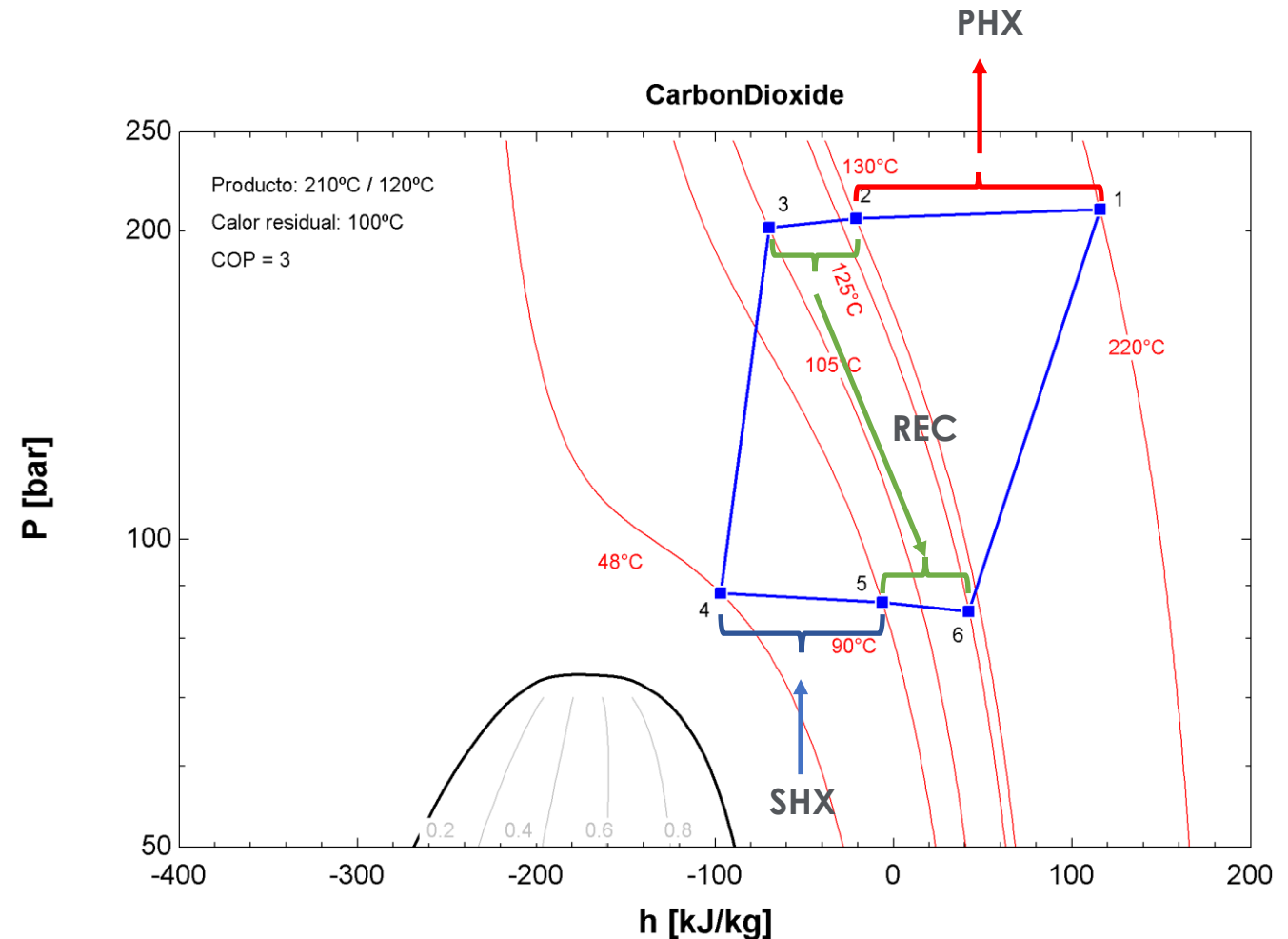
Aplicación 1: Producción de agua caliente

- **Calor residual a 50 °C**
- Calor residual (SHX)
 - ✓ Entrada a 50 °C
 - ✓ Salida a 9 °C
- Producto (PHX)
 - ✓ Entra agua a 120 °C
 - ✓ Sale agua a 210 °C
- $COP = 2$
- La salida puede utilizarse como fuente para enfriadoras

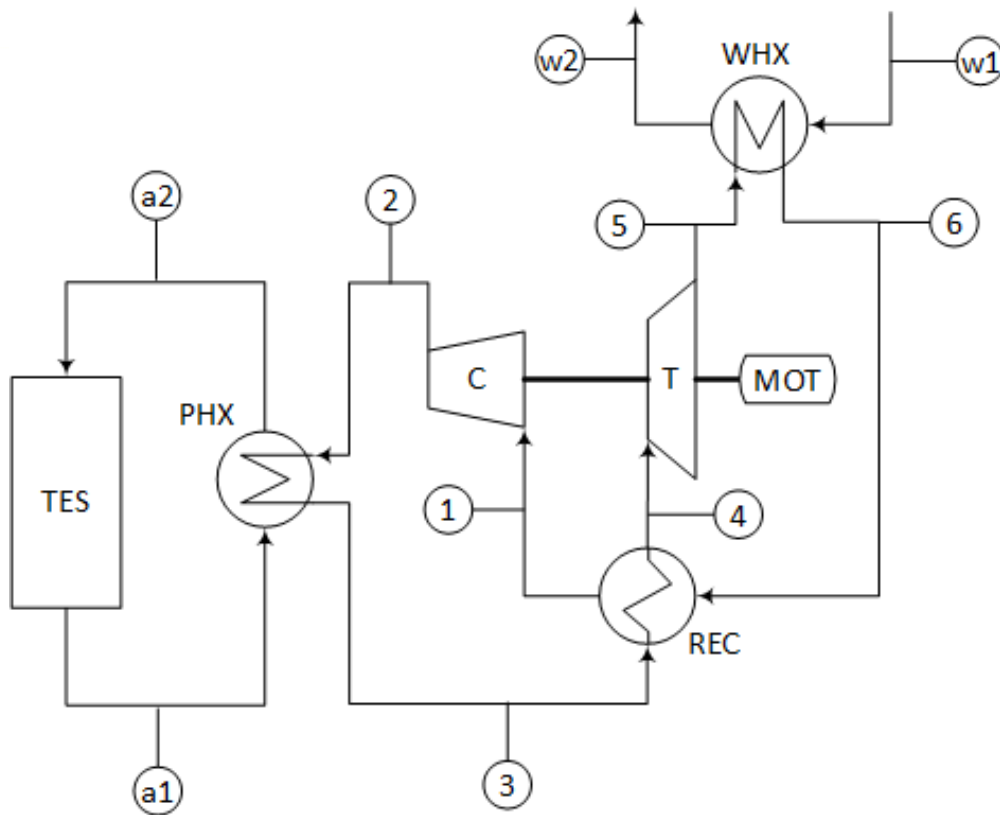


Aplicación 1: Producción de agua caliente

- **Calor residual a 100 °C**
- Calor residual (SHX)
 - ✓ Entrada a 100 °C
 - ✓ Salida a 58 °C
- Producto (PHX)
 - ✓ Entra agua a 120 °C
 - ✓ Sale agua a 210 °C
- COP = 3
- La salida puede utilizarse como fuente para precalentar

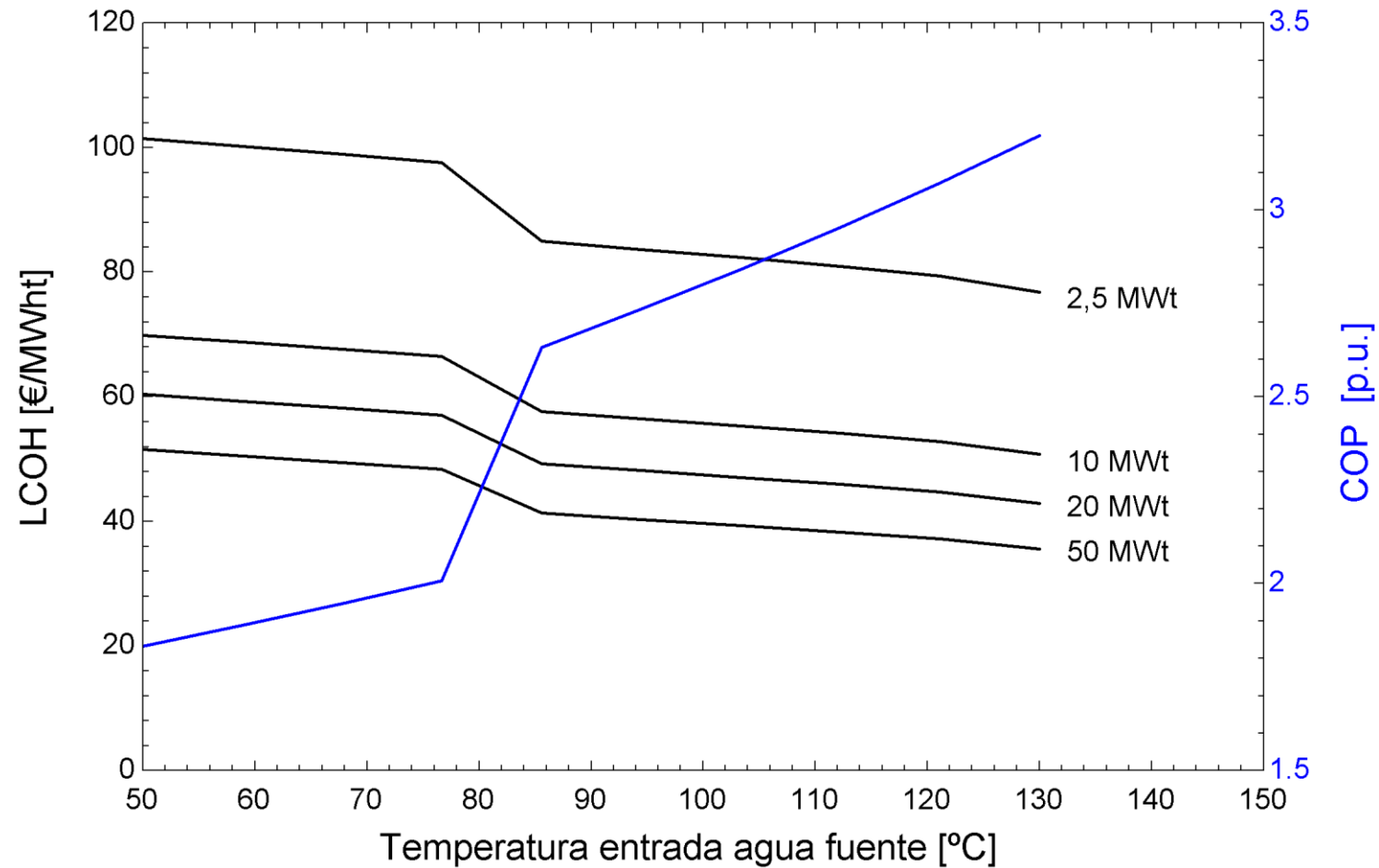


Aplicación 2: Producción de agua caliente con almacenamiento



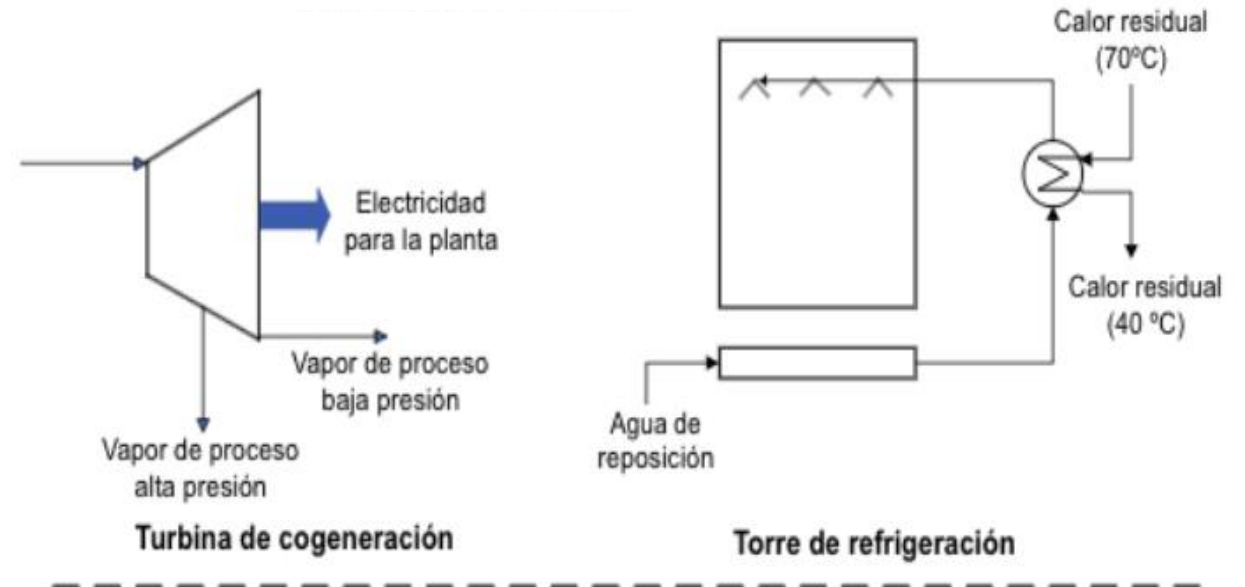
- Agua como fluido calorportador tanto en la fuente como en el producto
- Producto (PHX)
 - ✓ Entra agua a 120 °C
 - ✓ Sale agua a 210 °C
- Almacenamiento del producto en tanque con termoclina.
- Producción en 12 horas (7 FV, 5 eólicas)

Aplicación 2: Producción de agua caliente con almacenamiento

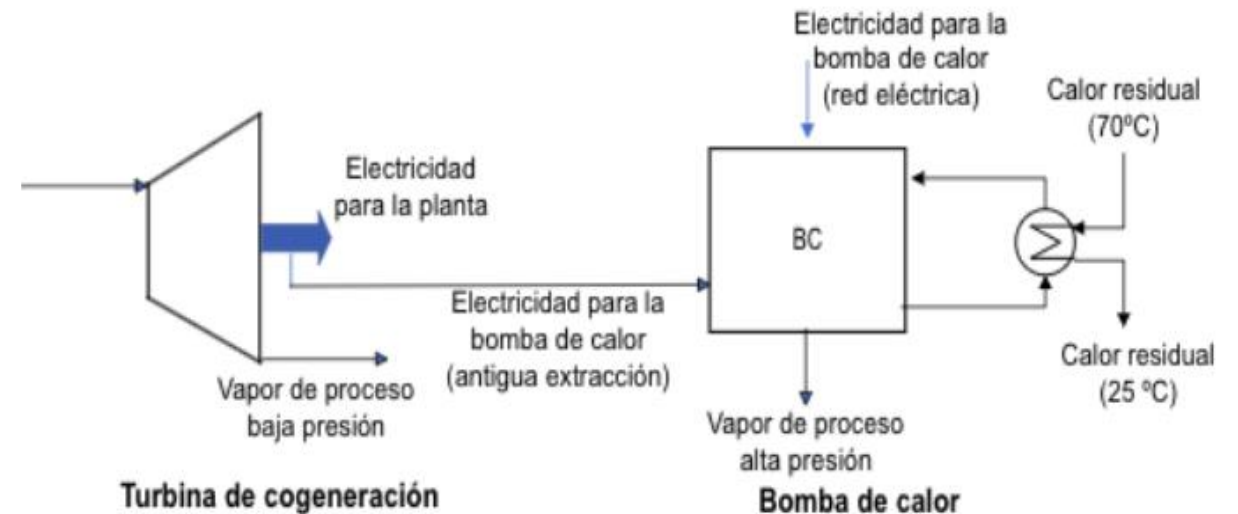


Aplicación 3: Producción de vapor (10 – 12 bara)

Situación actual

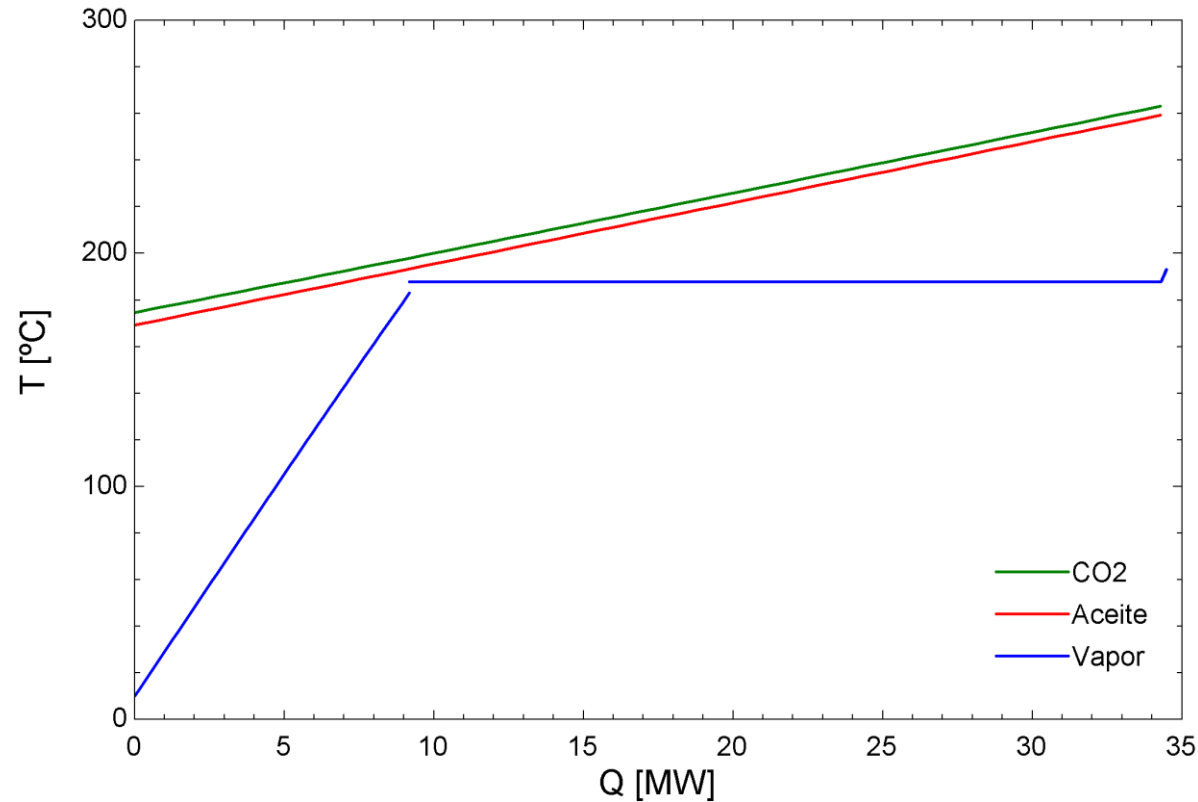


Tras integrar la bomba de calor

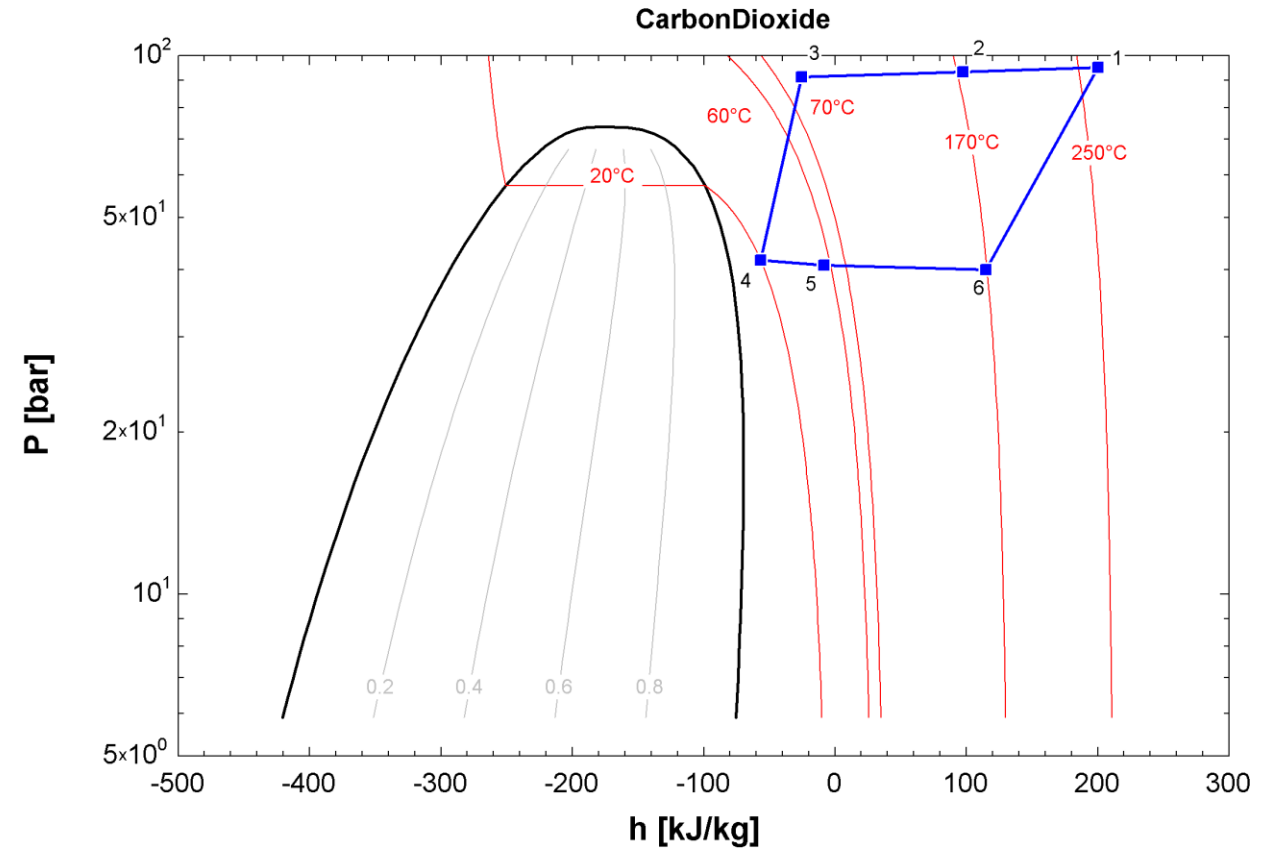


[A. González-Alonso, Master Thesis, 2024]

Aplicación 3: Producción de vapor (12 bara)

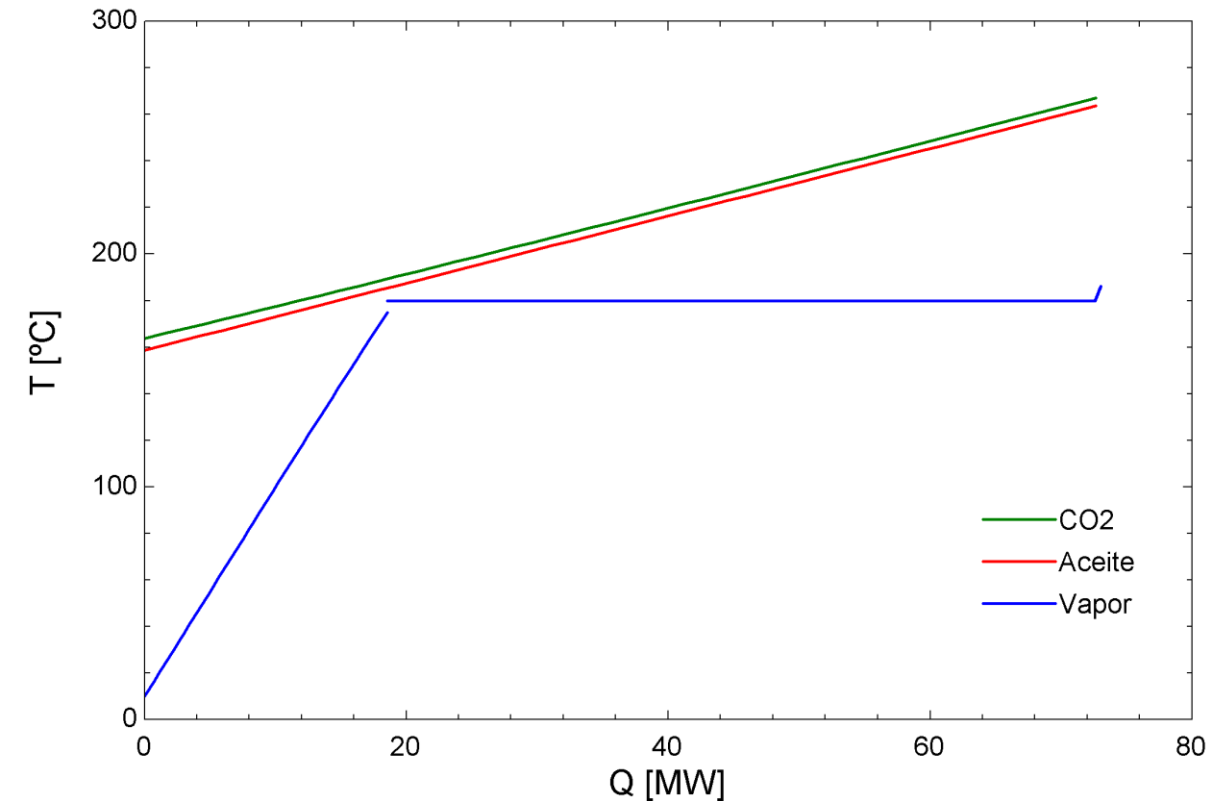


- Efluente de proceso: 70 °C → 25 °C
- Vapor: 10 °C (río) → 193 °C (12 bara); 45 t/h

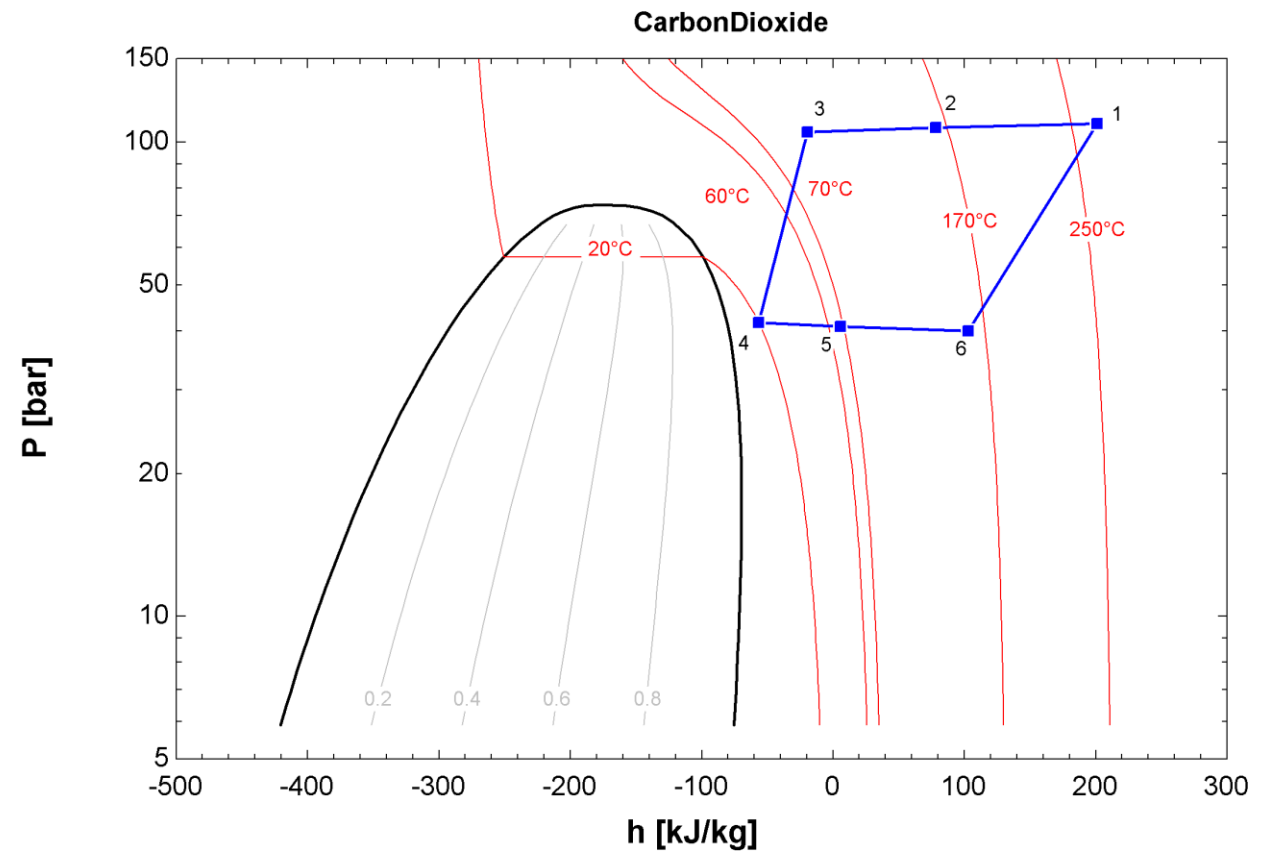


- Consumo bomba calor: 18 MWe
- Calor residual: 16 MWth
- Vapor: 34 MWth
- **COP = 1.89**

Aplicación 3: Producción de vapor (10 bara)

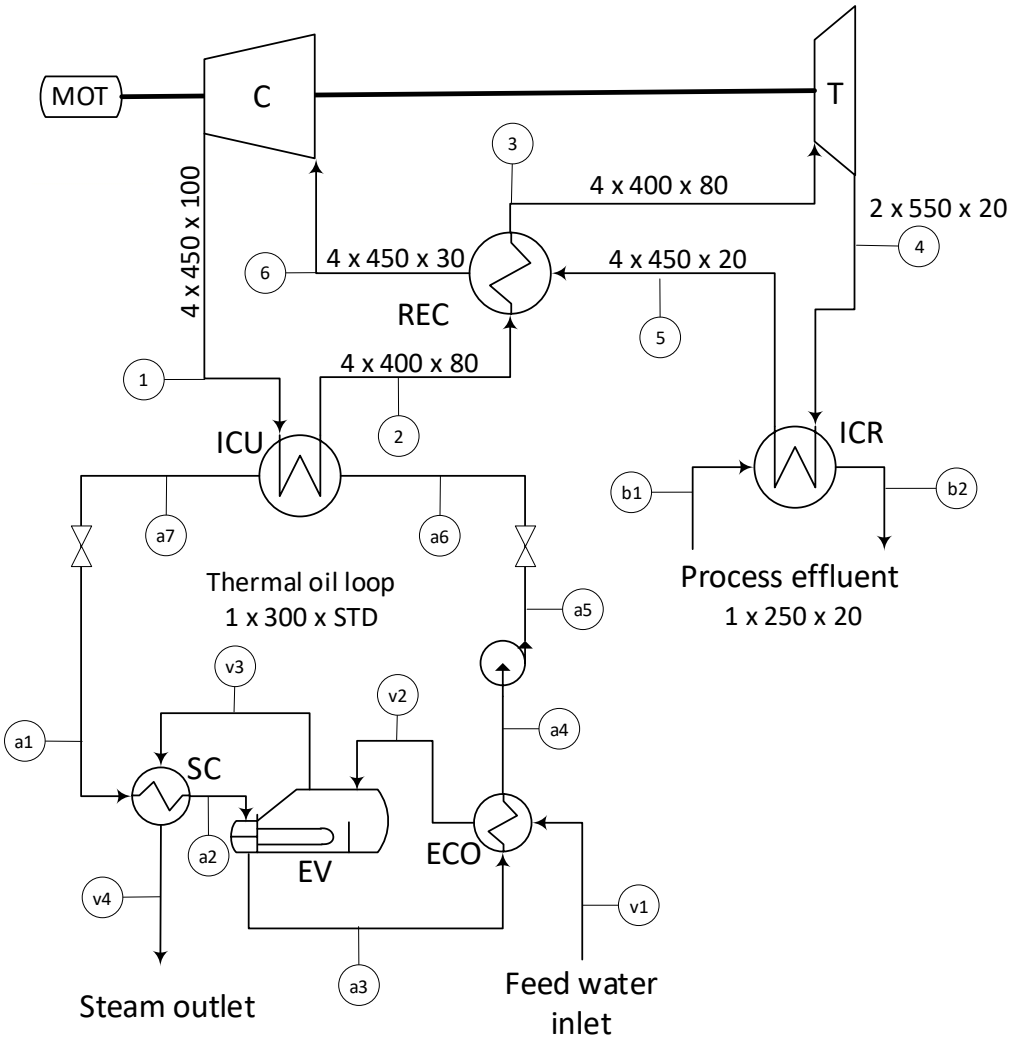


- Efluente de proceso: 70 °C → 25 °C
- Vapor: 10 °C (río) → 186 °C (10 bara); 96 t/h



- Consumo bomba de calor: 36 MWe
- Calor residual: 37 MWth
- Vapor: 73 MWth
- **COP = 2.03**

Aplicación 3: Producción de vapor (10 – 12 bara)



Dimensionado de la bomba de calor

Tabla 2: Inversión requerida por los intercambiadores

Inter.	UA [W/(m²K)]	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

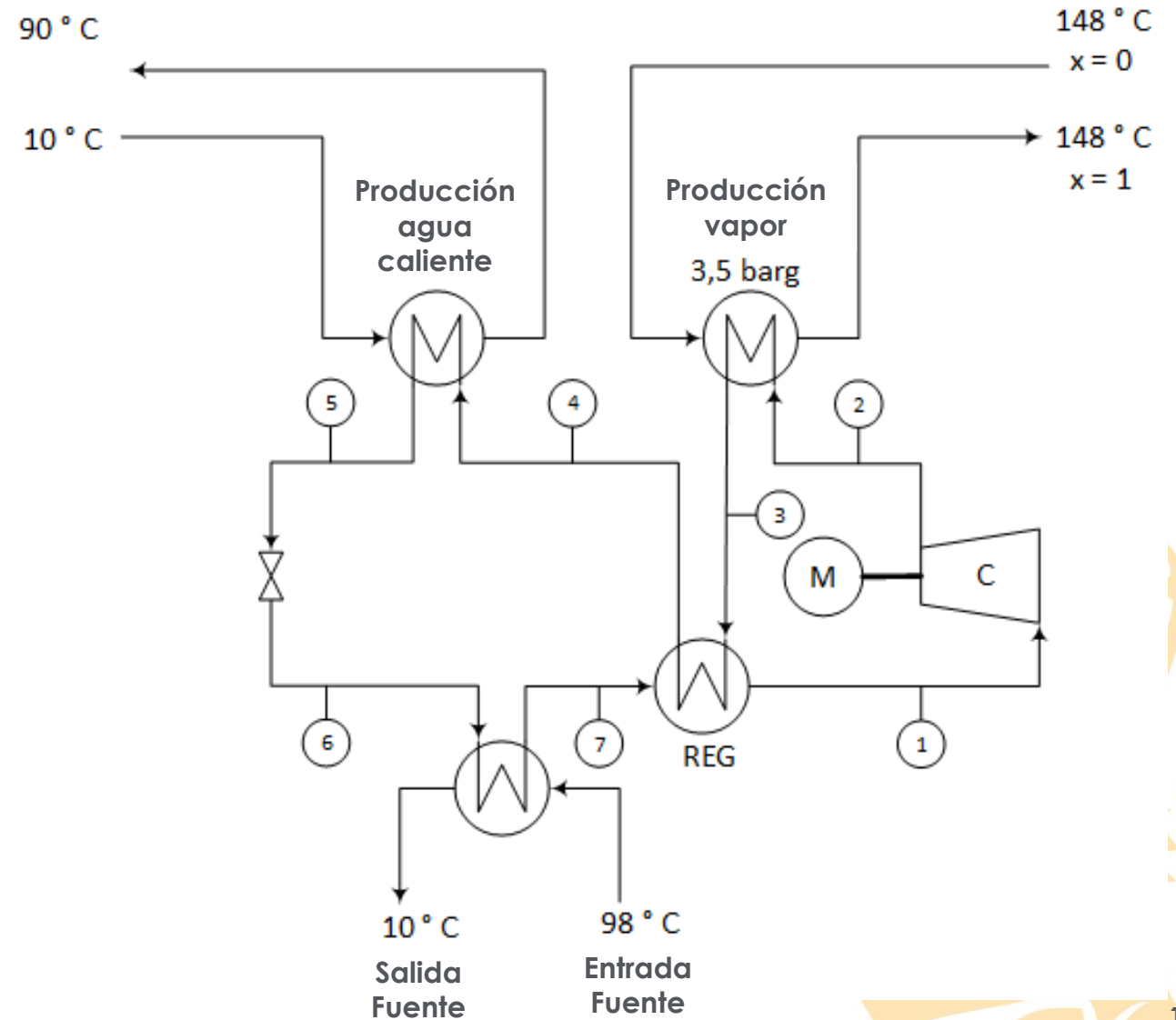
Tabla 3: Inversión requerida por equipos rotativos

	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

Inversión ≈ 600 €/kWt
LCOH ≈ 60 €/MWh

Aplicación 4: Enfriamiento y producción de vapor y agua caliente

- **COP = 5.3**
- Ahorro de gas (vapor) y electricidad (enfriadora):
300 k€/año



Ejemplos: FRIENDSHIP

- El [proyecto](#) busca la generación de calor y frío a partir de energía solar para la industria (Solar Heat Industrial Processes)
- Propone una bomba basada en Brayton inverso sin regenerar, con CO2 supercrítico
- Punto nominal:
 - CO2 en fuente: 160°C / 140°C; 145 bar
 - CO2 en demanda: 240°C / 160°C; 350 bar
 - Demanda cubierta: 12 MW

[\[Detalles técnicos\]](#)

H2020-LC-SC3-2019-NZE-RES-CC

GA number: 884213

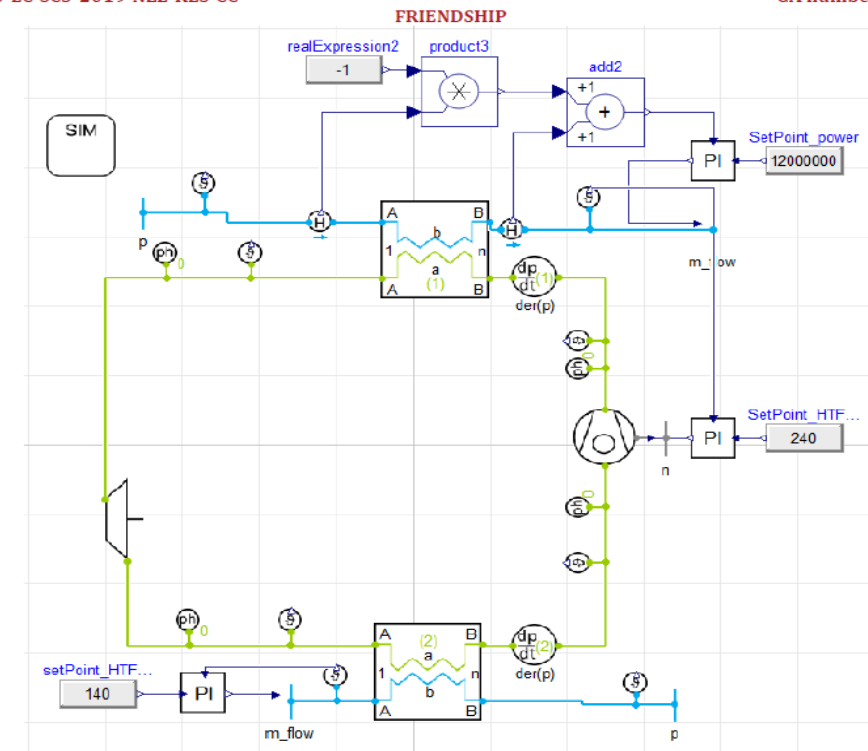
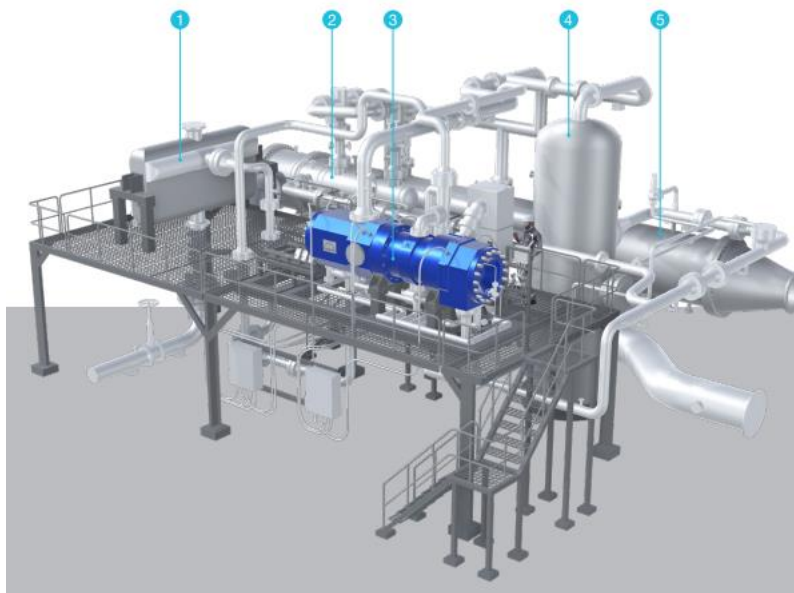


Figure 60: Heat pump system setup in Dymola 2021.

Estado de la cuestión: MAN



- 1 Heat Sink HEX
PCHE Type
- 2 Recuperator
S&T, Plate or PCHE Type
- 3 HOFIM® Compressor
and Expander
- 4 CO₂ Separator
- 5 Evaporator
S&T, Plate or PCHE Type



Dismantled HOFIM® Heat Pump core unit

[MAN TCC]

- Bomba de calor ciclo transcrito con CO₂
- Empleo de turbomáquinas en el mismo eje: M-T-C
- Temperatura de evaporación < 20°C

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 ₂)	kg (lbs)	9'000 (19'841)	13'750 (30'313)	20'000 (44'092)
Electrical supply voltage ¹	kV	min. 4.16	min. 6	Min. 6
Heating capacity	kW _{th} (MMBtu/h)	9'670 (33)	25'230 (86)	48'400 (165)
Cooling capacity	kW _{th} (tons)	6'270 (1783)	16'730 (4757)	32'500 (9241)
Motor inlet power ²	kW _{el}	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 ² (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		

¹ Higher voltages are possible ² Higher motor power is possible (case specific)

Conclusiones

- La tecnología convencional de bombas de calor no permite alcanzar temperaturas mayores de 150 °C
- La bomba de calor basada en ciclo Brayton inverso con CO₂ es un sistema prometedor comparada con otras opciones:
 - ✓ Evita problemas de descomposición a altas temperaturas del refrigerante
 - ✓ El CO₂ tiene ODP = 0 y GWP = 1
 - ✓ Al contar con turbomáquinas en vez de máquinas volumétricas, evita problemas de altas temperaturas en compresores alternativos habituales en ciclos convencionales.
 - ✓ Buen rango de temperaturas de trabajo:
 - Temperatura de salida del intercambiador de la fuente muy baja, lo que permite usar la salida para enfriar
 - Excelente adaptación a la máxima temperatura de trabajo del fluido

Conclusiones

- Importante el tener una fuente de calor residual de temperatura adecuada a la temperatura de la demanda que se desea cubrir
- Por resolver:
 - ✓ No hay todavía unidades comerciales con esta tecnología, aunque está presente en numerosos proyectos de I+D
 - ✓ Algunos fabricantes han desarrollado soluciones basadas en CO₂: Echogen, MAN
 - ✓ Problemas detectados con la escala:
 - Equipos pequeños (< 2 MWt) requieren turbomáquinas de muy alta velocidad
 - Equipos grandes (> 30 MWt) requieren grandes inversiones
 - Rango adecuado: 10-20 MWt

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

earenas@comillas.edu

