

IMPLEMENTACIÓN DE BOMBAS DE CALOR EN LAS PLANTAS CERVECERAS

Eva Arenas

Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

30/09/2025

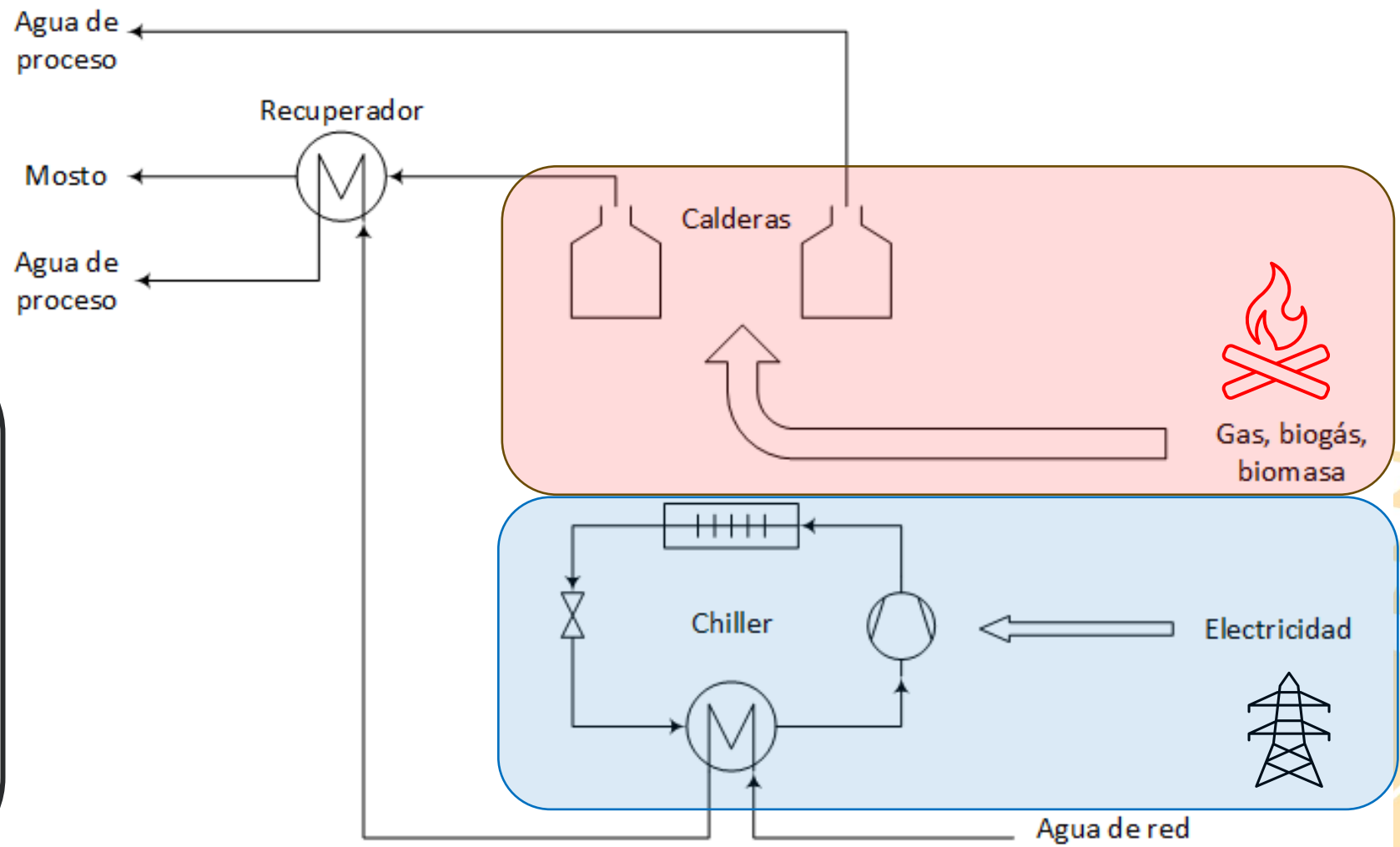


Procesos térmicos en la fabricación de cerveza

Configuración habitual

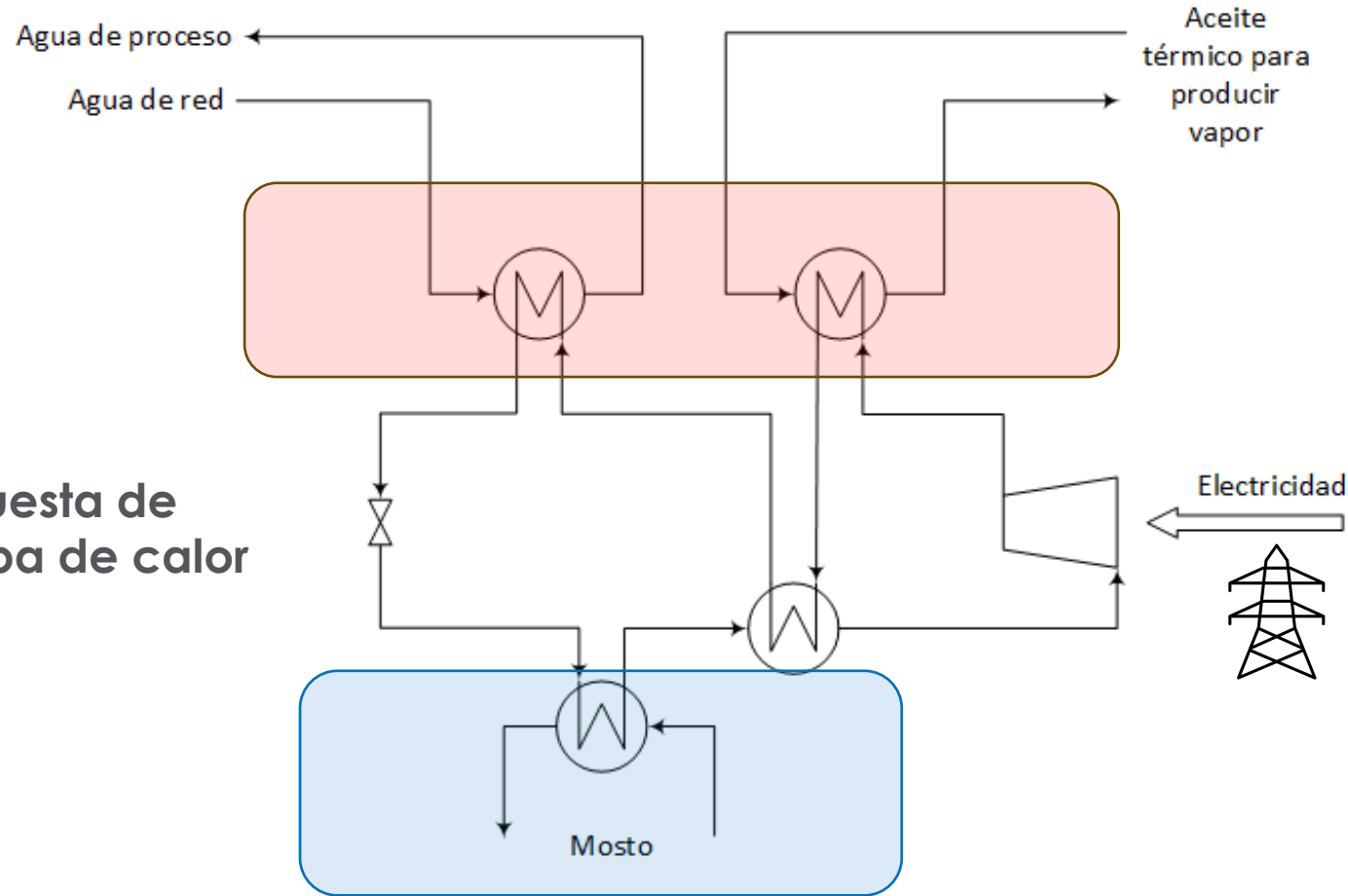
Dos demandas térmicas

-  Calor para calentar el agua de proceso y el mosto
-  Agua fría para enfriar el mosto



Integración de una bomba de calor

Propuesta de
bomba de calor



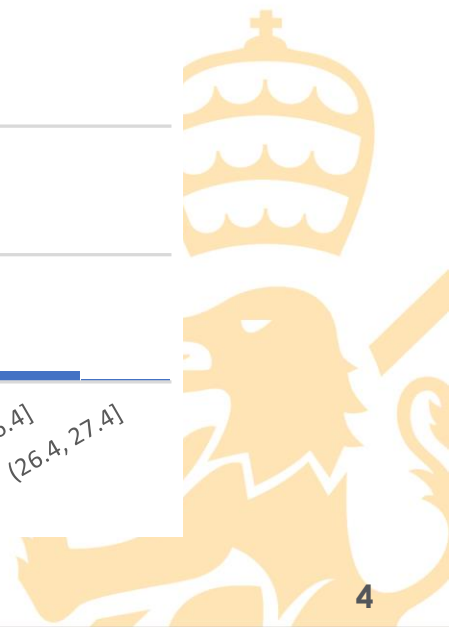
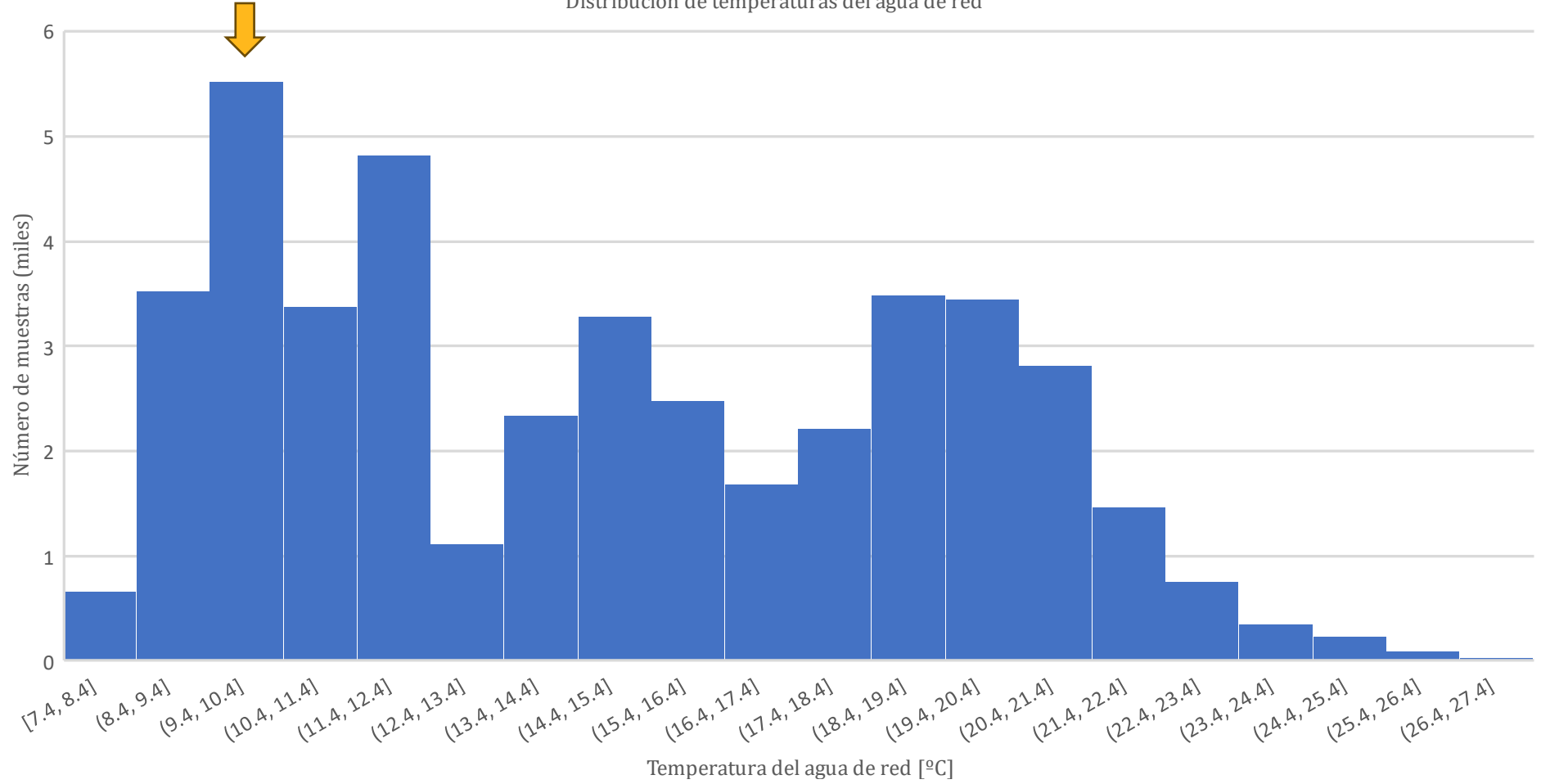
Solución tecnológica elegida:

- Bomba de calor de **ciclo de Rankine inverso regenerativo** con **CO₂ (R744)** en configuración **transcrítica**.
- **CO₂ (R744)**: fluido natural, GWP=1 y ODP=0.

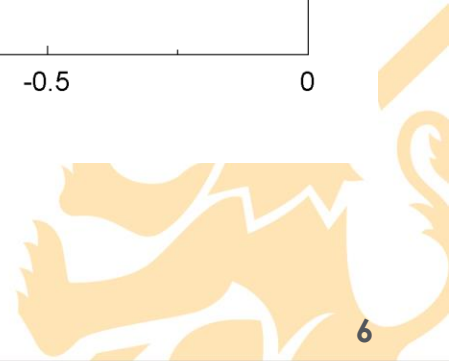
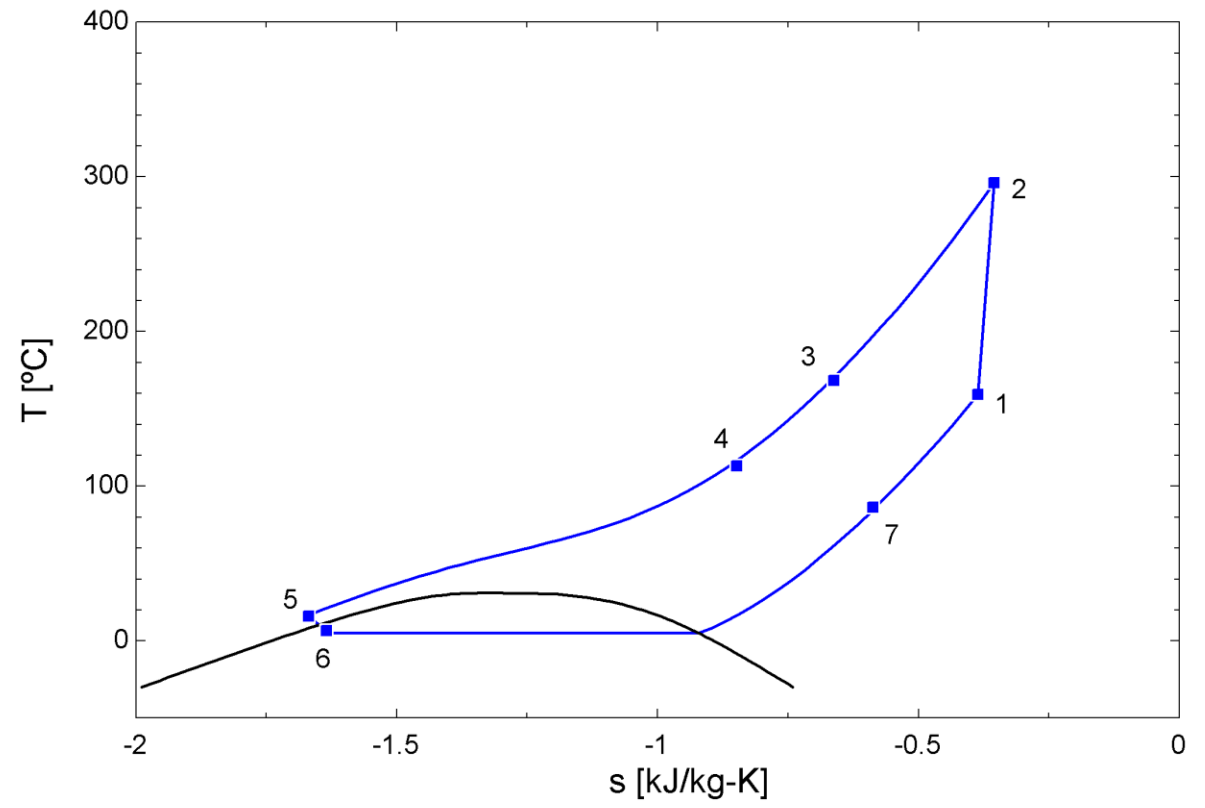
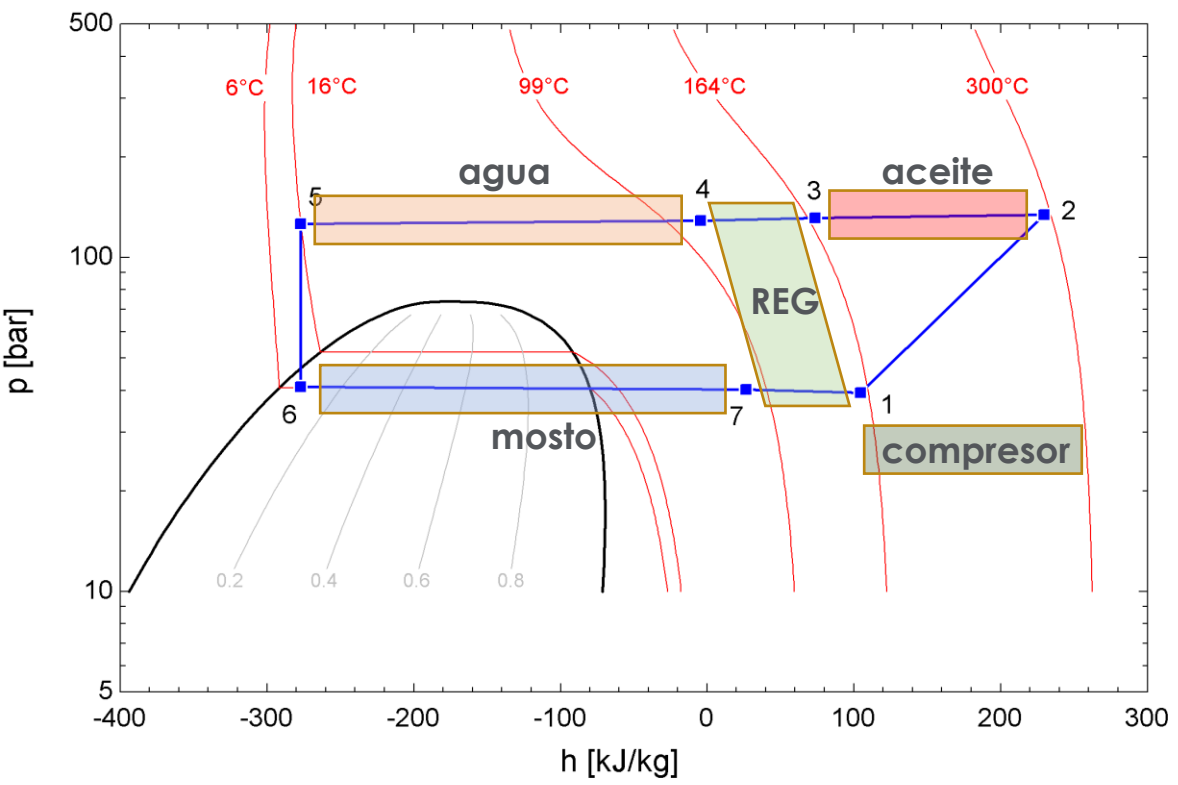
Temperatura de agua de red

10 °C: punto nominal

Distribución de temperaturas del agua de red

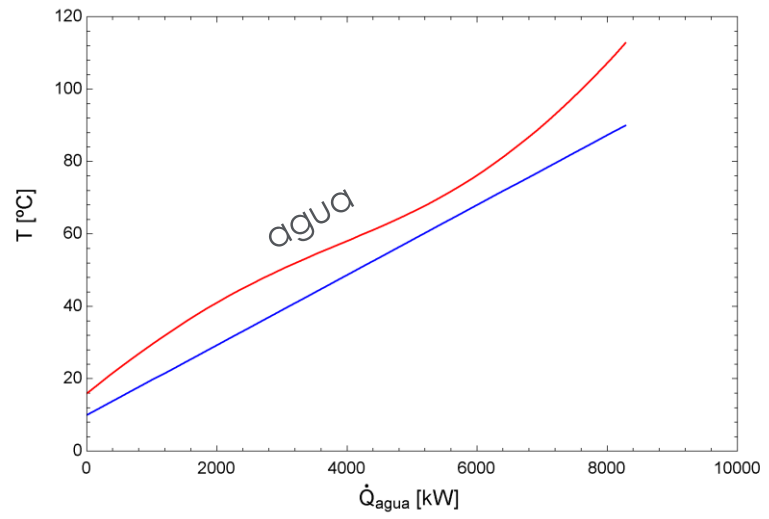
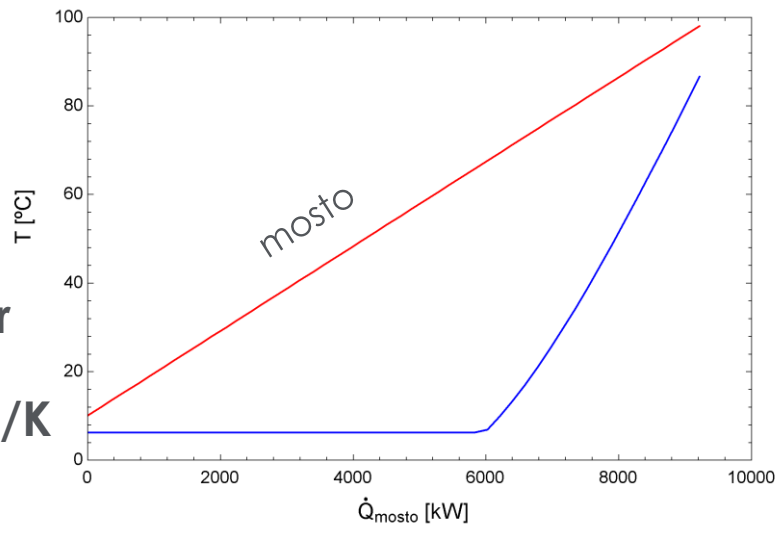


Operación de la BC en el punto nominal: diagramas



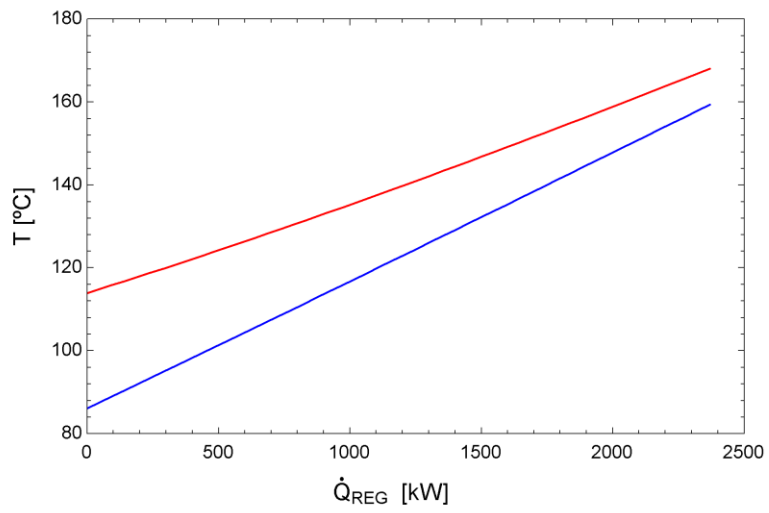
Operación de la BC en el punto nominal: HX

Evaporador
UA = 384 kW/K

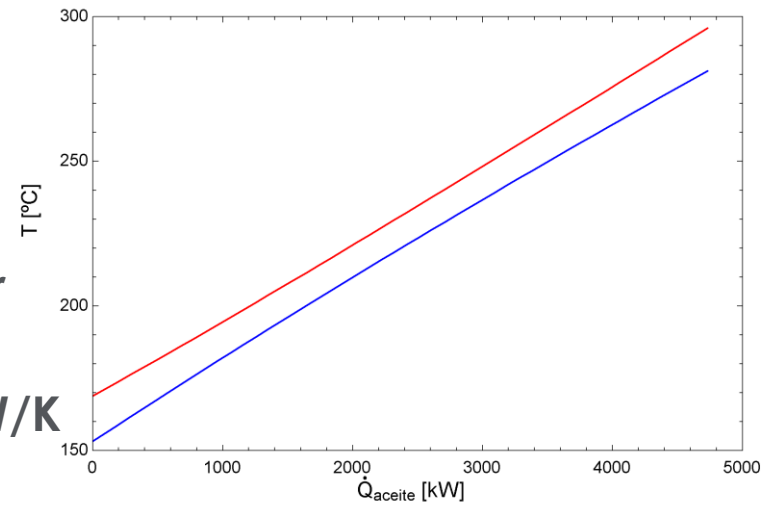


Calentador de
agua
UA = 843 kW/K

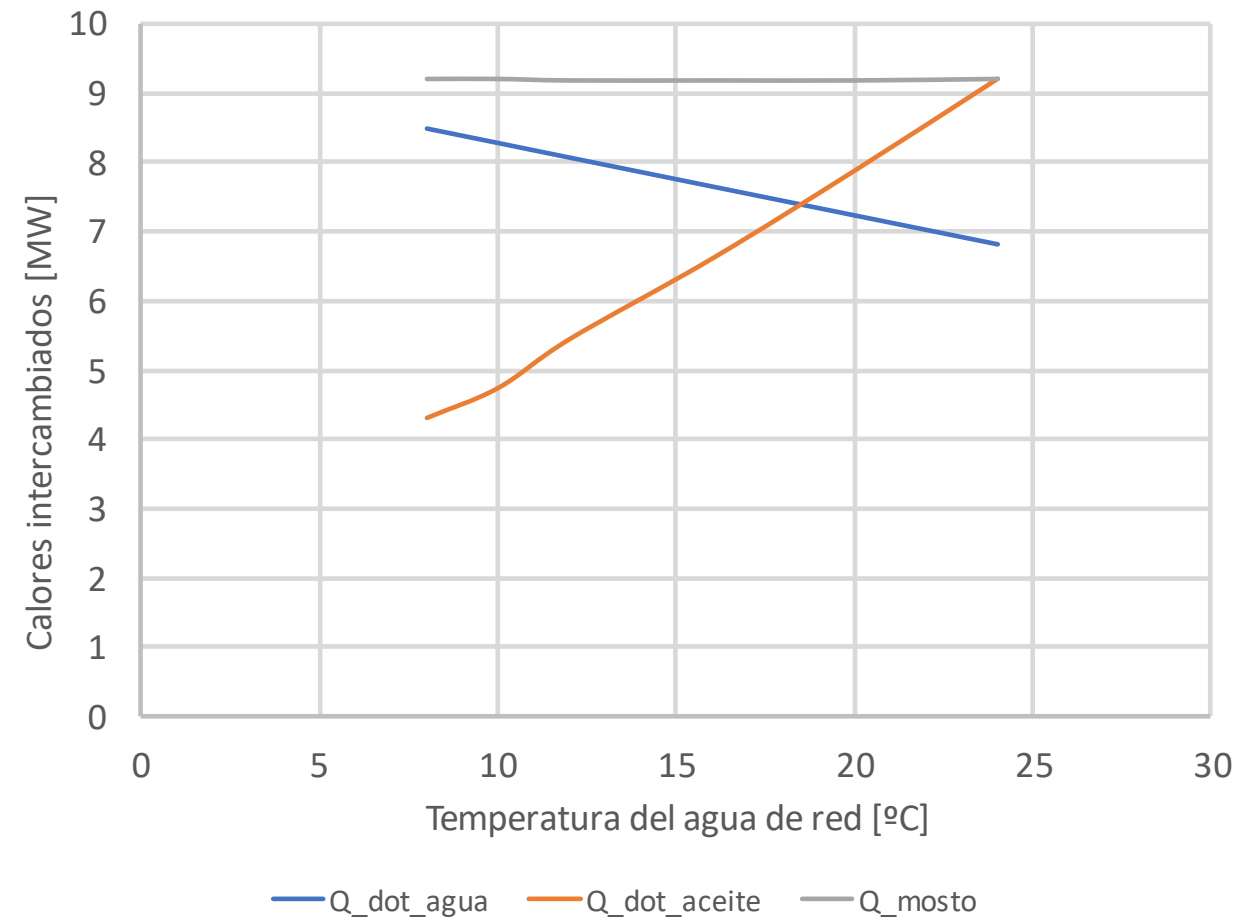
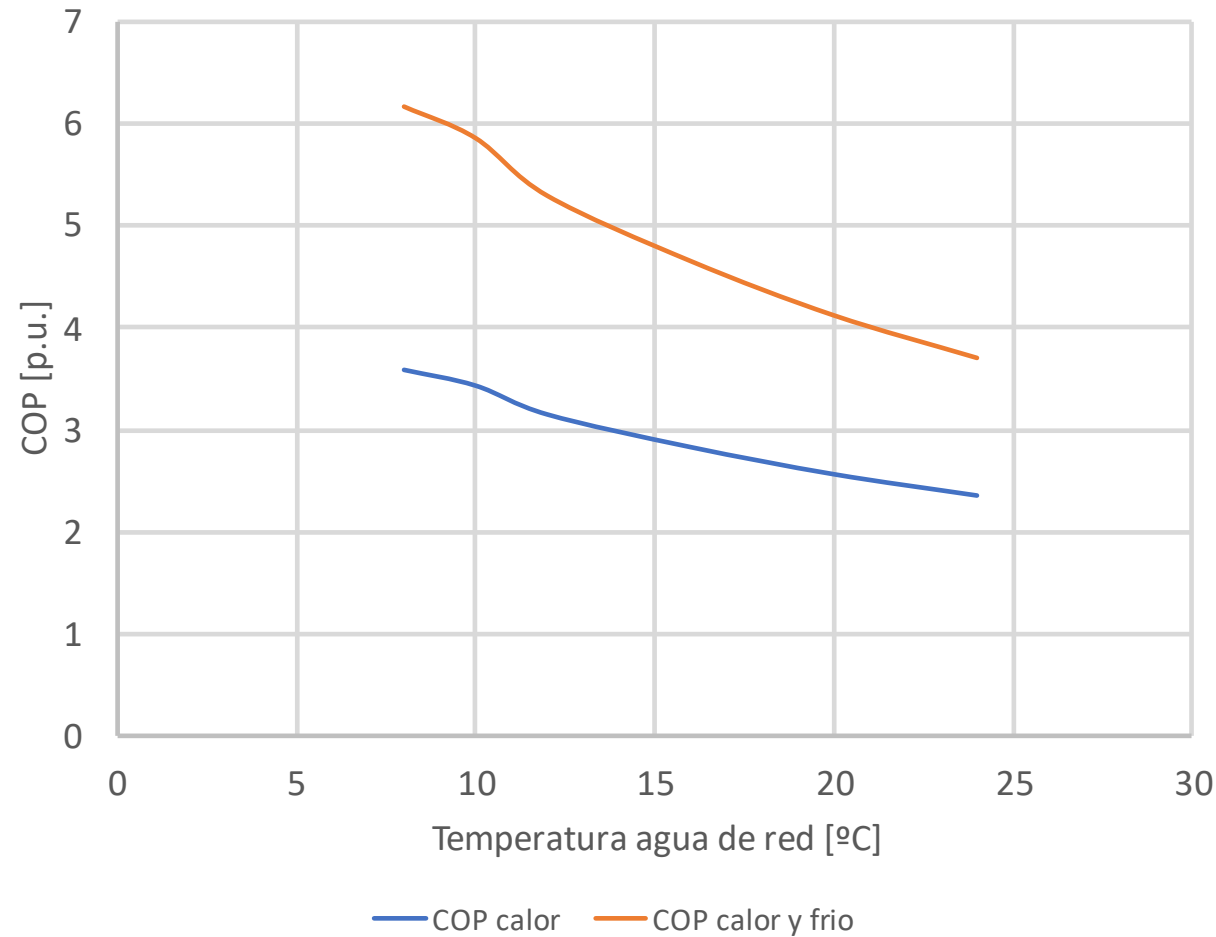
Recuperador
UA = 153 kW/K



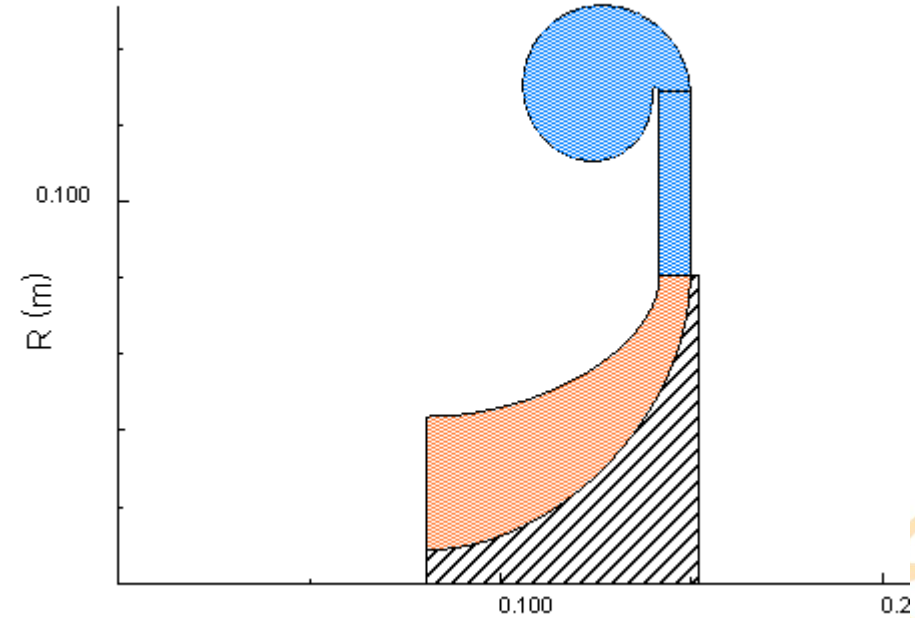
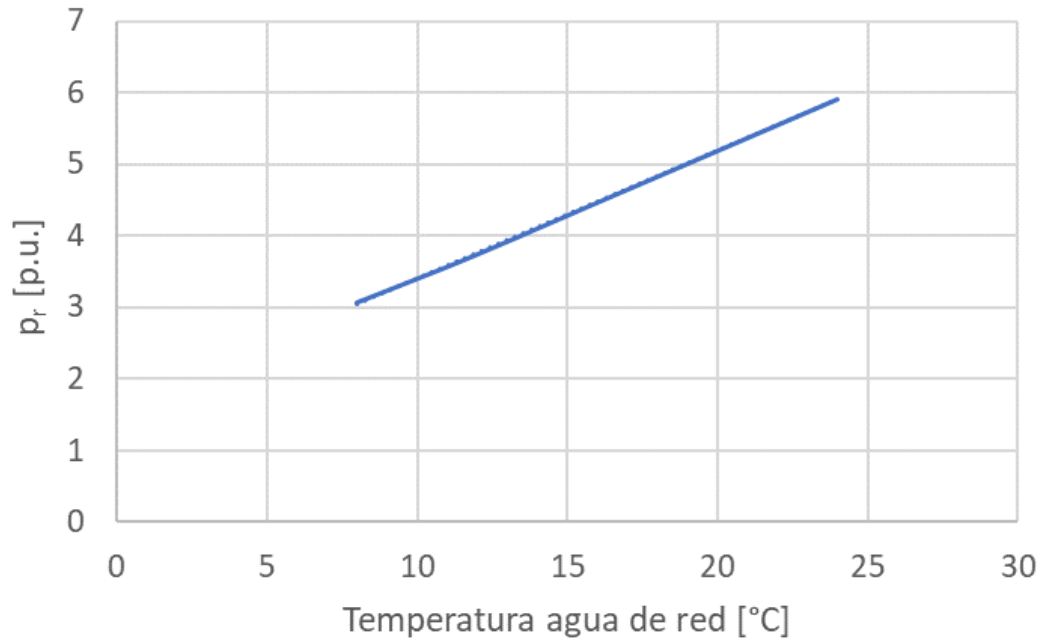
Calentador
de aceite
UA = 382 kW/K



Operación fuera del punto nominal

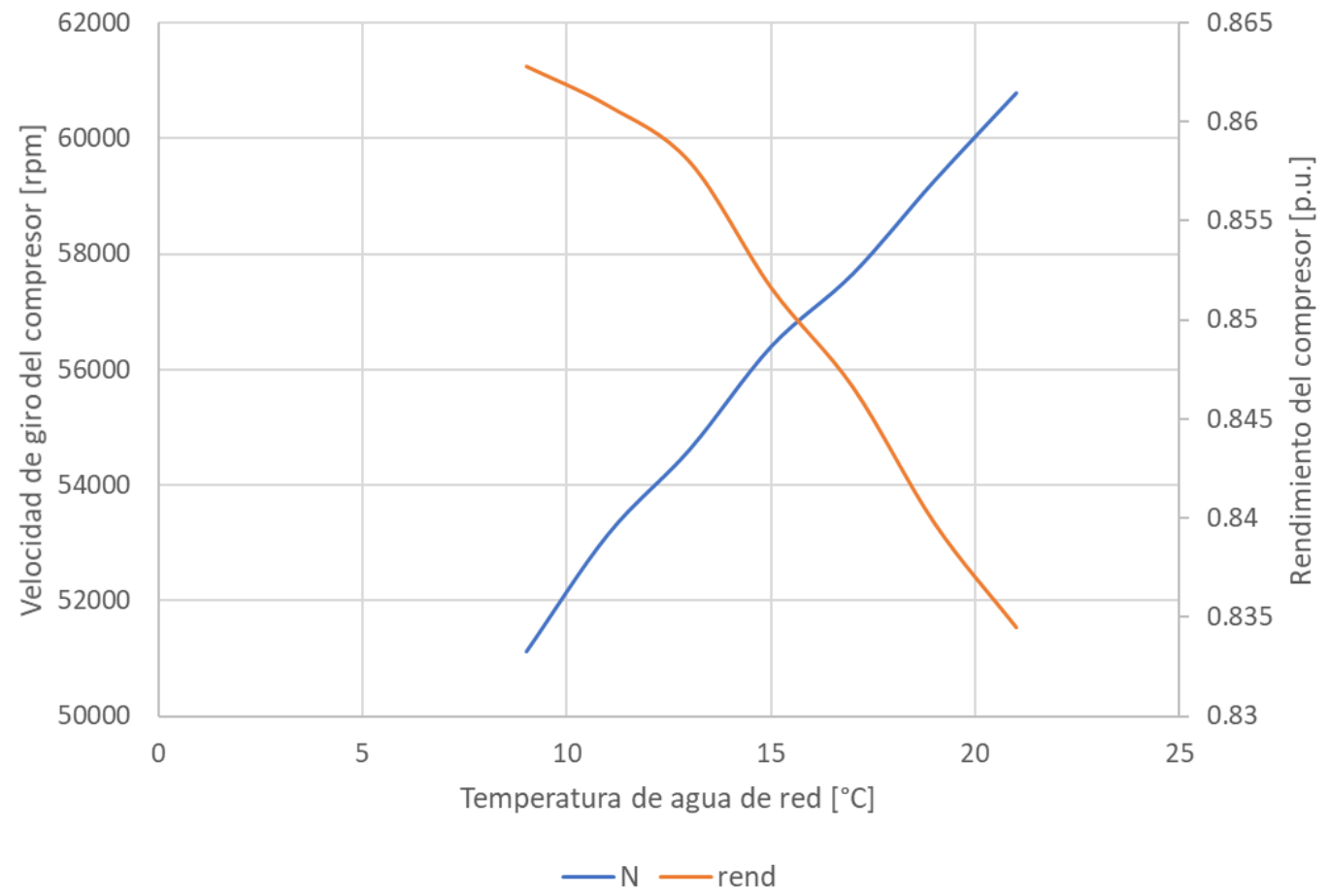
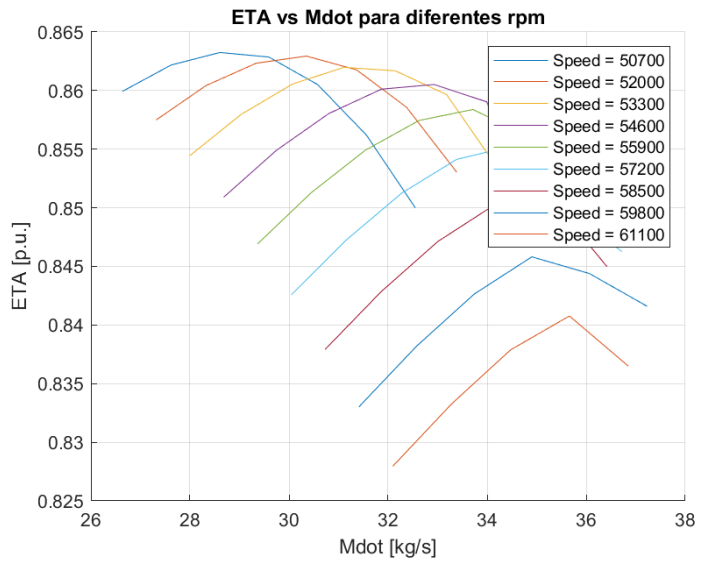
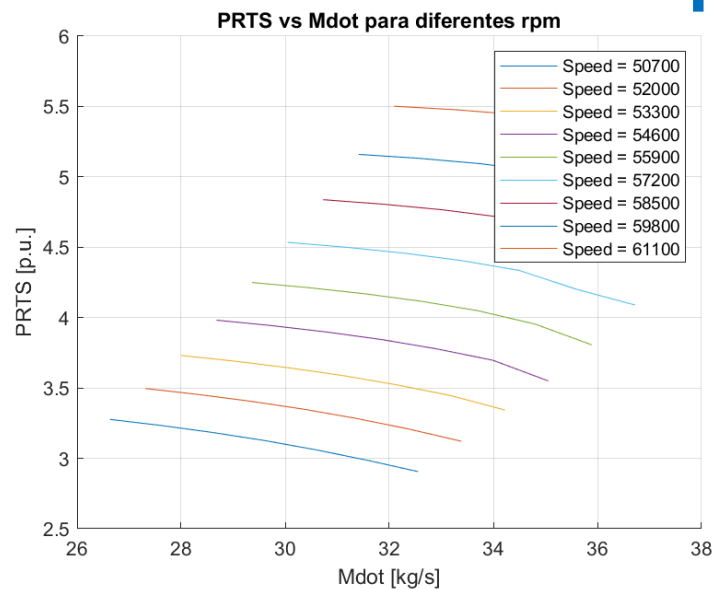


Operación fuera del punto nominal: compresor



- La variación de temperatura del agua de red provoca cambios relevantes en las condiciones de trabajo del compresor.
- El compresor se ha diseñado para las condiciones referentes a la temperatura del agua más frecuente (10°C).

Operación fuera del punto nominal: compresor

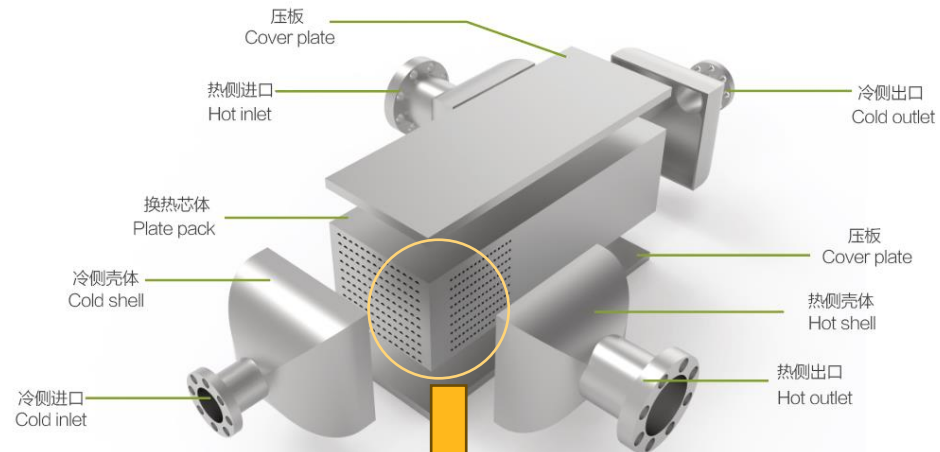
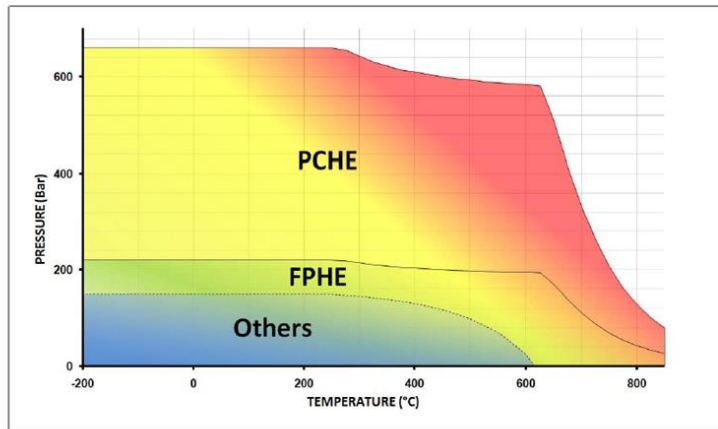


- Para no perder rendimiento trabajando en el resto de condiciones, se ha obtenido el **mapa del compresor** y se propone modificar la **velocidad de giro** para que el punto de trabajo tenga el mejor rendimiento posible

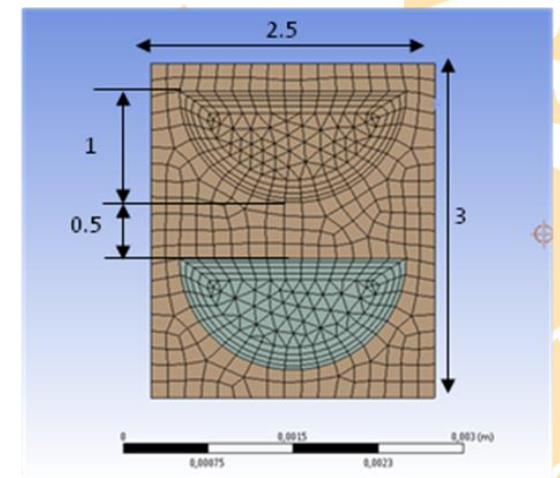
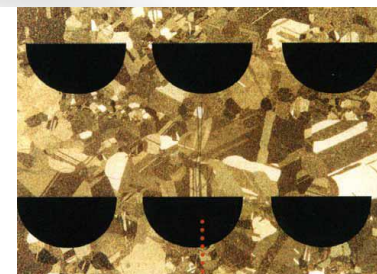
Intercambiadores de calor PCHE

- En el lado de alta presión puede haber diferencias de presiones importantes entre el CO₂ y los fluidos externos
- Surgen como solución los intercambiadores de calor de circuito impreso (HEATRIC, ALFA-LAVAL)
- Similares a intercambiadores de placas, pero soldados por difusión

PCHE – Temperature and pressure



[Shanghai Heat Transfer]



Análisis económico

MES	T agua red [°C]	ACTUALIDAD					BOMBA DE CALOR			
		Consumo gas [MWh-PCS]	Coste gas [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	OPEX total [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	Mantenimiento [€]	Ahorro [€]
Enero	10	3,214	174,891	400	30,037	204,929	2,100	157,465	24,368	23,095
Febrero	9	3,008	163,657	344	25,832	189,488	1,988	149,115	24,368	16,006
Marzo	10	3,214	174,891	400	30,037	204,929	2,100	157,465	24,368	23,095
Abril	12.5	3,730	202,978	541	40,551	243,529	2,378	178,342	24,368	40,819
Mayo	15	4,246	231,064	681	51,064	282,129	2,656	199,218	24,368	58,543
Junio	17	4,659	253,534	793	59,475	313,009	2,879	215,919	24,368	72,722
Julio	20	5,279	287,238	961	72,091	359,329	3,213	240,971	24,368	93,990
Agosto	21	5,485	298,472	1017	76,297	374,769	3,324	249,322	24,368	101,079
Septiembre	20	5,279	287,238	961	72,091	359,329	3,213	240,971	24,368	93,990
Octubre	16.5	4,556	247,916	765	57,372	305,289	2,823	211,744	24,368	69,177
Noviembre	13	3,833	208,595	569	42,653	251,249	2,434	182,517	24,368	44,364
Diciembre	11.5	3,524	191,743	485	36,345	228,089	2,267	169,991	24,368	33,729
AÑO		50,028	2,722,218	7,918	593,847	3,316,065	31,374	2,353,041	292,416	670,608

Gas: 40 €/MWh-PCS
CO₂: 14.4 €/MWh-PCS
Electricidad: 75 €/Mwhe
wacc = 7,5%

- Calor al aceite: 40.6 GWh/año
- Calor al agua: 50.7 GWh/año
- Calor del mosto: 59.9 GWh/año
- Consumo compresor: 31.4 GWh/año

$$SCOP_{calor} = 2.91$$

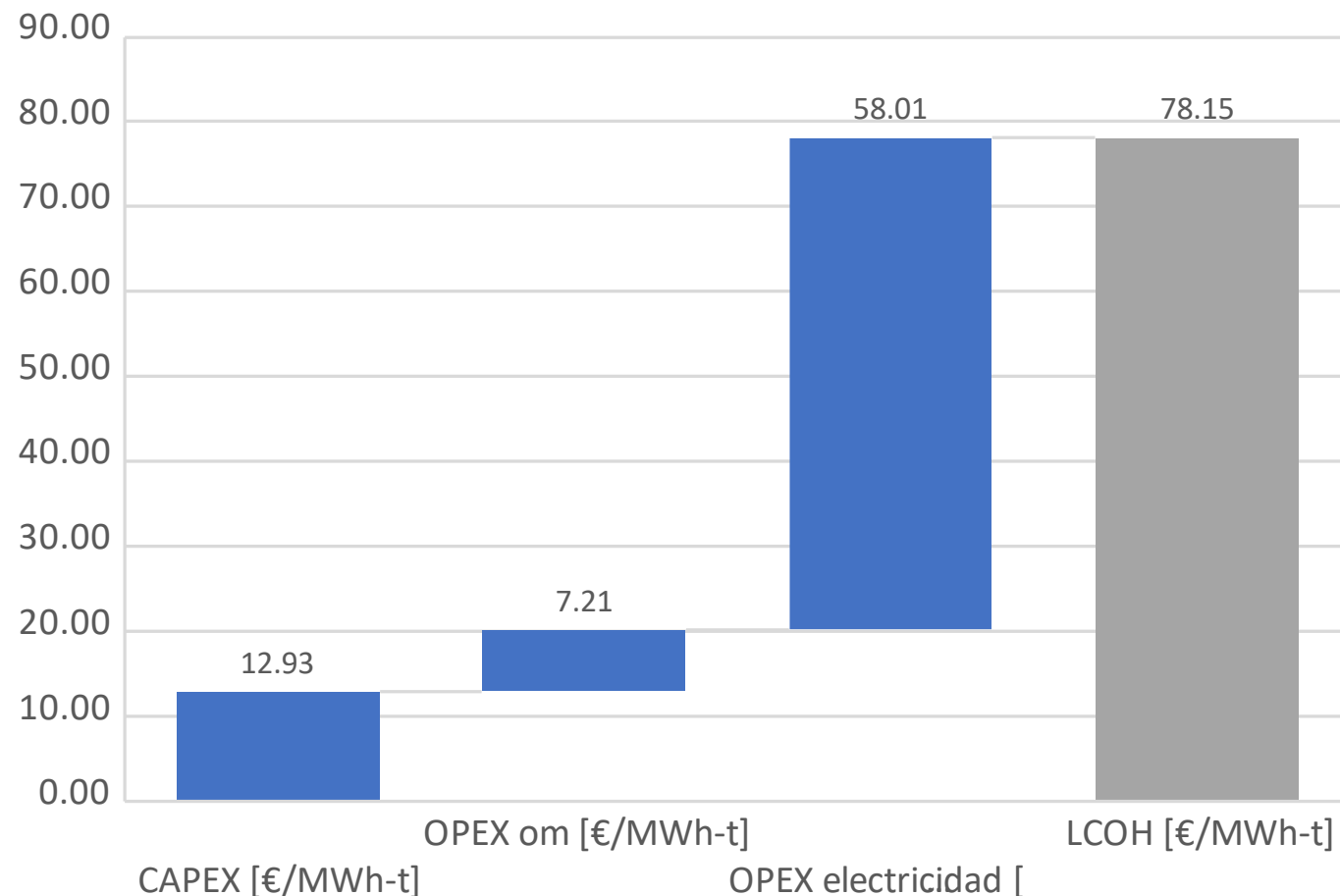
$$SCOP_{calor+frío} = 4.82$$

Análisis económico

INVERSIÓN [€]	5,848,314
Intercambiador Agua [€]	11,218
intercambiador Mosto [€]	6,196
Intercambiador Aceite [€]	6,174
Intercambaidor Regenerador [€]	3,102
Compresor [€]	3,572,272
instrumentos [€]	2,249,352
MANTENIMIENTO [€/año]	292,416

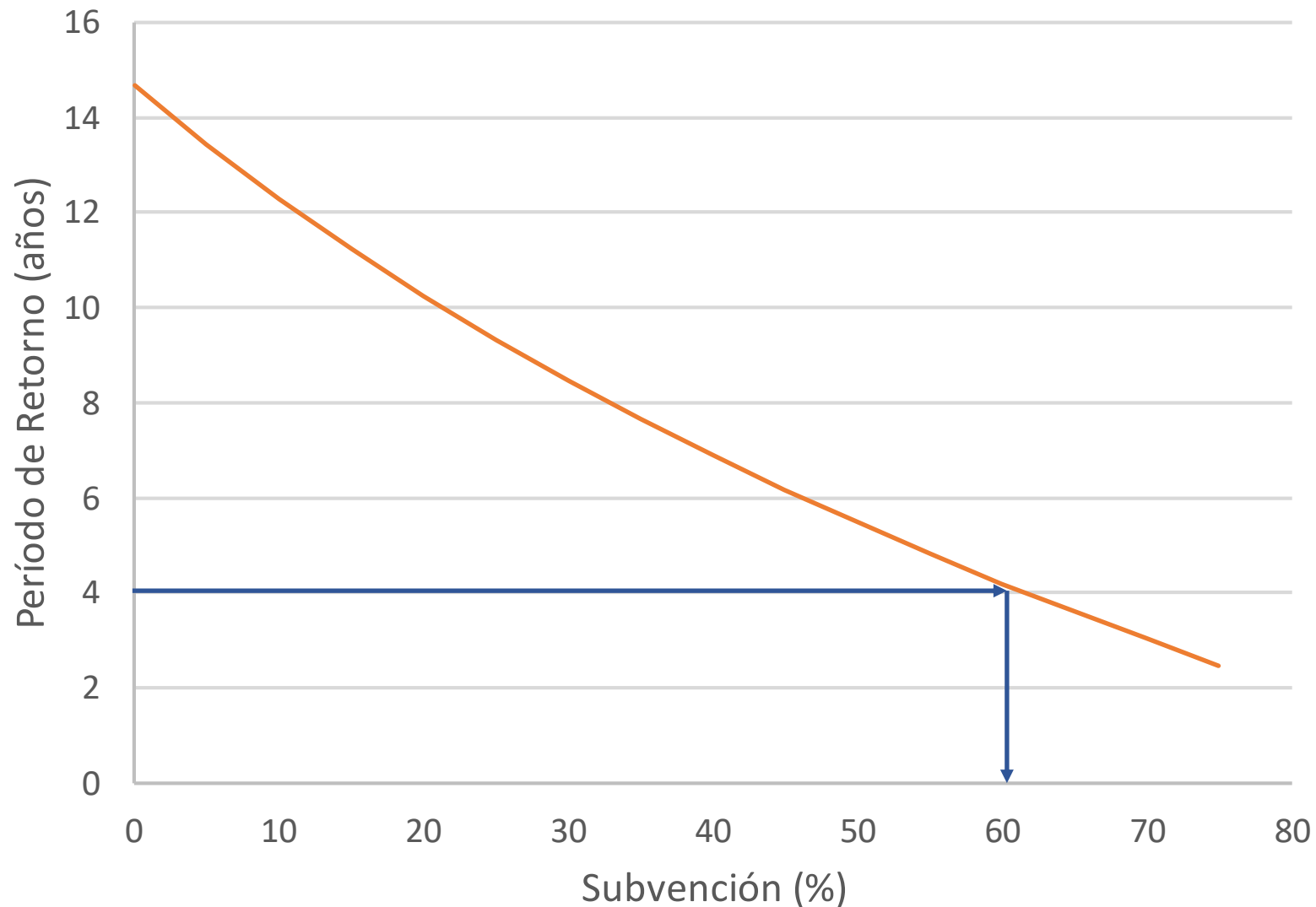
Mantenimiento: 5% de la inversión

CAPEX [€/MWh-t]	12.93	
OPEX om [€/MWh-t]	7.21	65.22
OPEX electricidad [€/MWh-t]	58.01	
LCOH [€/MWh-t]	78.15	
OPEX actual [€/MWh-t]	81.75	



Análisis económico

- El OPEX se reduce mucho:
82 → 65 €/MWh-t
- En términos relativos al calor supone: 450 €/kW-t calor, dentro de los márgenes de fabricantes.
- La inversión resulta elevada: **5.85 M€ (retorno de 14.7 años)**
- La inversión se podría reducir con alguna subvención (PERTE...)



Análisis económico + optimista

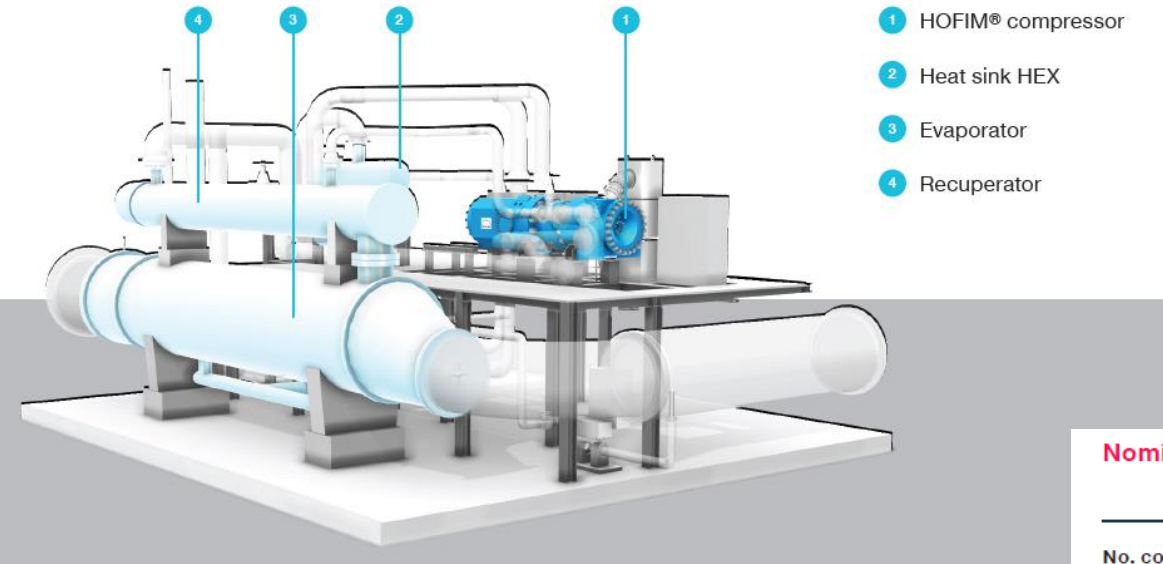
	Hipótesis iniciales	Hipótesis optimistas 1	Hipótesis optimistas 2
wacc	7.5%	5%	5%
Demanda térmica	13.5 MW	27 MW	27 MW
Factor mantenimiento	5%	3%	3%
Actualización tasa del CO ₂	3.5%	3.5%	0%

Análisis económico + optimista

	Resultados escenario inicial	Resultados escenario optimista 1	Resultados escenario optimista 2
Inversión [M€]	5.8	7.7	7.7
Inversión específica [€/kW-t]	450	297	297
Mantenimiento [k€/año]	292	232	232
LCOH [€/MWh-t]	78.15	67.63	67.63
Retorno (años)	14.7	4.82	5.3

Productos comerciales similares (MAN)

[MAN heat pumps for the food & beverage industry]



- 1 HOFIM® compressor
- 2 Heat sink HEX
- 3 Evaporator
- 4 Recuperator

- MAN tiene una línea de HP transcriticals con CO₂, similares a la requerida
- La diseñada encajaría entre la HPU28 y la HPU33
- Ellos disponen de un solo intercambiador para el sink (HEX) en lugar de uno para vapor y otro para agua de cocción

comillas.edu

Nominal Conditions

	Unit	MAN HPU28	MAN HPU33	MAN HPU43
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	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 input power	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	-		Programmable logic controller (PLC)	
Communication protocol	-		MODBUS/PROFINET/Ethernet	

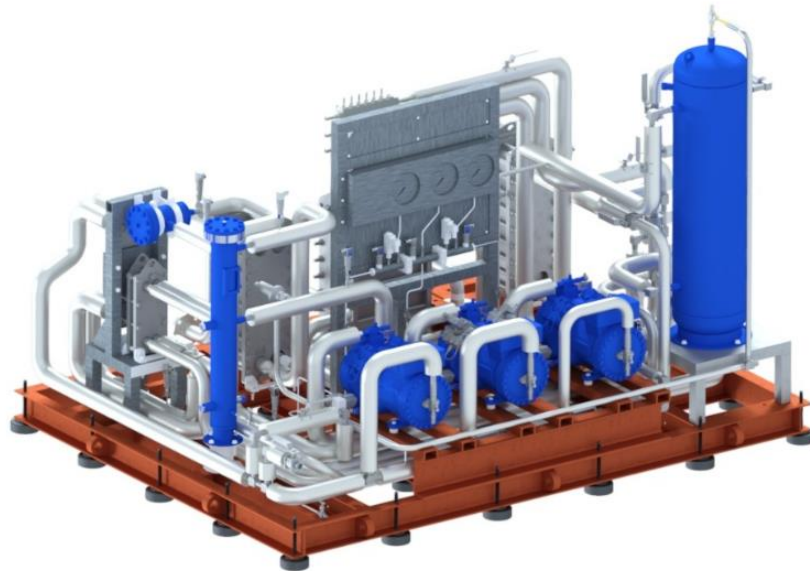
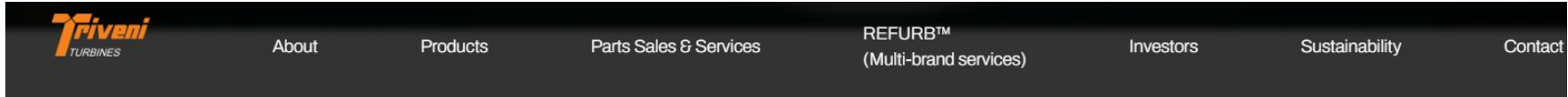
Nominal reference conditions: Heat sink supply/return temp.: 110 °C/40 °C (230 °F/104°F); Heat source temp.: 10 °C (50 °F)

Productos comerciales similares (MAN)

Table 2-2: Overview of suppliers and HTHP technology, sorted after maximum capacity.

Supplier	Compressor type	Working fluid	Capacity [MW]	$T_{\max, \text{supply}}$ [°C]	TRL indication	Spec. invest. cost [€/kW]
MAN Energy Solutions	Centrifugal turbo-comp. with expander	R-744	10.0-50.0	150	7-8	300-500

[\[Annex 58 de la IEA\]](#)



Transcritical CO₂ Heat Pumps & Chiller

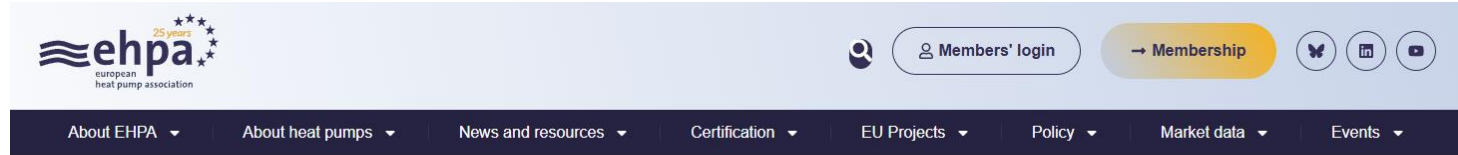
At Triveni Turbines, we combine decades of expertise in heat & power, with a vision of sustainable future for industrial heating – which accounts of ~20% of global **Greenhouse gases** emissions. **Carbon dioxide(CO₂) Heat Pumps & Chillers** solution developed by Triveni Turbines aims to help industries achieve their sustainability journey.

- **Custom Built**– With a starting thermal capacity of **100kW**, our solutions are designed to match your specific **pressure, temperature, and flow** requirements.
- **Smart Innovation**– Developed through **industry-academia collaboration**, ensuring seamless **heating & cooling integration** for industries and system integrators.

Future-proof your industry with **energy-efficient, low-carbon solutions** from Triveni Turbines.

[\[TRIVENI turbines\]](#)

Proyectos comerciales similares (fábrica de cerveza en Sussex)



Heat pump stories

Beer brewed with pump power



Hepworth Brewery's new type of heat pump provided by Futraheat. Photo: Futraheat Contact: Neil Davidson - neil@neildavidson.org PR Handout - Free to use

Fancy a cold one?

The heat pump technology in your fridge already keeps your beverages cool. And now, a UK brewery is pioneering a steam-generating high temperature heat pump to make its beer.

Hepworth Brewery in West Sussex will try out a heat pump on one of its four production lines, cutting its emissions by up to 90% and costs by up to 40%. The heat pump can generate steam at temperatures of up to 130°C for the brewing process, and is the first such heat pump to be installed in the UK. In future, it could be used for the entire brewing process.

[[Bomba de calor en Sussex](#)]

Conclusiones

- **Viabilidad técnica** de reutilizar el **calor residual del mosto mediante una BC de AT**
- Se reduce el consumo de combustibles fósiles, mejora la eficiencia global del sistema y facilitar la electrificación del suministro térmico.
- **COP máximo de 6.2.** Incluso en las condiciones más exigentes del caso base, se mantuvo un **COP superior a 3.5.**
- Se mejora el **OPEX (65 €/MWh-t)**, frente a los **82 de la instalación convencional**
- Sin embargo, la inversión es alta, lo que supone una tasa de retorno de **14.7 años.**
- Hacer una instalación con el doble de capacidad aprovechando la economía de escala, hace disminuir el retorno a **unos 5 años.**
- El LCOH obtenido se sitúa entre **68 y 78 €/MWh.**

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

earenas@comillas.edu



Datos de partida de la bomba de calor

Tabla 3-1: Descripción de los parámetros de contorno

Parámetro	Valor	Unidad
P de salida del compresor (p_2)	134	bar
Temperatura de entrada ICM (T_6)	6.3	°C
Rendimiento del Compresor (η_c)	0.8	p.u.
T entrada agua de red ($T_{agua,1}$)	10	°C
T salida agua de proceso ($T_{agua,2}$)	90	°C
T entrada mosto ($T_{mosto,1}$)	98	°C
T salida mosto ($T_{mosto,2}$)	10	°C
\dot{V}_{mosto}	90	m^3/h
\dot{V}_{agua}	89	m^3/h
ΔT_{agua}	5.9	°C
ΔT_{aceite}	14.8	°C
ΔT_{reg}	9	°C
ΔT_{mosto}	3.7	°C
Título a la salida de la válvula (x_6)	0	-

ANÁLISIS ECONÓMICO OPTIMISTA I

MES	T agua red [°C]	ACTUALIDAD					BOMBA DE CALOR			
		Consumo gas [MWh-PCS]	Coste gas [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	OPEX total [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	Mantenimiento [€]	Ahorro [€]
Enero	10	6,428	394,178	801	60,074	454,252	4,199	314,931	19,321	120,000
Febrero	9	6,015	368,857	689	51,664	420,520	3,976	298,230	19,321	102,969
Marzo	10	6,428	394,178	801	60,074	454,252	4,199	314,931	19,321	120,000
Abril	12.5	7,460	457,480	1081	81,101	538,582	4,756	356,684	19,321	162,577
Mayo	15	8,493	520,783	1362	102,129	622,912	5,312	398,436	19,321	205,154
Junio	17	9,319	571,425	1586	118,950	690,376	5,758	431,839	19,321	239,215
Julio	20	10,557	647,389	1922	144,183	791,572	6,426	481,942	19,321	290,308
Agosto	21	10,970	672,710	2035	152,594	825,303	6,649	498,643	19,321	307,339
Septiembre	20	10,557	647,389	1922	144,183	791,572	6,426	481,942	19,321	290,308
Octubre	16.5	9,112	558,765	1530	114,745	673,510	5,647	423,488	19,321	230,700
Noviembre	13	7,667	470,141	1137	85,307	555,448	4,867	365,034	19,321	171,092
Diciembre	11.5	7,048	432,159	969	72,691	504,850	4,533	339,982	19,321	145,546
AÑO		100,055	6,135,454	15,836	1,187,694	7,323,148	62,748	4,706,082	231,858	2,385,208

Gas: 40 €/MWh-PCS

CO₂: 14.4 €/MWh-PCS (3.5%)

Electricidad: 75 €/Mwhe

wacc = 5%

- Calor al aceite: 81.1 GWh/año
- Calor al agua: 101.4 GWh/año
- Calor del mosto: 119.8 GWh/año
- Consumo compresor: 62.7 GWh/año

$$SCOP_{calor} = 2.91$$

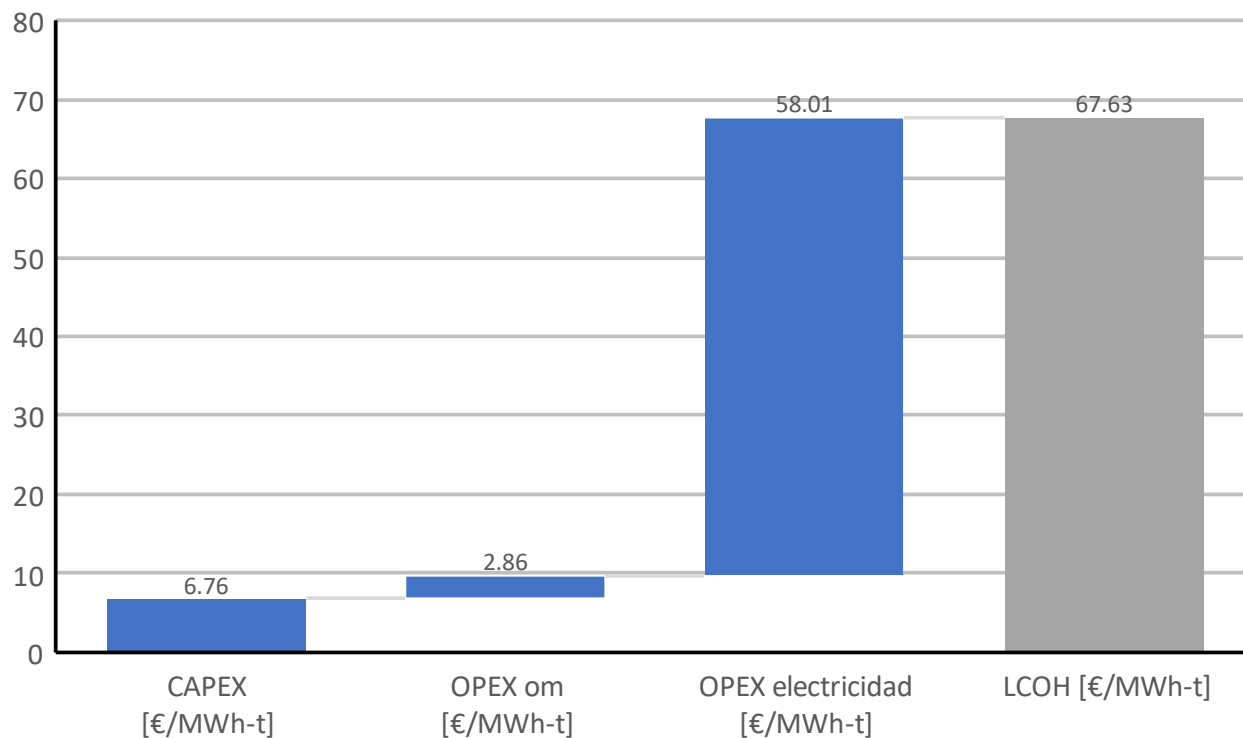
$$SCOP_{calor+frío} = 4.82$$

ANÁLISIS ECONÓMICO **OPTIMISTA I**

INVERSIÓN [€]	7,728,586
Intercambiador Agua [€]	18,924
intercambiador Mosto [€]	10,453
Intercambiador Aceite [€]	10,416
Intercambaidor Regenerador [€]	5,233
Compresor [€]	4,711,028
Instalación, tuberías e instrumentos [€]	2,972,533
MANTENIMIENTO [€/año]	231,858

Mantenimiento: 3% de la inversión

CAPEX [€/MWh-t]	6.76	
OPEX om [€/MWh-t]	2.86	60.87
OPEX electricidad [€/MWh-t]	58.01	
LCOH [€/MWh-t]	67.63	
OPEX actual [€/MWht]	90.27	



RETORNO: 4.82 años

INVERSIÓN ESPECÍFICA: 297 €/kW-t calor

ANÁLISIS ECONÓMICO OPTIMISTA II

- Las hipótesis empleadas han resultado muy conservadoras
- Nuevas hipótesis más optimistas:
 - $wacc = 5\%$
 - capacidad de la instalación: x2
 - Factor de mantenimiento: 3%
 - Actualización de la tasa del CO₂: **0%**

ANÁLISIS ECONÓMICO OPTIMISTA II

MES	T agua red [°C]	ACTUALIDAD					BOMBA DE CALOR			
		Consumo gas [MWh-PCS]	Coste gas [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	OPEX total [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	Mantenimiento [€]	Ahorro [€]
Enero	10	6,428	349,783	801	60,074	409,857	4,199	314,931	19,321	75,605
Febrero	9	6,015	327,313	689	51,664	378,977	3,976	298,230	19,321	61,426
Marzo	10	6,428	349,783	801	60,074	409,857	4,199	314,931	19,321	75,605
Abril	12.5	7,460	405,956	1081	81,101	487,057	4,756	356,684	19,321	111,052
Mayo	15	8,493	462,129	1362	102,129	564,258	5,312	398,436	19,321	146,500
Junio	17	9,319	507,068	1586	118,950	626,018	5,758	431,839	19,321	174,857
Julio	20	10,557	574,475	1922	144,183	718,658	6,426	481,942	19,321	217,394
Agosto	21	10,970	596,945	2035	152,594	749,538	6,649	498,643	19,321	231,573
Septiembre	20	10,557	574,475	1922	144,183	718,658	6,426	481,942	19,321	217,394
Octubre	16.5	9,112	495,833	1530	114,745	610,578	5,647	423,488	19,321	167,768
Noviembre	13	7,667	417,190	1137	85,307	502,497	4,867	365,034	19,321	118,142
Diciembre	11.5	7,048	383,487	969	72,691	456,177	4,533	339,982	19,321	96,873
AÑO		100,055	5,444,436	15,836	1,187,694	6,632,130	62,748	4,706,082	231,858	1,694,190

Gas: 40 €/MWh-PCS
CO₂: 14.4 €/MWh-PCS (0%)
Electricidad: 75 €/Mwhe
wacc = 5%

- Calor al aceite: 81.1 GWh/año
- Calor al agua: 101.4 GWh/año
- Calor del mosto: 119.8 GWh/año
- Consumo compresor: 62.7 GWh/año

$$SCOP_{calor} = 2.91$$

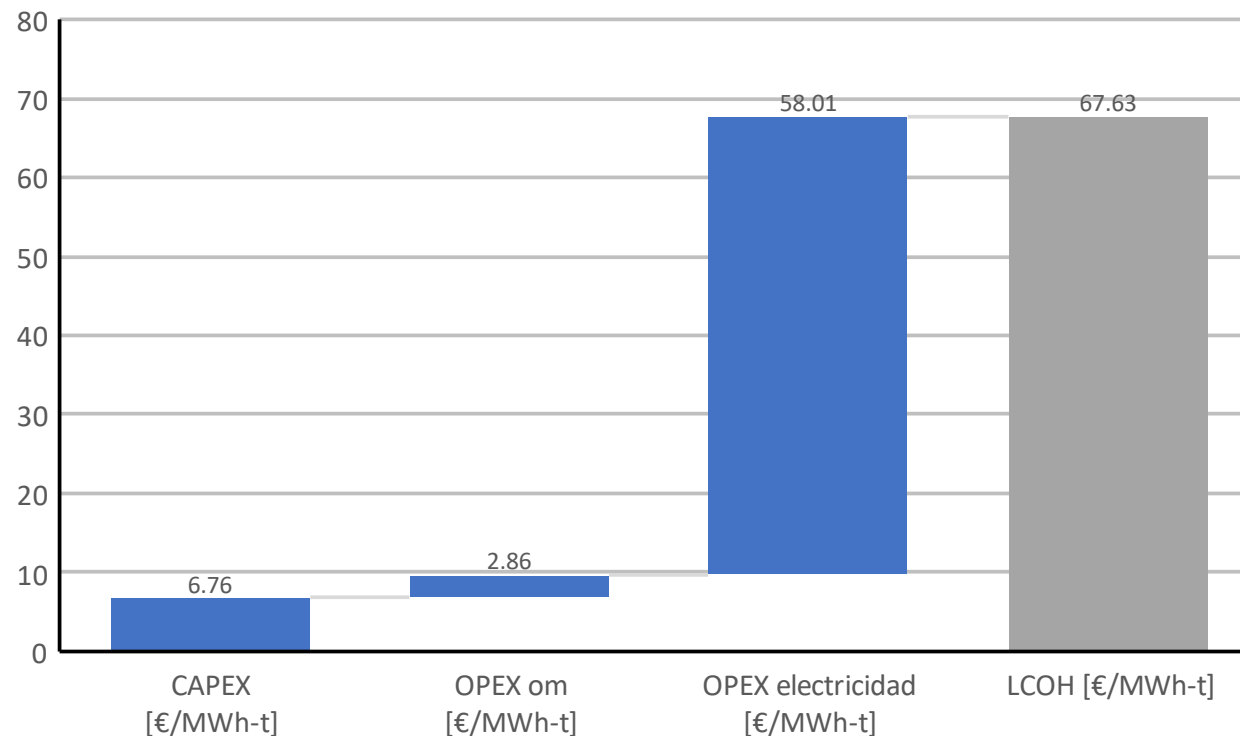
$$SCOP_{calor+frío} = 4.82$$

ANÁLISIS ECONÓMICO OPTIMISTA II

INVERSIÓN [€]	7,728,586
Intercambiador Agua [€]	18,924
intercambiador Mosto [€]	10,453
Intercambiador Aceite [€]	10,416
Intercambaidor Regenerador [€]	5,233
Compresor [€]	4,711,028
Instalación, tuberías e instrumentos [€]	2,972,533
MANTENIMIENTO [€/año]	231,858

Mantenimiento: 3% de la inversión

CAPEX [€/MWh-t]	6.76	60.87
OPEX om [€/MWh-t]	2.86	
OPEX electricidad [€/MWh-t]	58.01	
LCOH [€/MWh-t]	67.63	
OPEX actual [€/MWht]	90.27	



RETORNO: 5.3 años

INVERSIÓN ESPECÍFICA: 297 €/kW-t calor