

**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



**CÁTEDRA
RAFAEL MARIÑO
DE NUEVAS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS**



ALMACENAMIENTO MEDIANTE BOMBEO TÉRMICO

Baterías de Carnot

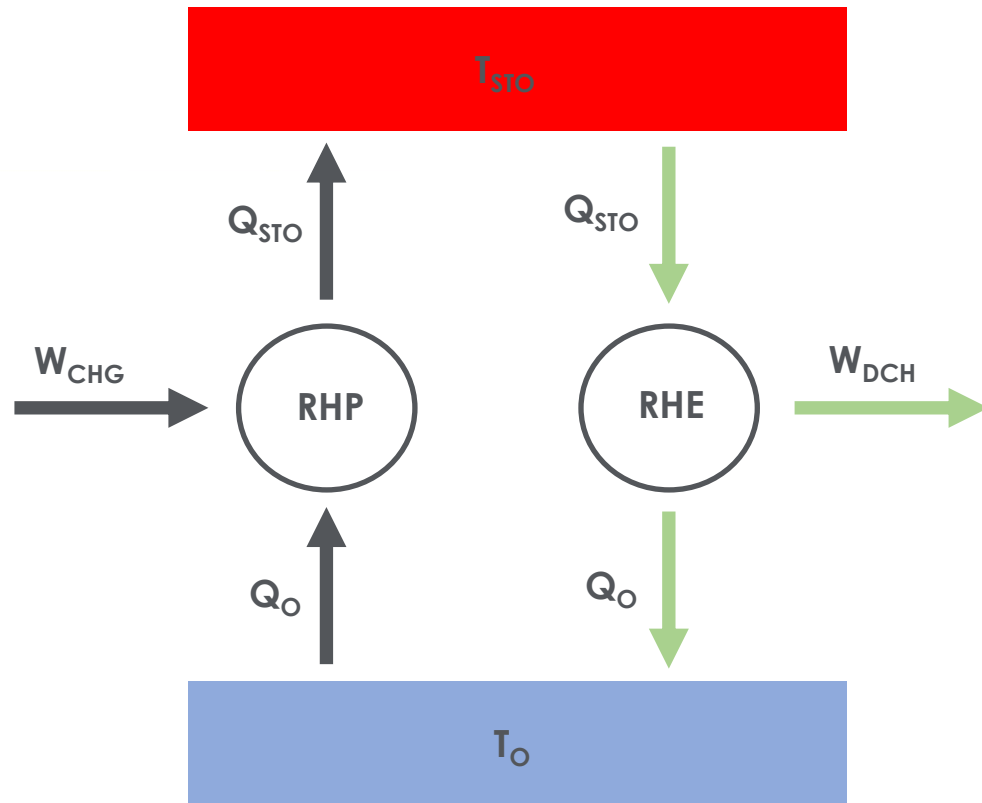
José Ignacio Linares

Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética
Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

Febrero 2024

BOMBEO TÉRMICO REVERSIBLE TÉRMICAMENTE INTEGRADO (TI-PTES)

EFICIENCIA MÁXIMA



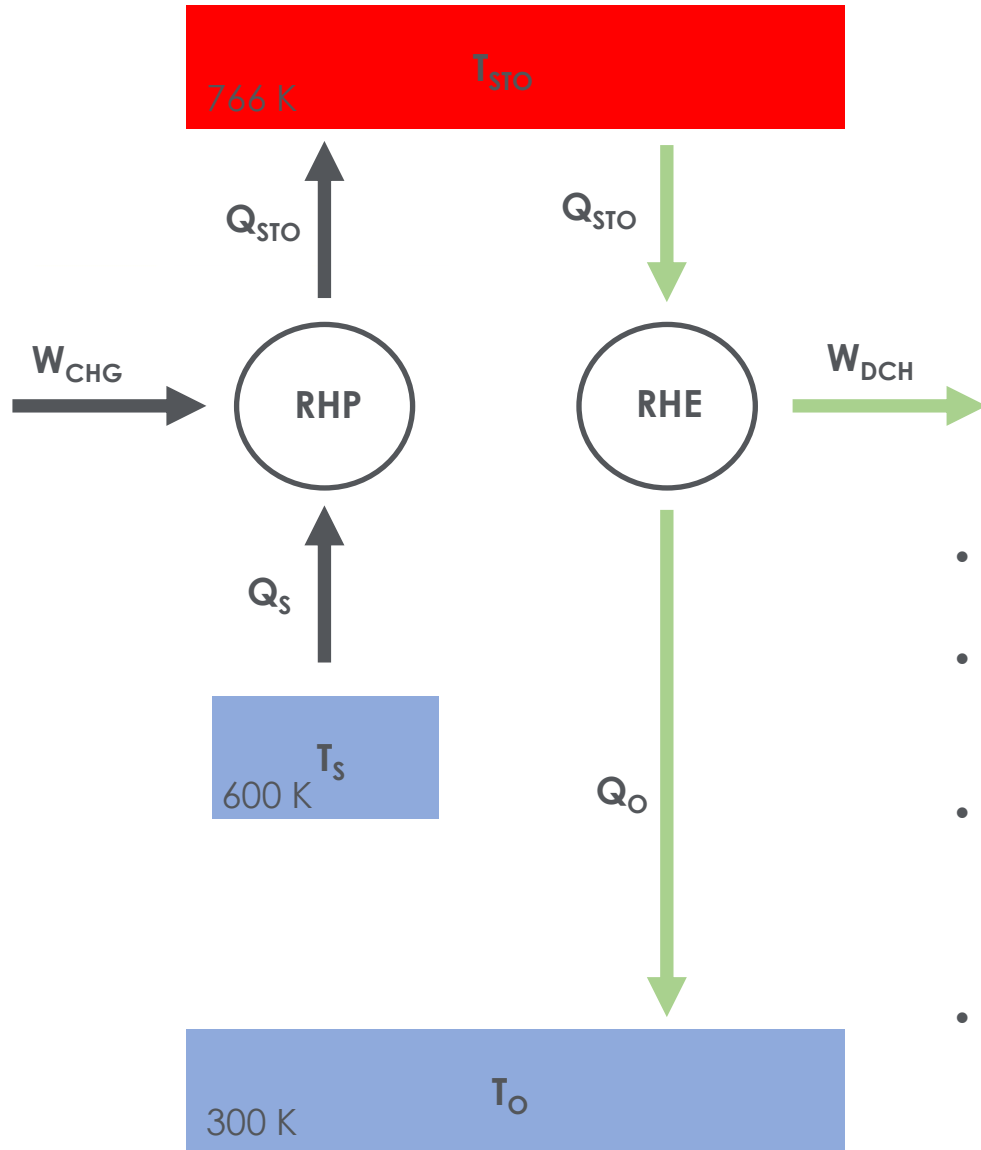
$$COP_{RHP} = \frac{T_{STO}}{T_{STO} - T_0}$$

$$\eta_{RHE} = 1 - \frac{T_0}{T_{STO}}$$

$$\eta_{round-trip} = \frac{W_{DCH}}{W_{CHG}} = \frac{Q_{STO} \cdot \eta_{RHE}}{\frac{Q_{STO}}{COP_{RHP}}} = COP_{RHP} \cdot \eta_{RHE} = 100\%$$

- Pumped Thermal Energy Storage (PTES)
- Carga: bomba de calor mueve calor del ambiente (fuente) al sumidero, donde se almacena
- Descarga: ciclo de potencia convierte el calor del sumidero (ahora fuente) en electricidad, descargando calor al ambiente (ahora sumidero)
- **La máxima eficiencia es el 100%**, requiriendo máquinas reversibles (R)

EFICIENCIA MÁXIMA



$$COP_{RHP} = \frac{T_{STO}}{T_{STO} - T_S}$$

$$\eta_{RHE} = 1 - \frac{T_O}{T_{STO}}$$

$$\eta_{round-trip} = \frac{W_{DCH}}{W_{CHG}} = \frac{Q_{STO} \cdot \eta_{RHE}}{COP_{RHP}} = COP_{RHP} \cdot \eta_{RHE} = \frac{T_{STO} - T_O}{T_{STO} - T_S} = 281\%$$

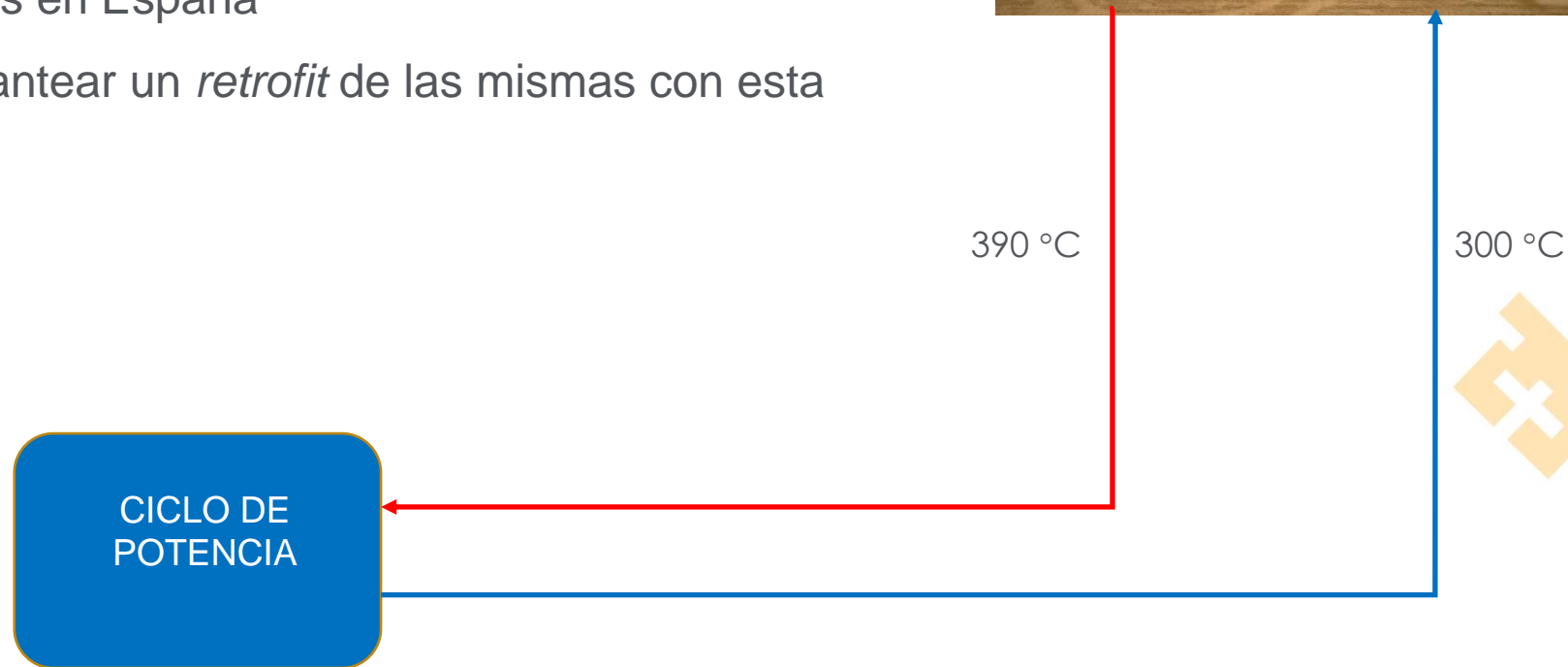
- Thermally Integrated Pumped Thermal Energy Storage (TI-PTES)
- Carga: bomba de calor mueve calor de la fuente (calor media temperatura) al sumidero, donde se almacena
- Descarga: ciclo de potencia convierte el calor del sumidero (ahora fuente) en electricidad, descargando calor al ambiente
- **La máxima eficiencia es mayor el 100% si $T_S > T_O$, requiriendo máquinas reversibles (R)**

TI-PTES

Propuesta a partir de CSP

Concepto base

- Partimos de una central CCP de 50 MWe sin almacenamiento
- Muy comunes en España
- Se podría plantear un *retrofit* de las mismas con esta tecnología



Concepto base

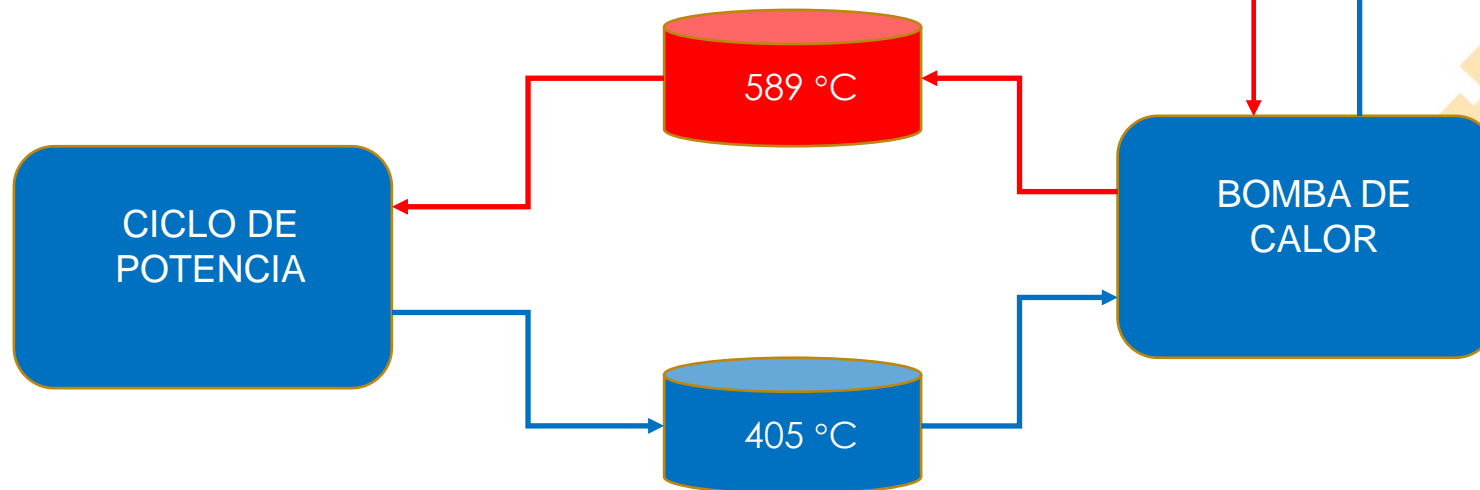
Incluimos una bomba de calor de alta temperatura con almacenamiento

La bomba de calor permite elevar las temperaturas del campo CCP a las típicas de uno de heliostatos

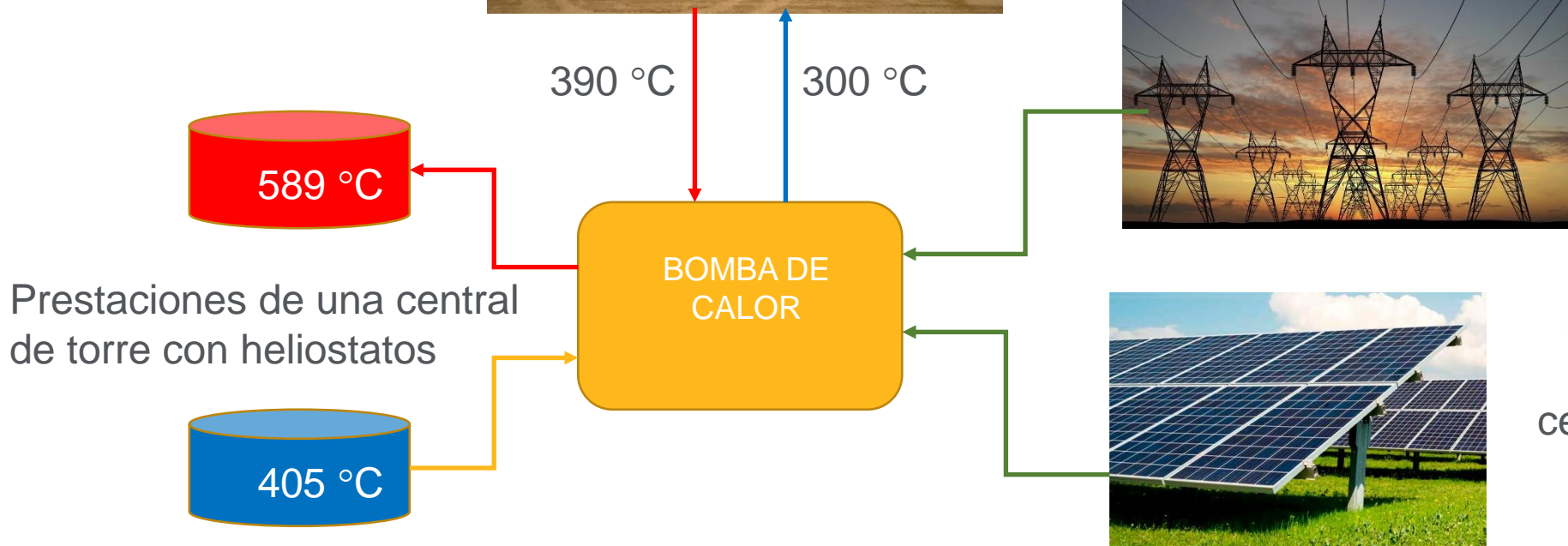


390 °C

300 °C



Concepto base



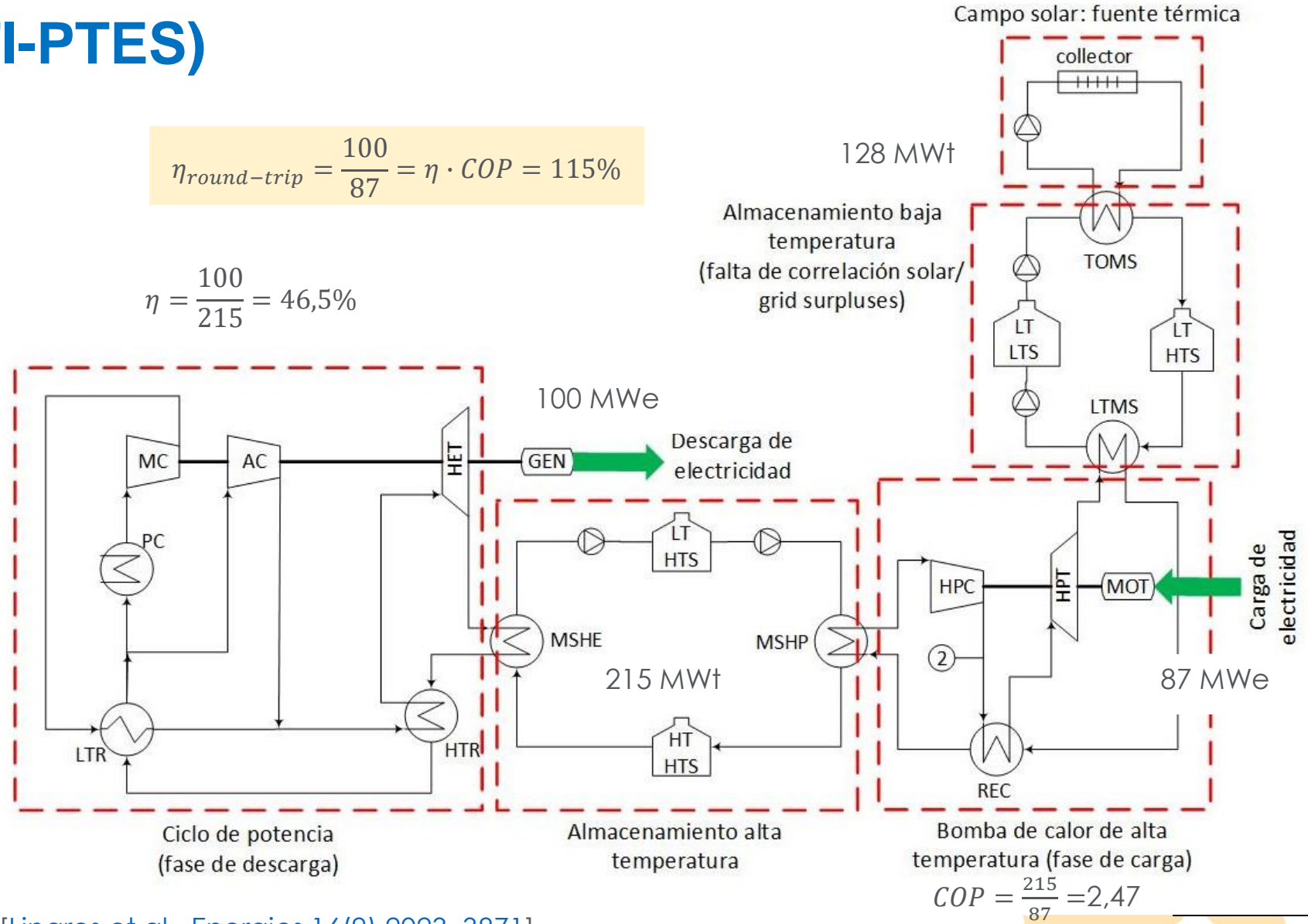
La bomba de calor requiere alimentación eléctrica

ALMACENAMIENTO (TI-PTES)

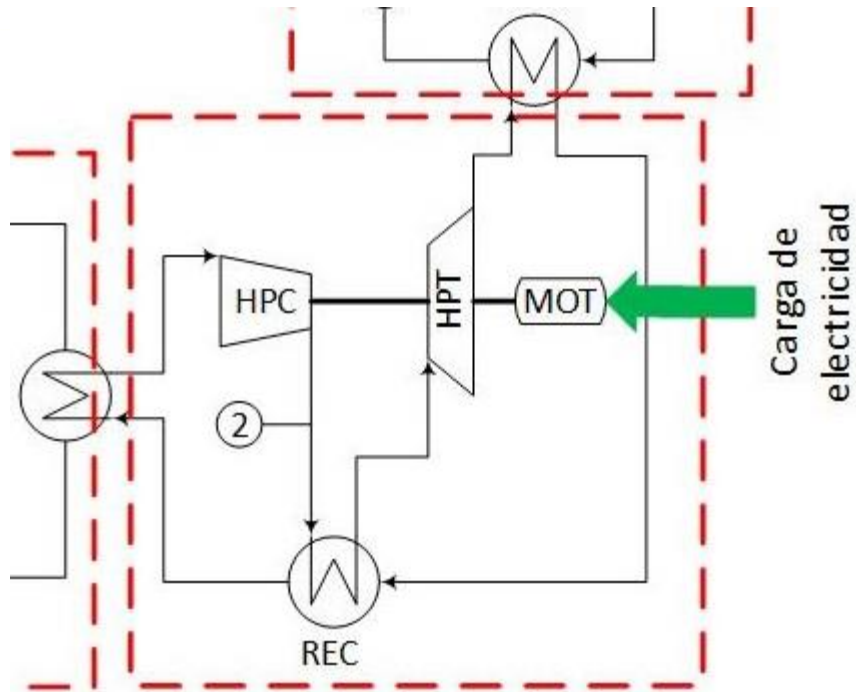
- La bomba de calor revaloriza el calor CCP, haciéndolo parecer CTR, como en un bombeo hidráulico (cota/temperatura)
- La máxima eficiencia global (round-trip) sería de 281%, si todo fuese totalmente reversible
- Las sales de baja resuelven la falta de simultaneidad de la radiación y los excedentes

$$\eta_{round-trip} = \frac{100}{87} = \eta \cdot COP = 115\%$$

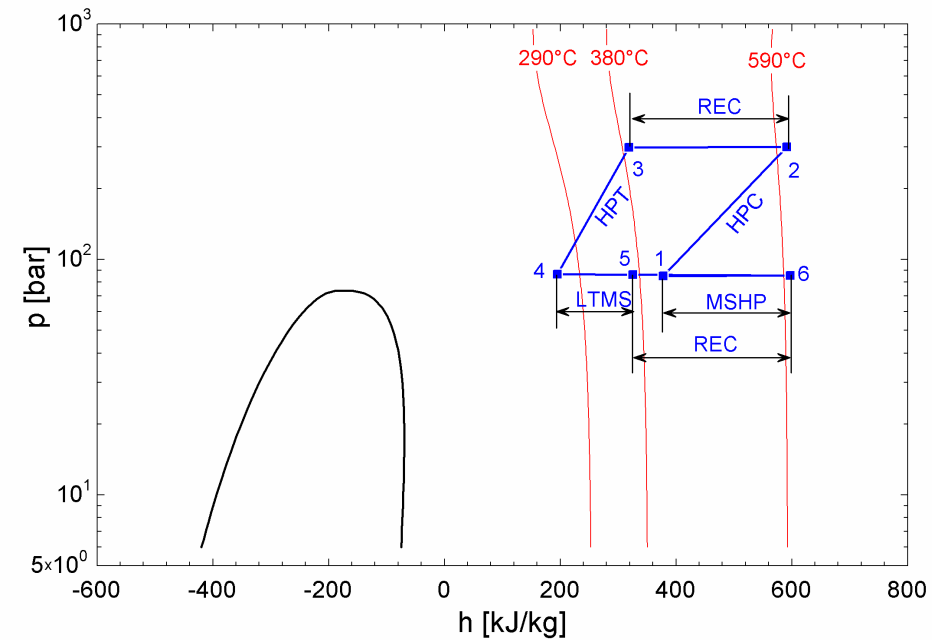
$$\eta = \frac{100}{215} = 46,5\%$$



- La clave del sistema es la bomba de calor de alta temperatura



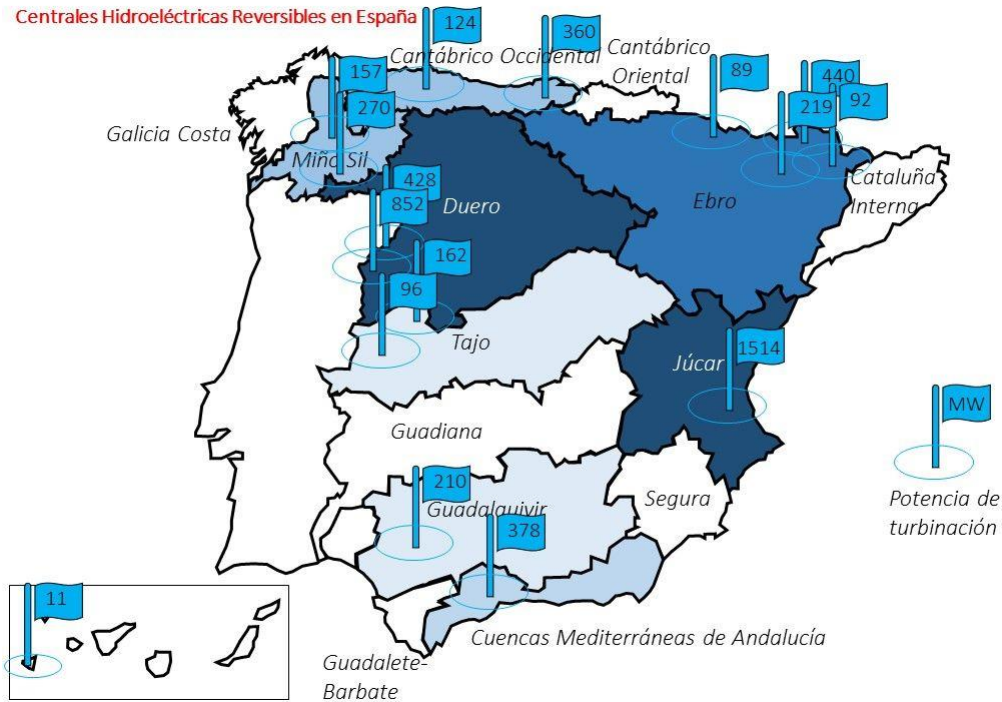
Bomba de calor de alta temperatura (fase de carga)



- La tecnología es como la de una TG, pero sin combustión
- Ciclo inverso de Brayton
- El CO_2 opera lejos del punto crítico, como gas ideal
- Podrían probarse otros fluidos

- Localización: recurso solar adecuado a campo solar CCP
- Huella: una termosolar de 50 MWe con CCP sin almacenamiento se descarga finalmente como 100 MWe (mismas horas de carga/descarga)
- Riesgo tecnológico:
 - Ciclo de potencia: novedoso, re-compresión S-CO₂. Existen sólo prototipos. Podría ser un Rankine convencional, bajando rendimiento
 - Ciclo de bomba de calor: Brayton inverso, operando en zona gas. Sin riesgo tecnológico, podría operar con otros gases y extrapolarse a otras aplicaciones
 - Sales: se han usado las convencionales (solar salt)
- Mejora: reemplazar CCP por CRS y las sales de alta por sales ternarias, para alcanzar así 800°C y más de 50% en ciclo de potencia. ¿Vale la pena?
- **Retrofit centrales CCP 50 MWe sin almacenamiento como LDES: 6 horas de carga/ 12 horas descarga (salida a 50 MWe)**

¿PHES en la mitad norte y PTES en la mitad sur?

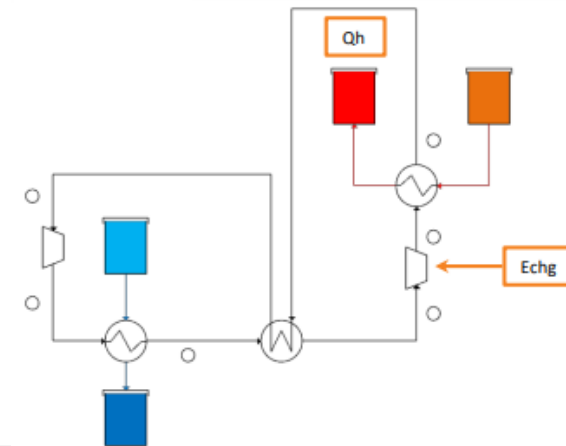


Costes orientativos*:

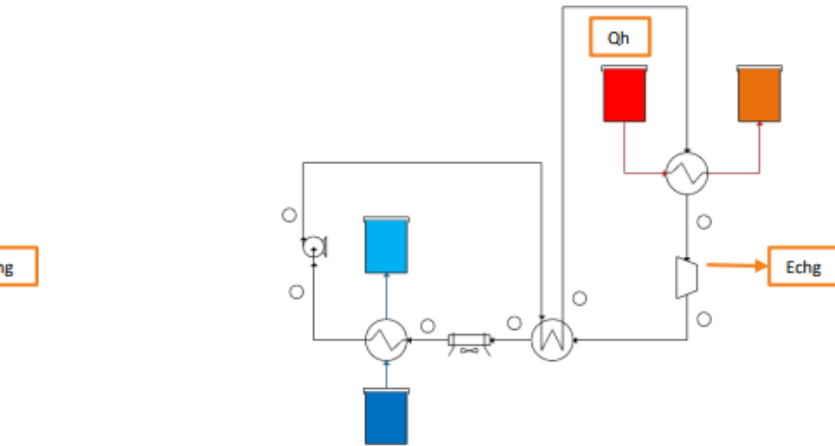
- 100 MW / 600 MWh: 190 \$/MWh
- 600 MW / 3,6 GWh: 101 \$/MWh
- 900 MW / 5,4 GWh: 90 \$/MWh

* Gran incertidumbre en costes H2X; valor conservador

- **ECHOGEN** ha desarrollado una batería de Carnot
- Tienen experiencia en ciclos de potencia
- Básicamente plantean un ciclo reversible directo/inverso de tipo Brayton transcrito



Heat Pump Cycle
 $COP = Q_h/E_{chg}$
 Ideal COP = $1/(1-T_c/T_h)$

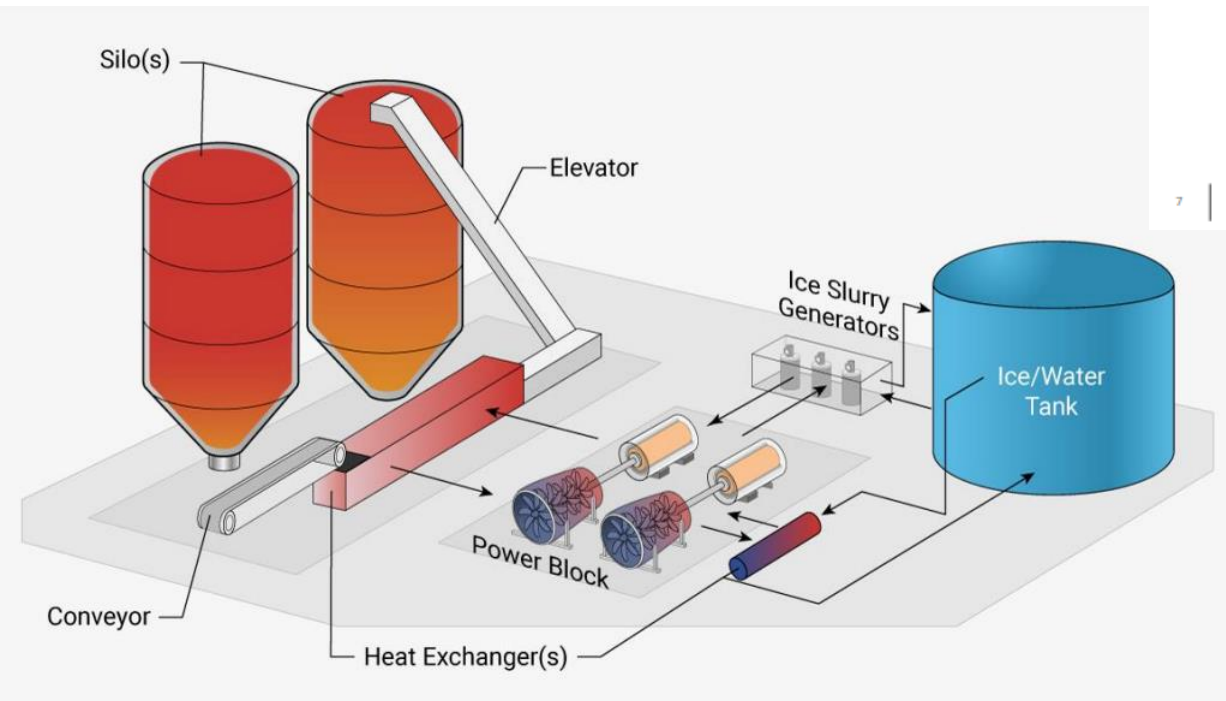


Overall Process
 $RTE = E_{gen}/E_{chg}$
 $= COP \times Efficiency$
 Ideal RTE = 100%

Power Cycle
 Efficiency = E_{gen}/Q_h
 Ideal efficiency = $1-T_c/T_h$

Non-ideal processes result in RTE ~60%, even at modest temperature ratio

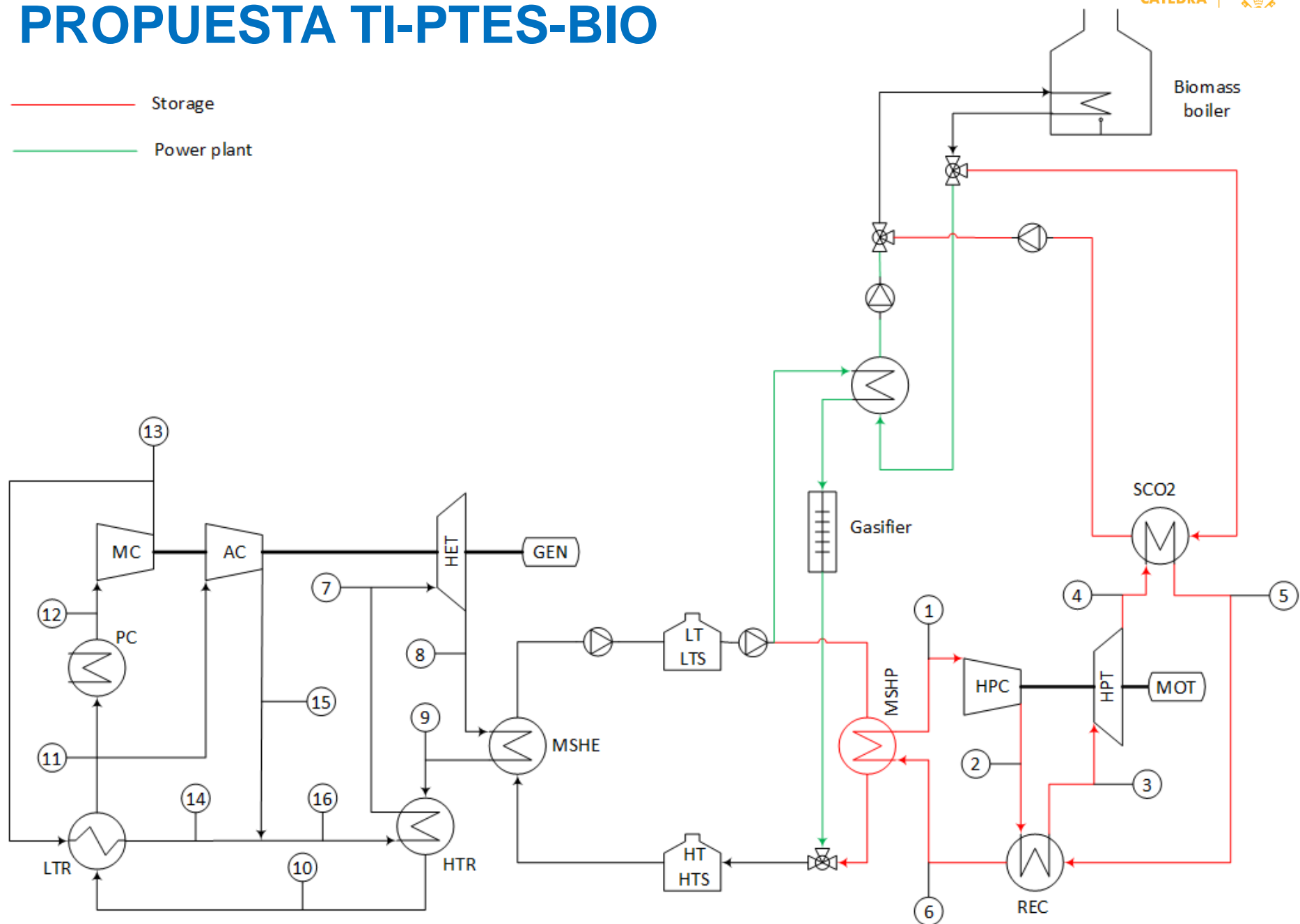
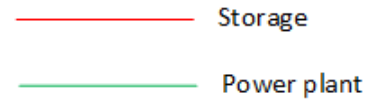
- Usan CO2 y para que sea transcrito emplean agua/hielo como foco frío, evitando así tener que generar elevadas temperaturas
- Usan arena como medio de almacenamiento



TI-PTES

Propuesta a partir de BIOMASA

PROPUESTA TI-PTES-BIO



- Se ha retirado el almacenamiento de baja temperatura al entender que la biomasa está siempre disponible
- Para asegurar la viabilidad económica se puede operar en modo TI-PTES, es decir, usando la bomba de calor, o bien de manera constante como planta de biomasa
- Como planta de biomasa reemplaza la bomba de calor por la caldera y el gasificador, de modo que sin elevar la temperatura de la caldera (para evitar oxidaciones) se obtiene prestaciones similares a la HTHP

**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



**CÁTEDRA
RAFAEL MARIÑO
DE NUEVAS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS**



Gracias por su atención

linares@comillas.edu

José Ignacio Linares

Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética

Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

comillas.edu

Febrero 2024