

¿Qué lugar ocupa la refrigeración industrial en la Ingeniería Industrial Mecánica? Una mirada académica

Facultad de Ingeniería – Universidad de la República

MSc. Ing. Ana Urquiola
MSc. Ing. Daniel Croza
Dr. Ing. Pedro Curto

Mayo 2024

Contenido

- 1 - Presentación Institucional
- 2 - Oferta académica de la Facultad de Ingeniería - UdelaR
- 3 - Conceptos básicos de ciclos de refrigeración por compresión de vapor
- 4 - Aplicaciones tradicionales de refrigeración industrial
- 5 - Aplicaciones no tradicionales; investigación en el IIMPI



Facultad de Ingeniería

Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial (IIMPI)



Facultad de Ingeniería

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there are several large, multi-story buildings with light-colored facades and many windows. The campus is surrounded by lush green trees and a well-maintained lawn. In the background, a city skyline is visible under a clear blue sky, with a body of water in the distance. A circular inset in the upper left corner provides a closer look at the interior of one of the buildings, showing a modern design with a high ceiling, exposed concrete beams, and a glass-enclosed staircase. Two white arrows point from the inset towards the building in the main image.

Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial (IIMPI)

Departamento
de
Termodinámica
Aplicada

Facultad de Ingeniería

Facultad de Ingeniería - UdelaR

23 carreras
de grado

+50 carreras
de posgrado

+700 cursos
anuales

+8000
estudiantes activos

+900 docentes



Oferta académica
vinculada a la
Ingeniería Mecánica

- Ingeniería Industrial Mecánica
- Maestría y Doctorado en Ingeniería Mecánica
- Tecnólogo Industrial Mecánico (Udelar-UTU-UTECE)

Oferta académica en Ingeniería Industrial Mecánica: cursos

Transferencia de calor



- Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación
- Nociones de transferencia de masa
- Intercambiadores de calor
- Fundamentos del acondicionamiento de aire

Oferta académica en Ingeniería Industrial Mecánica: cursos

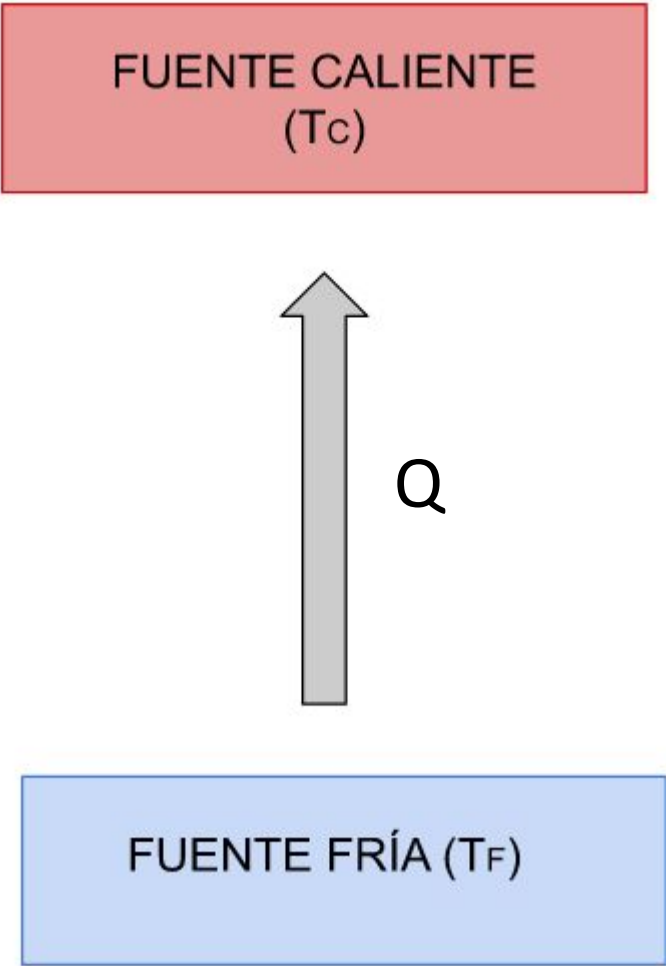
Refrigeración industrial



- Fundamentos de refrigeración por compresión de vapor
- Principales componentes del sistema de refrigeración
- Aspectos tecnológicos

Conceptos básicos de refrigeración

Objetivo: extraer una cierta carga térmica (calor) de un producto o sala, a efectos de establecer una cierta temperatura.

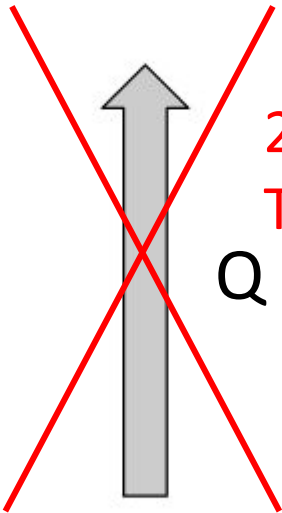


FUENTE CALIENTE
(T_c)

The diagram illustrates a thermodynamic cycle. At the top, a red rectangular box is labeled 'FUENTE CALIENTE (T_c)'. At the bottom, a blue rectangular box is labeled 'FUENTE FRÍA (T_F)'. A vertical grey arrow points upwards from the blue box to the red box, with the letter 'Q' positioned to its right, indicating the direction of heat transfer.

FUENTE FRÍA (T_F)

FUENTE CALIENTE
(T_c)

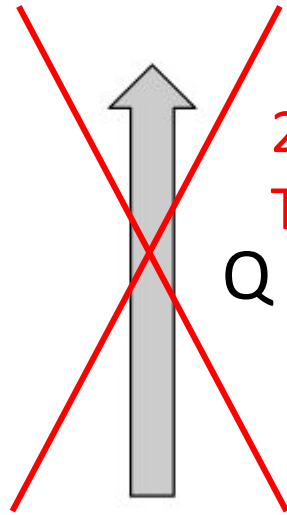


2º Principio de la
Termodinámica

Q

FUENTE FRÍA (T_F)

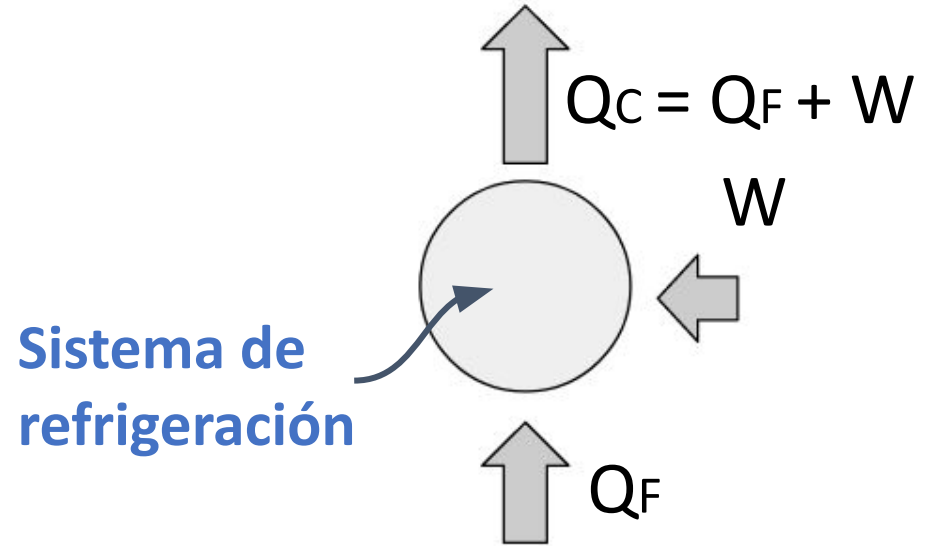
FUENTE CALIENTE
(T_C)



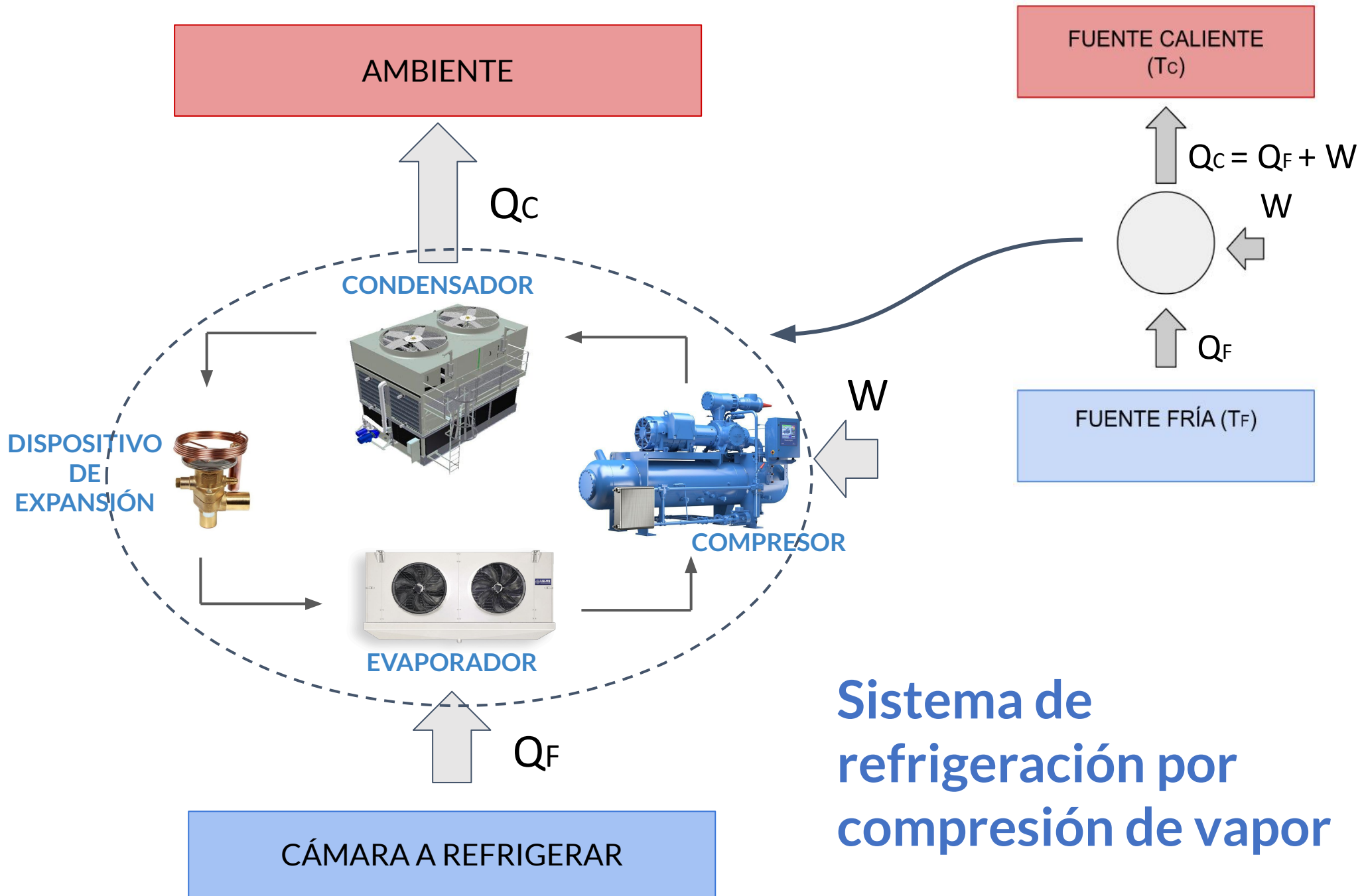
2º Principio de la
Termodinámica

FUENTE FRÍA (T_F)

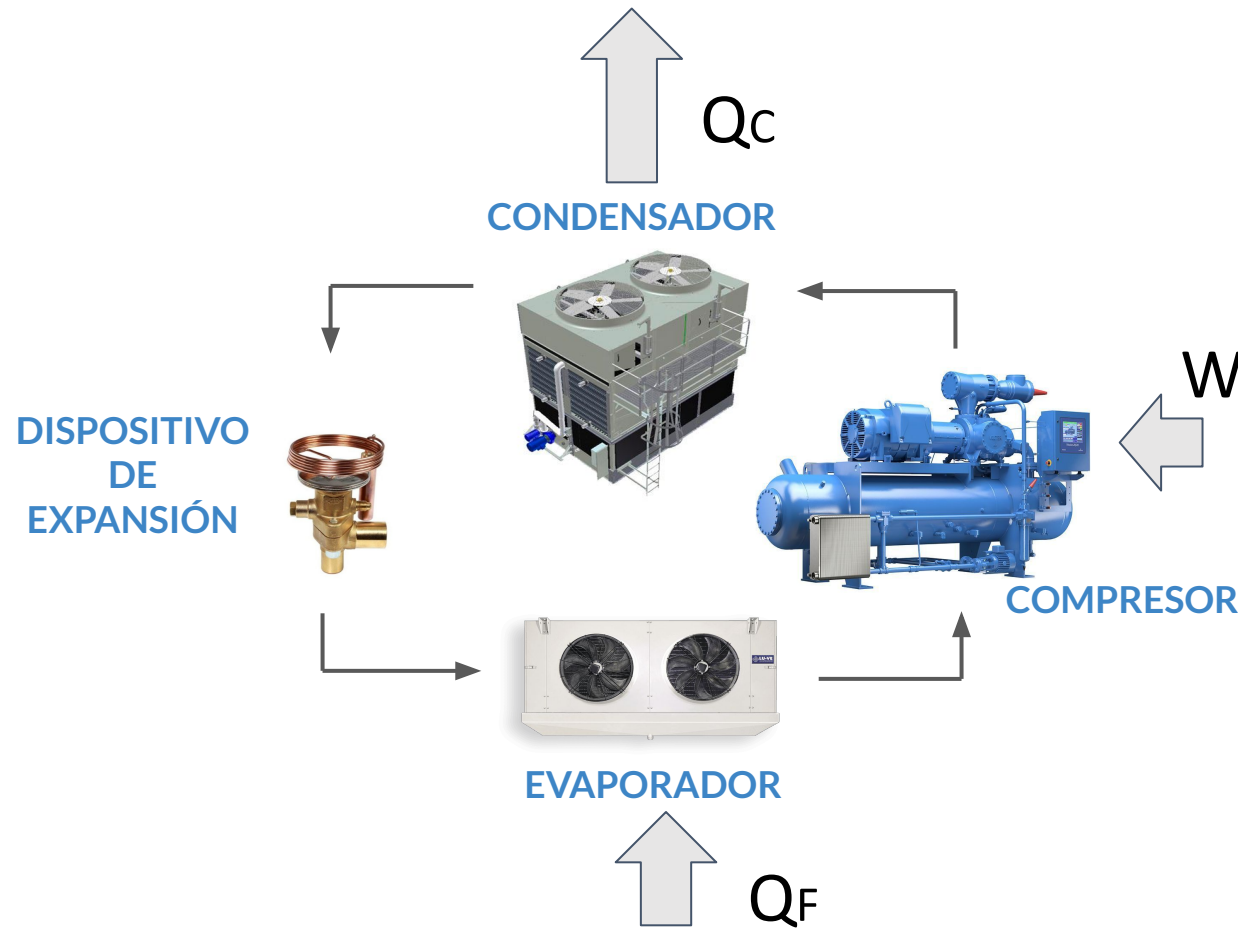
FUENTE CALIENTE
(T_C)



FUENTE FRÍA (T_F)



Sistema de refrigeración por compresión de vapor



Eficiencia del ciclo de refrigeración

$$COP = \frac{Q_F}{W}$$

Sistema de refrigeración por compresión de vapor

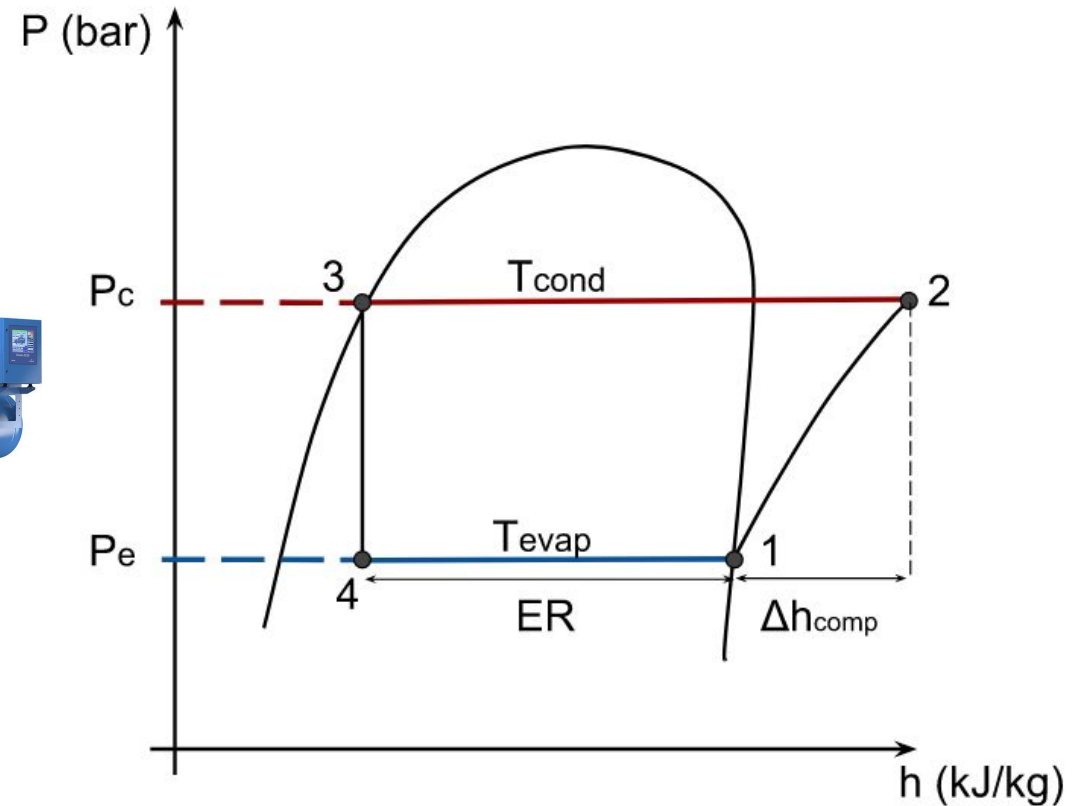
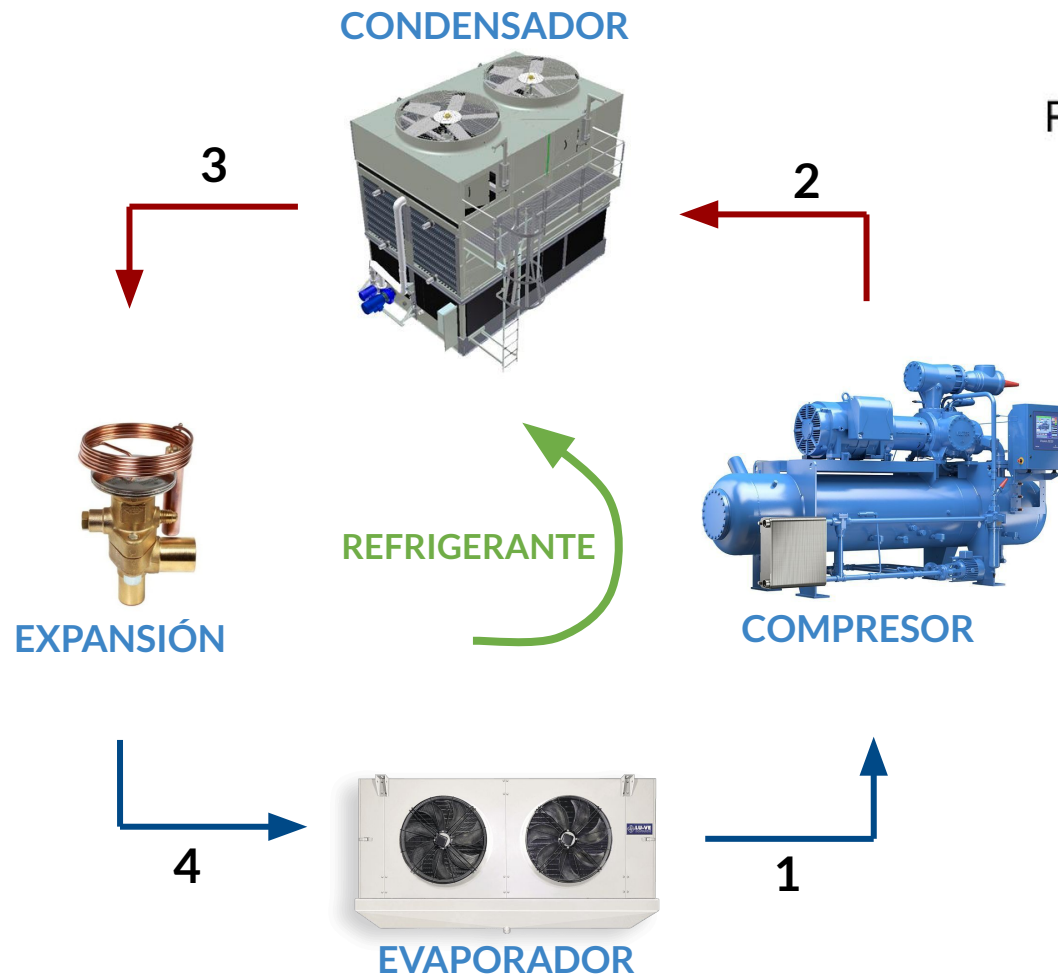


Diagrama presión - entalpía del refrigerante

Sistema de refrigeración por compresión de vapor

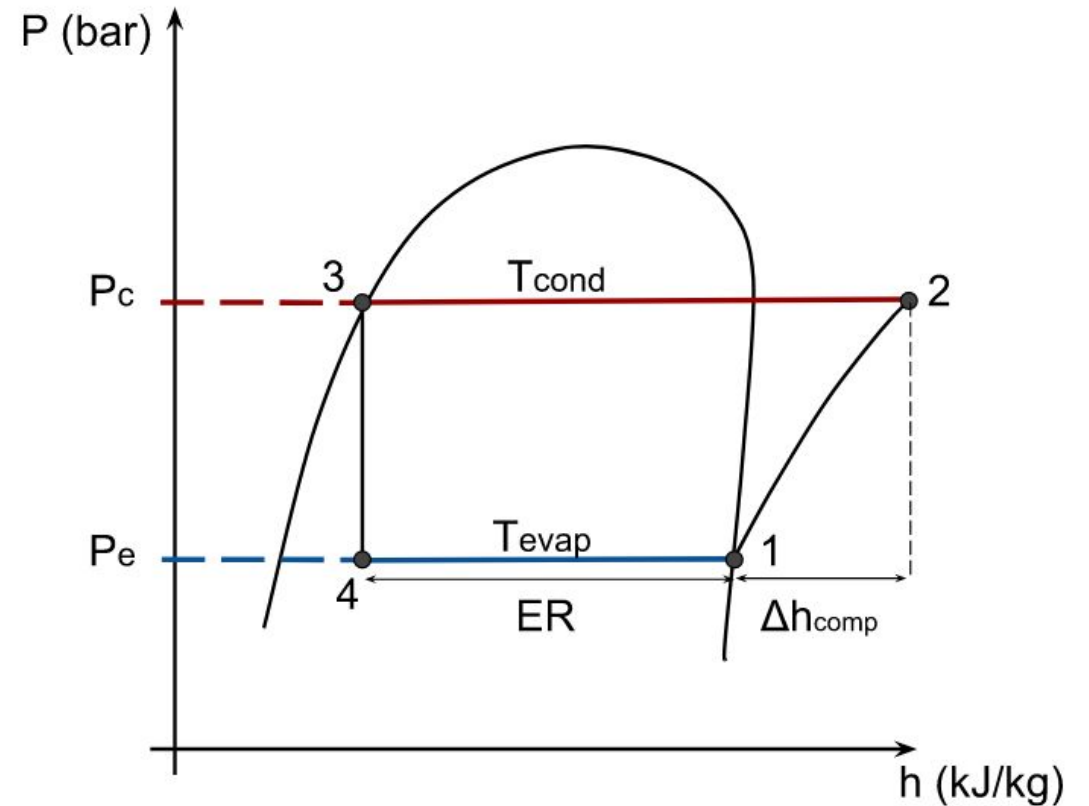
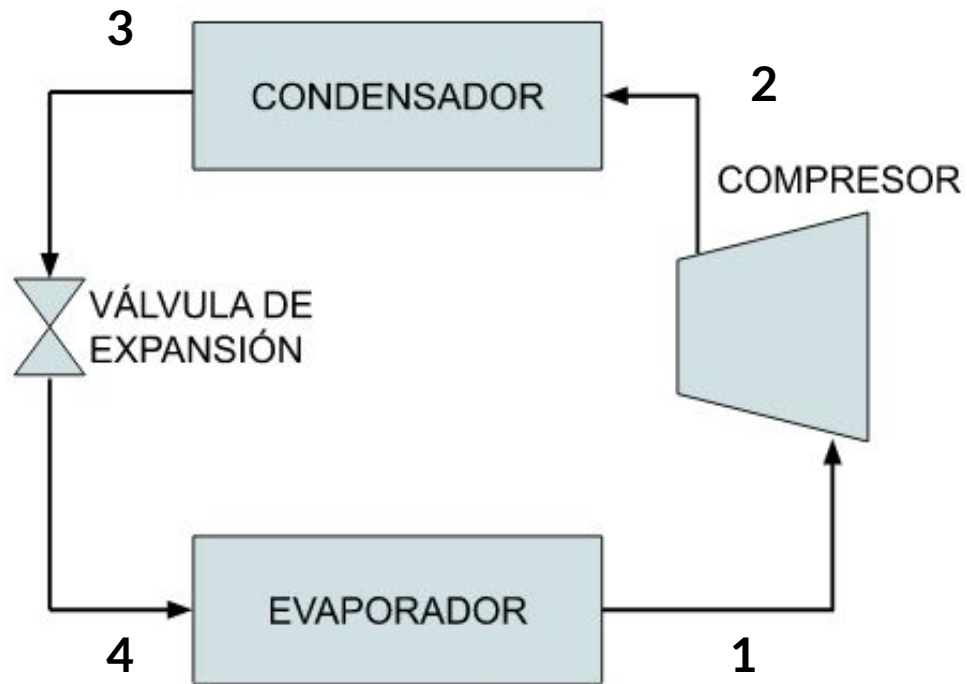
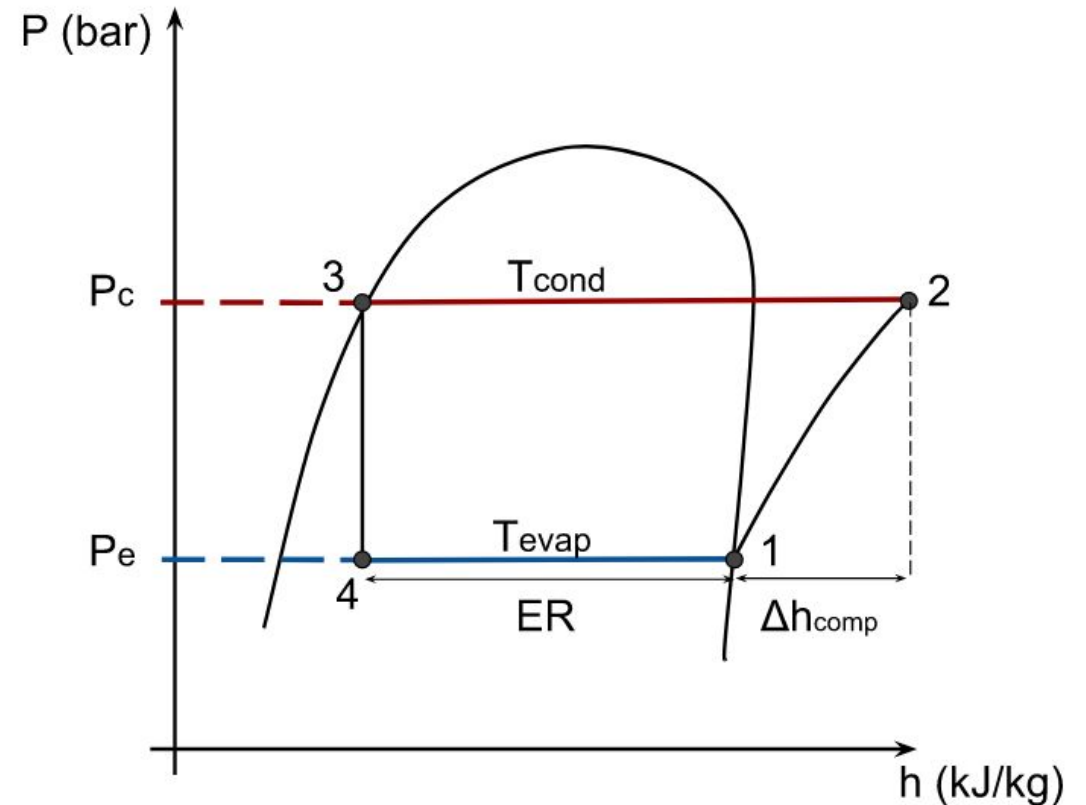
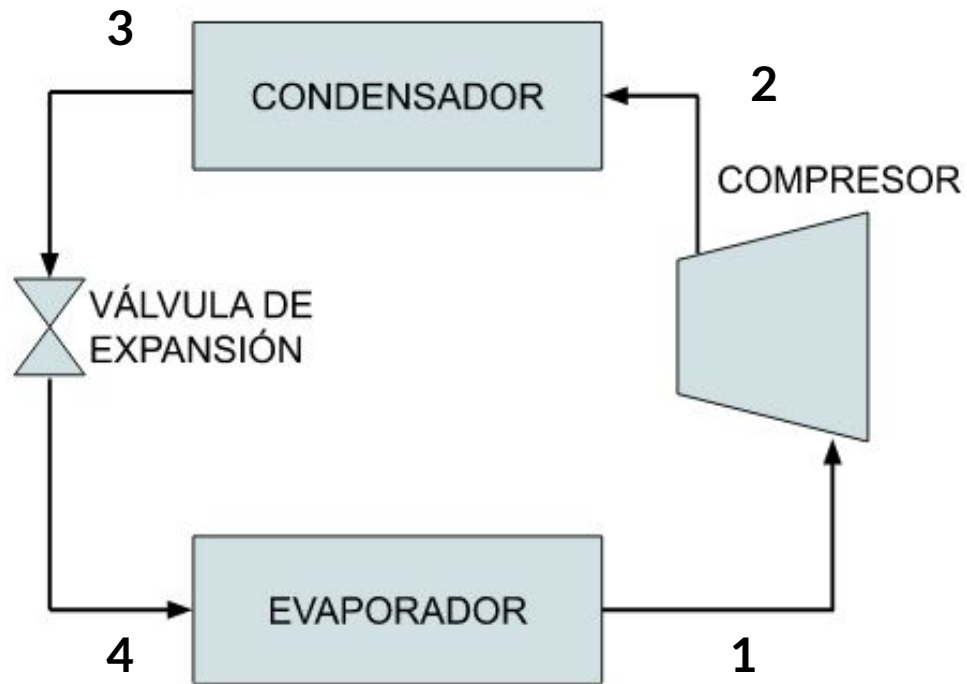


Diagrama presión - entalpía del refrigerante

Sistema de refrigeración por compresión de vapor

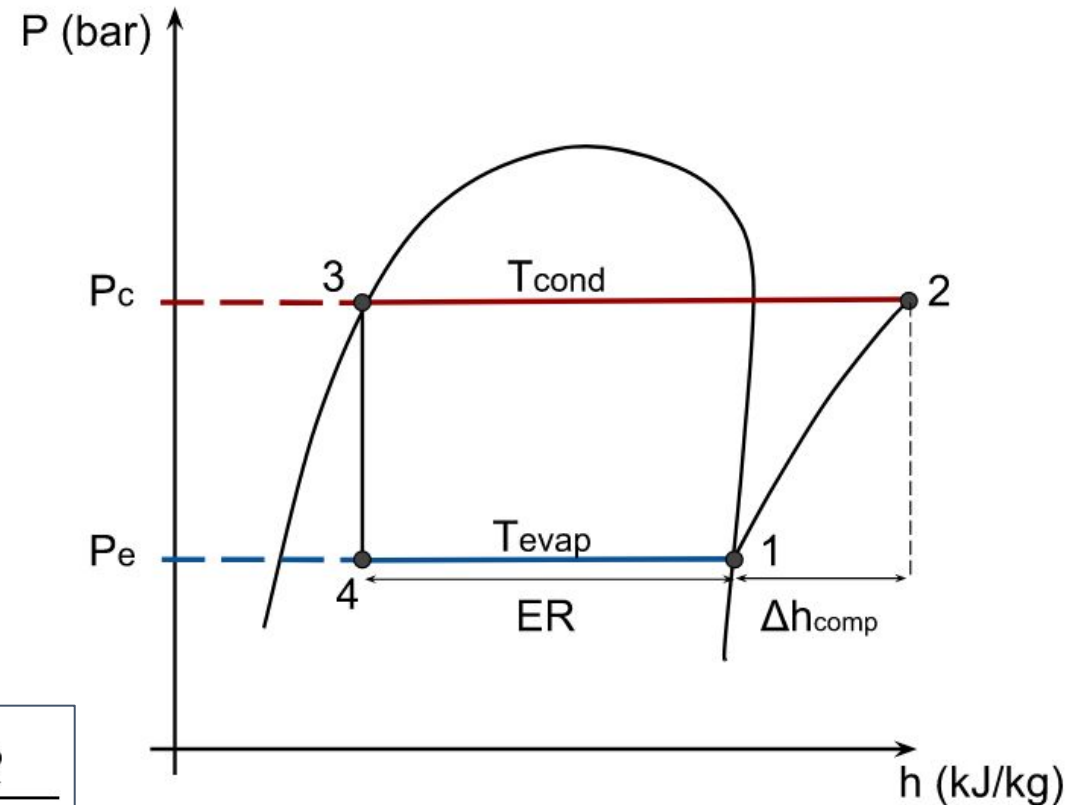
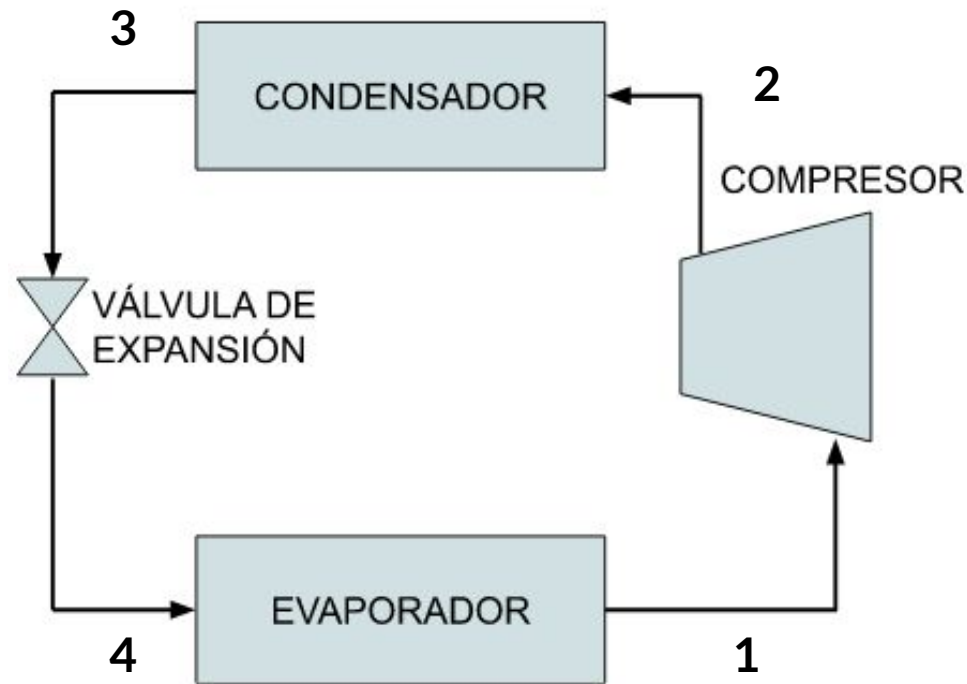


$$Q_F = m_{ref} ER$$

$$W = m_{ref} \Delta h_{comp}$$

Diagrama presión - entalpía del refrigerante

Sistema de refrigeración por compresión de vapor



$$\left. \begin{aligned} Q_F &= m_{ref} ER \\ W &= m_{ref} \Delta h_{comp} \end{aligned} \right\} \boxed{COP = \frac{Q_F}{W} = \frac{ER}{\Delta h_{comp}}}$$

Diagrama presión - entalpía del refrigerante

Aplicaciones tradicionales de refrigeración industrial

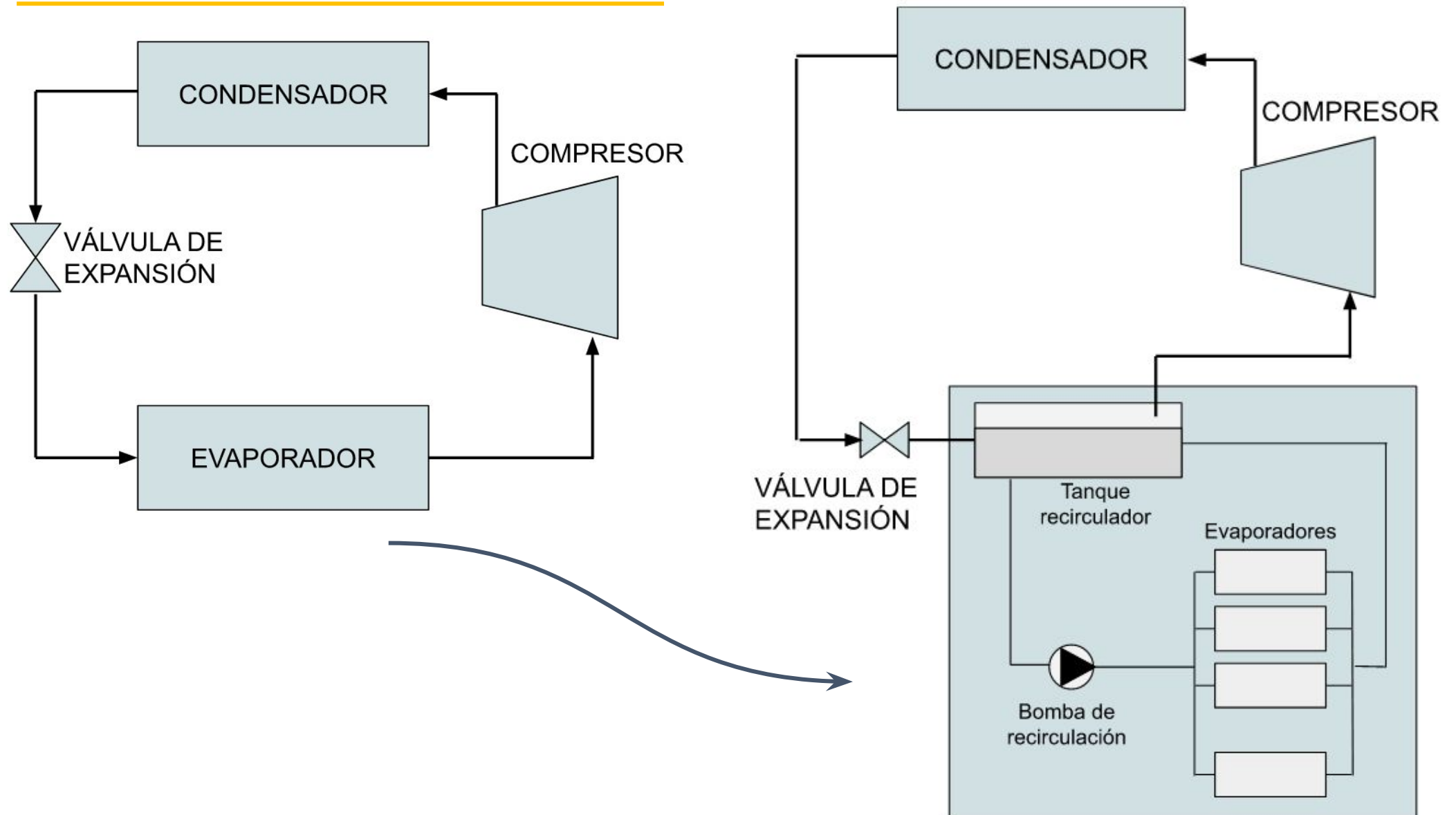
- Instalaciones de amoníaco
- Sistema recirculado
- Sistemas con presiones múltiples

Instalaciones de amoníaco

- Buen COP
- Amplio rango de temperaturas de trabajo
- Presiones de trabajo adecuadas
- Económico
- No daña la capa de ozono
- No genera efecto invernadero

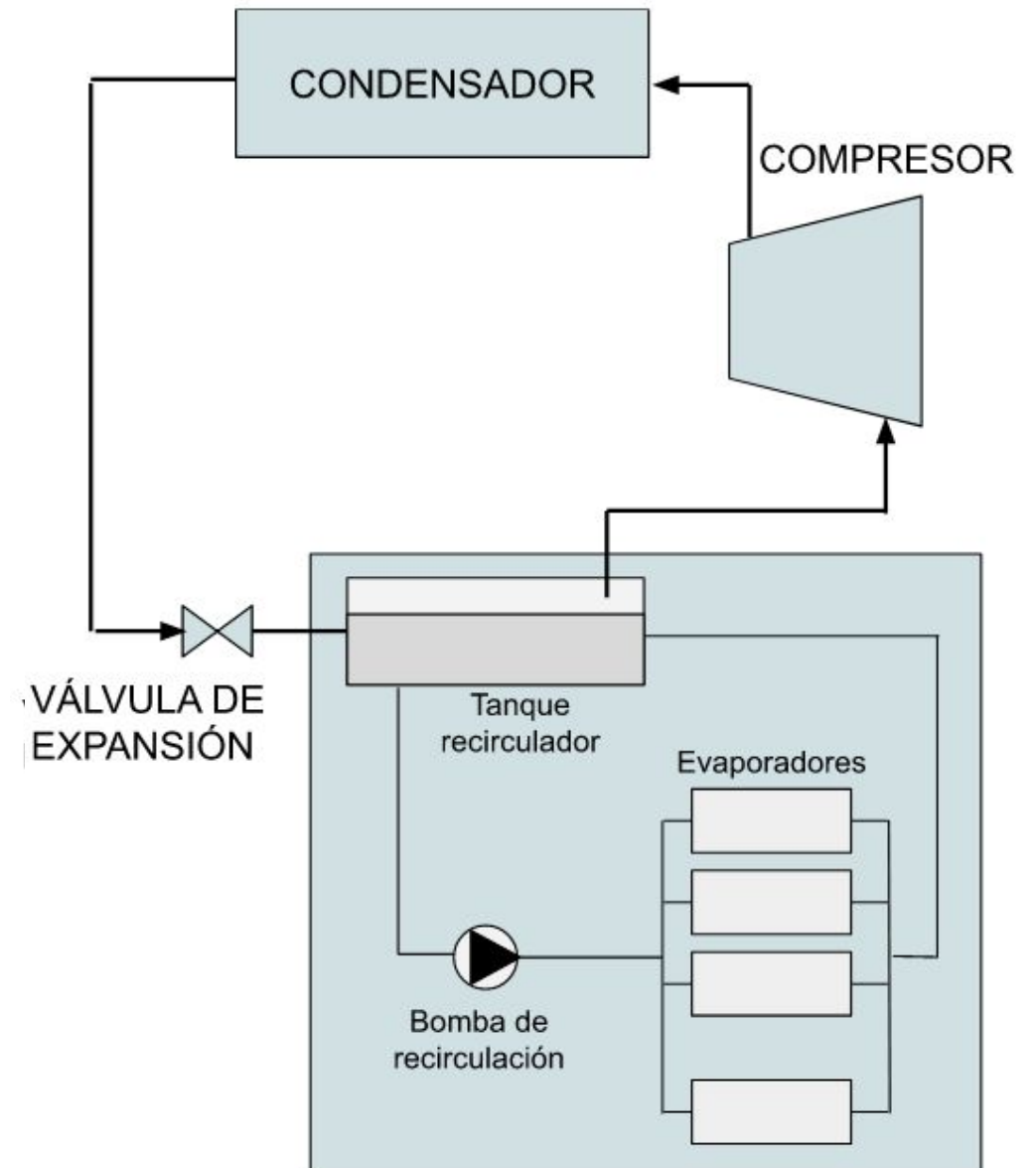
- **Altamente tóxico**

Sistemas de recirculados



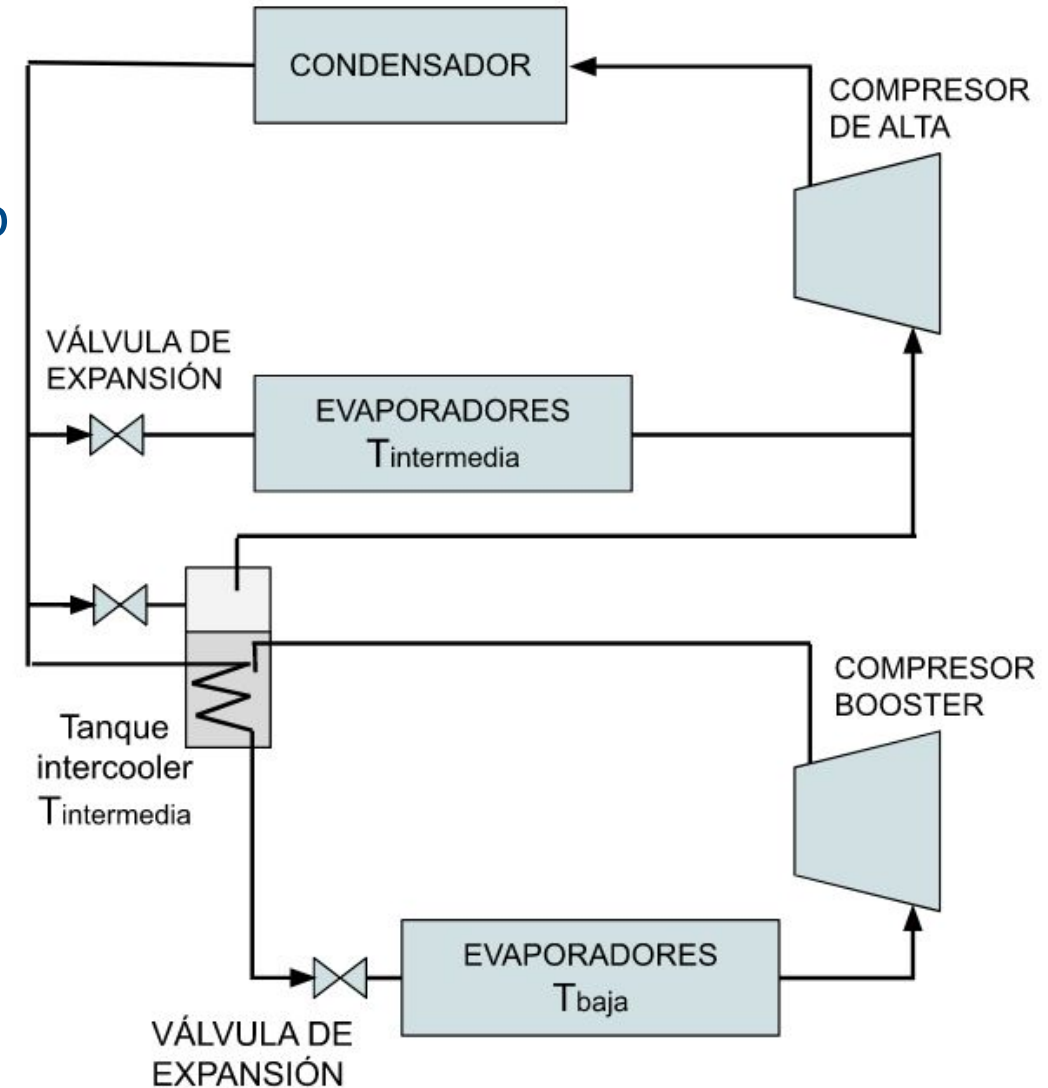
Sistemas de recirculados

- Mejora de la **transferencia de calor** dentro de los evaporadores, lo que implica **evaporadores más pequeños**
- El compresor succiona vapor saturado, lo que **reduce el consumo de potencia y la temperatura de descarga**
- Mejora el **COP** del sistema



Sistemas con presiones múltiples

- **Varias temperaturas de evaporación**
(Ejemplo: cámaras de producto fresco y cámaras de producto congelado).
- **Mejora el COP** del sistema y los compresores trabajan con menores saltos de presión.



Aplicaciones no tradicionales, investigación en el IIMPI

- Formación de escarcha en vegetales congelados
- Pérdidas evaporativas durante el enfriamiento de carne vacuna
- Acumulación de energía con sistema PHES

Formación de escarcha en vegetales congelados

Problema de estudio

¿Podrían las industrias de congelados adecuarse al consumo flexible de energía?
¿Cuál es el impacto de la desconexión de la red eléctrica en la calidad del producto?

A escala industrial, el almacenamiento de alimentos congelados está sujeto a **fluctuaciones de temperatura**, lo que conlleva **pérdida de peso** del producto y **formación de escarcha**, afectando la calidad del producto y por lo tanto generando una pérdida económica para la industria.

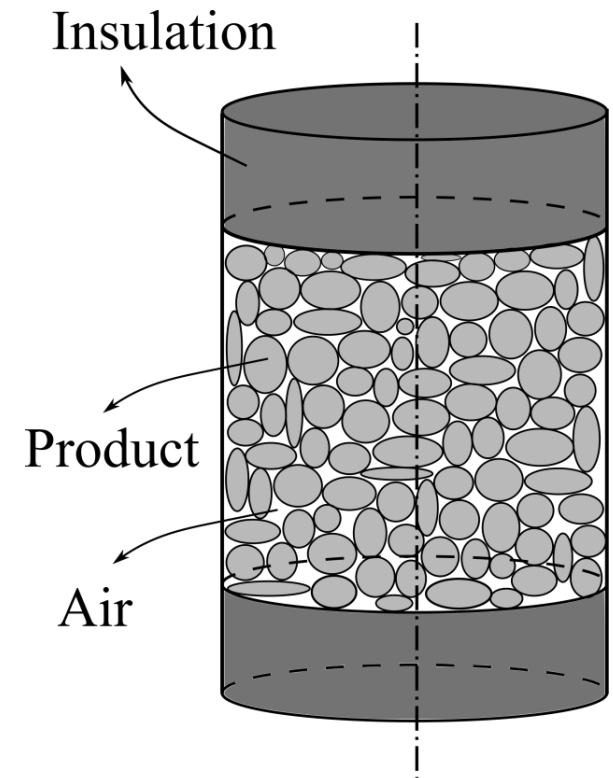
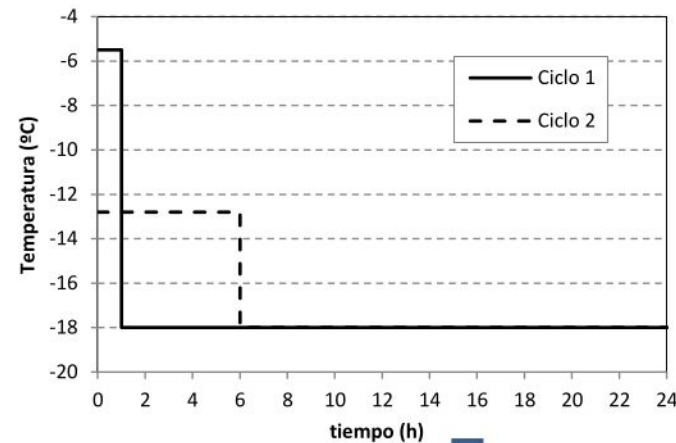


Formación de escarcha en vegetales congelados

Objetivo

Estudiar la **formación de escarcha** dentro de pallets con **vegetales congelados** sujetos a **fluctuaciones de temperatura** de cámara, utilizando un software de **cálculo computacional (CFD)**.

- Modelado de la transferencia de calor y masa en un medio macroporoso, con formación de escarcha



Formación de escarcha en vegetales congelados

Objetivo

Estudiar la **formación de escarcha** dentro de pallets con **vegetales congelados** sujetos a **fluctuaciones de temperatura** de cámara, utilizando un software CFD.

- Modelado de la transferencia de calor y masa en un medio macroporoso, con formación de escarcha
- Identificación de parámetros



Formación de escarcha en vegetales congelados

Objetivo

Estudiar la **formación de escarcha** dentro de pallets con **vegetales congelados** sujetos a **fluctuaciones de temperatura** de cámara, utilizando un software CFD.

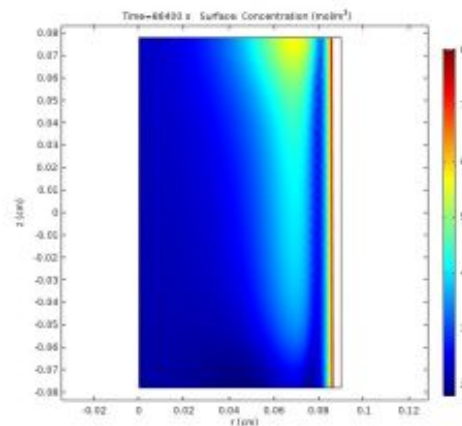
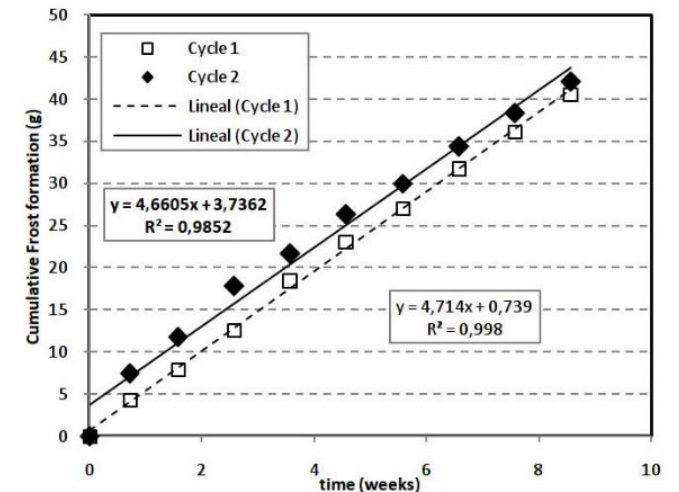
- Modelado de la transferencia de calor y masa en un medio macroporoso, con formación de escarcha
- Identificación de parámetros
- Validación experimental (medición de temperatura y escarcha)



Formación de escarcha en vegetales congelados

Principales resultados

- El modelo predice **adecuadamente** la **temperatura** del producto para los distintos ciclos.
- El modelo es una buena herramienta para **identificar las zonas** del contenedor más susceptibles a la **formación de escarcha**.



C 27%	D 30%
A 20%	B 23%

Formación de escarcha en vegetales congelados

Principales resultados

- El modelo predice **adecuadamente** la **temperatura** del producto para los distintos ciclos.
- El modelo es una buena herramienta para **identificar las zonas** del contenedor más susceptibles a la **formación de escarcha**.
- La **formación de escarcha** se **incrementa** cuanto **mayor** es la **amplitud de oscilación**, pero **decrece** con **mayores frecuencias** y **temperaturas medias**.
- Los **parámetros** que tienen **más impacto** en la formación de escarcha resultaron ser la **difusividad másica efectiva** y el **coeficiente de convección**.



Pérdidas evaporativas durante el enfriamiento de carne vacuna

Problema de estudio

- Reacciones postmortem resultan en la transformación del **músculo en carne**.
- La **evolución de la temperatura** del producto durante las primeras 24 horas impacta sobre su **calidad** final (textura, sabor, olor, etc.).
- Transferencia de calor y masa entre la carne y el aire de la cámara, lo que conlleva **pérdidas evaporativas de 1,2 a 2,4%** que implican **pérdidas económicas**.



Pérdidas evaporativas durante el enfriamiento de carne vacuna

Problema de estudio

- Reacciones postmortem resultan en la transformación del **músculo en carne**.
- La **evolución de la temperatura** del producto durante las primeras 24 horas impacta sobre su **calidad** final (textura, sabor, olor, etc.).
- Transferencia de calor y masa entre la carne y el aire de la cámara, lo que conlleva **pérdidas evaporativas de 1,2 a 2,4%** que implican **pérdidas económicas**.

Ej.:
faena
350 animales/día
de 300 kg

4500 USD/ton

2% →

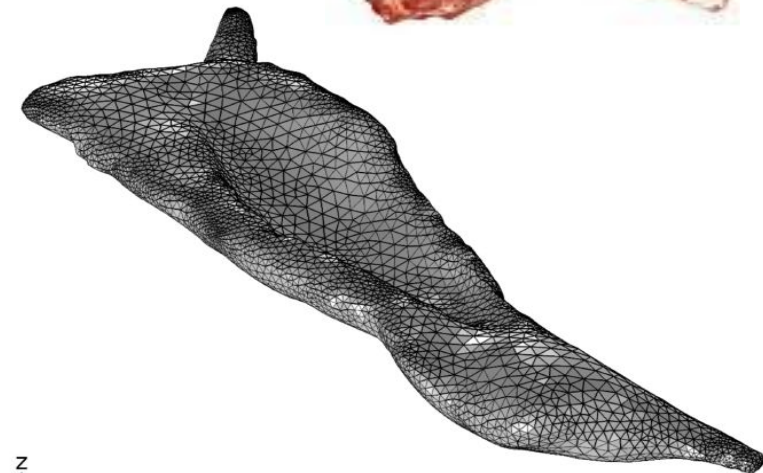
Se evaporan
≈ 9.500 USD/día



Pérdidas evaporativas durante el enfriamiento de carne vacuna

Descripción del modelo

- Modelo 3D de una media res
- Modelado numérico de la Transferencia de Calor y Masa de agua en el sólido
- Condición de borde: convección, radiación y evaporación



Pérdidas evaporativas durante el enfriamiento de carne vacuna

Validación del modelo

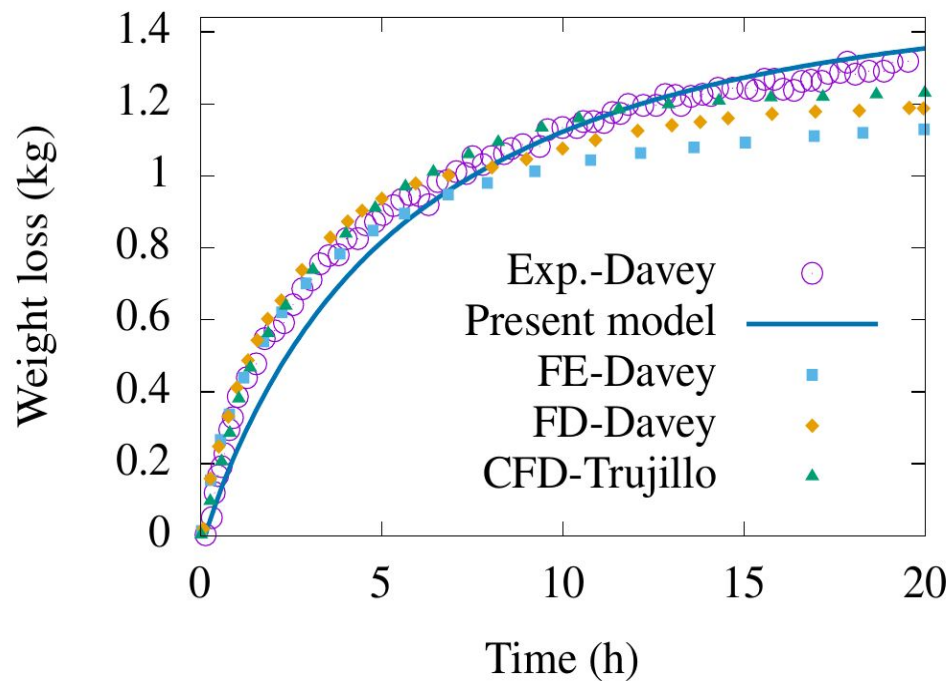
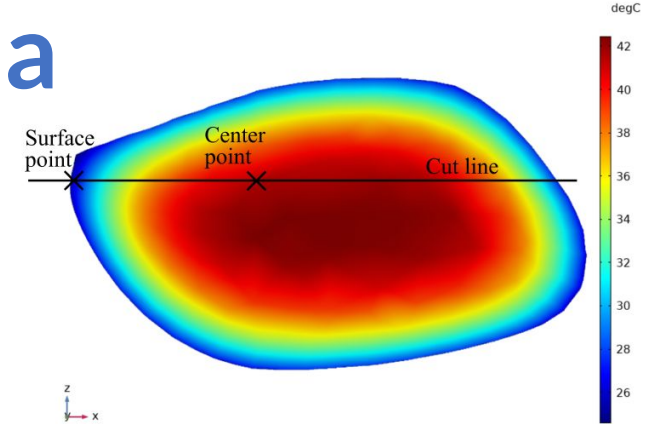


Figura 1 - Pérdida de masa (por evaporación) acumulada durante el proceso de enfriamiento.

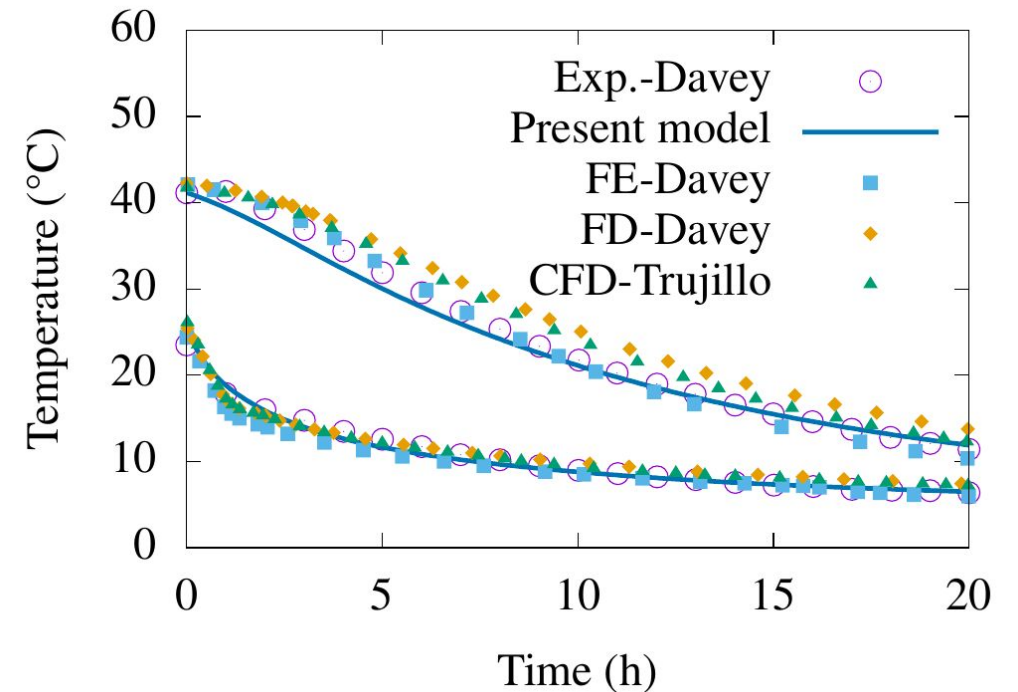


Figura 2 - Evolución de la temperatura en la superficie y centro de la pierna.

Pérdidas evaporativas durante el enfriamiento de carne vacuna

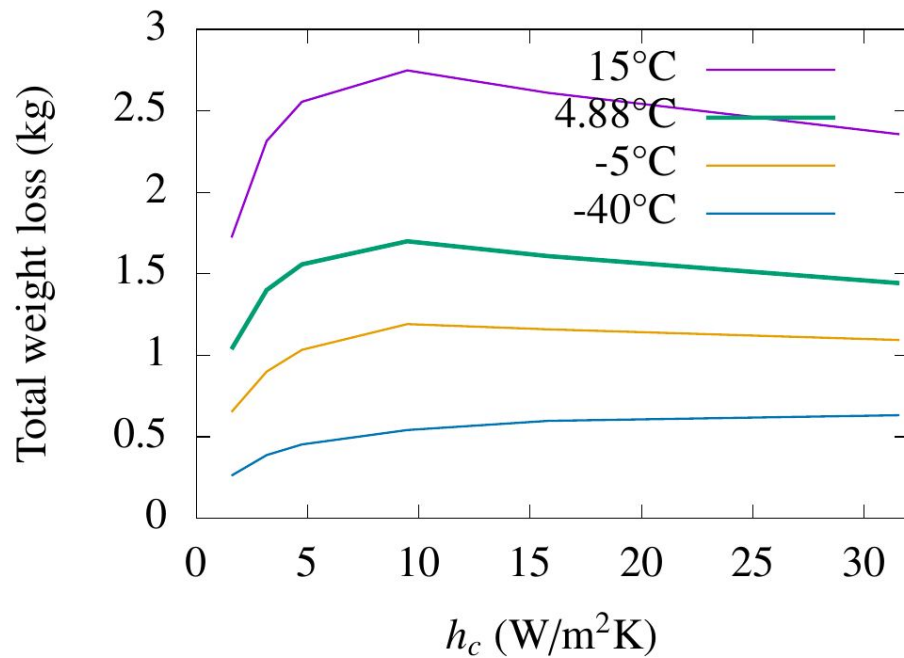


Figura 3 - Pérdida de masa total para distintos coeficientes convectivos. Evaluación en distintos escenarios de enfriamiento radiativo ($T_w \neq T_a$).

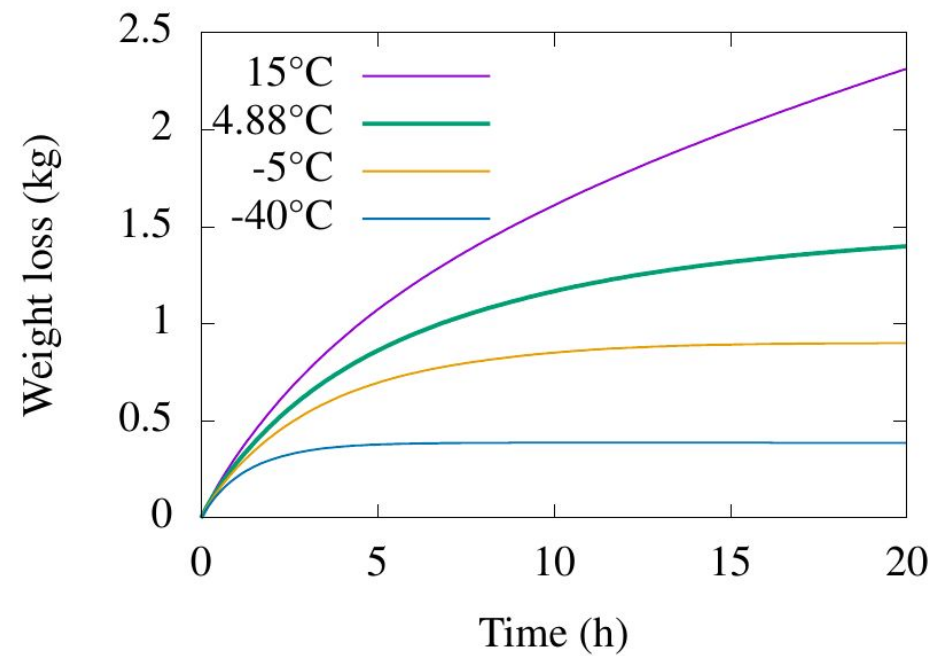
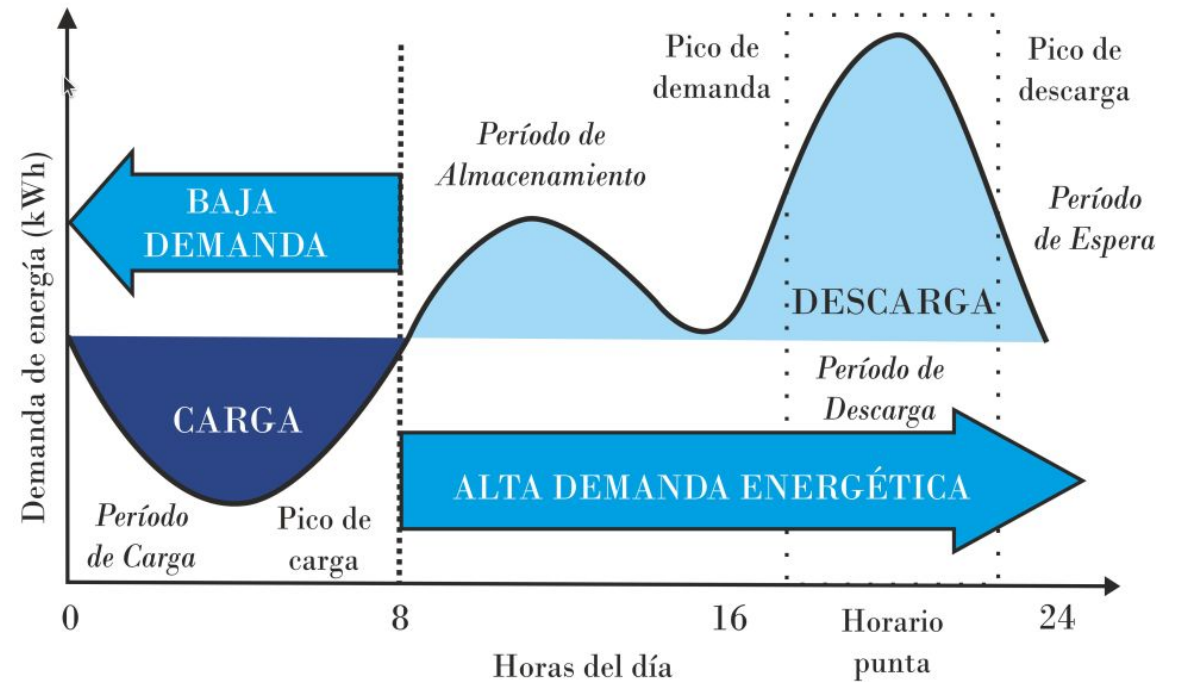


Figura 4 - Pérdida de masa acumulada durante el enfriamiento, para distintas T_w , manteniendo h_c .

Acumulación de energía con sistema PHES

Problema de estudio

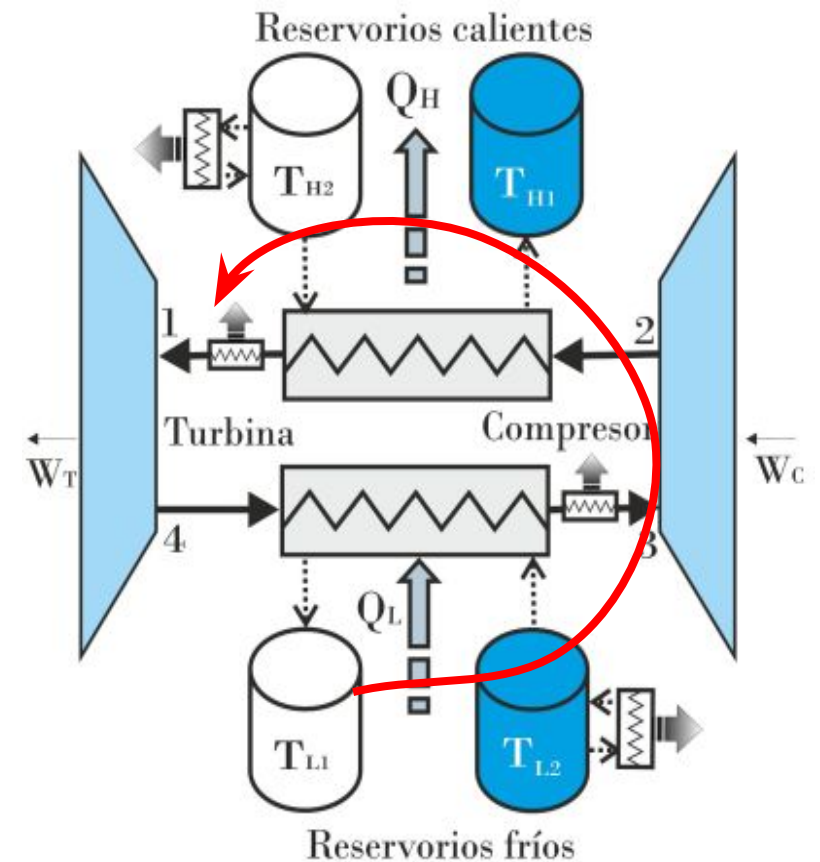
La demanda de energía no está en fase con la generación de energía.



Acumulación de energía con sistema PHES

Carga en modo Bomba de Calor (Brayton)

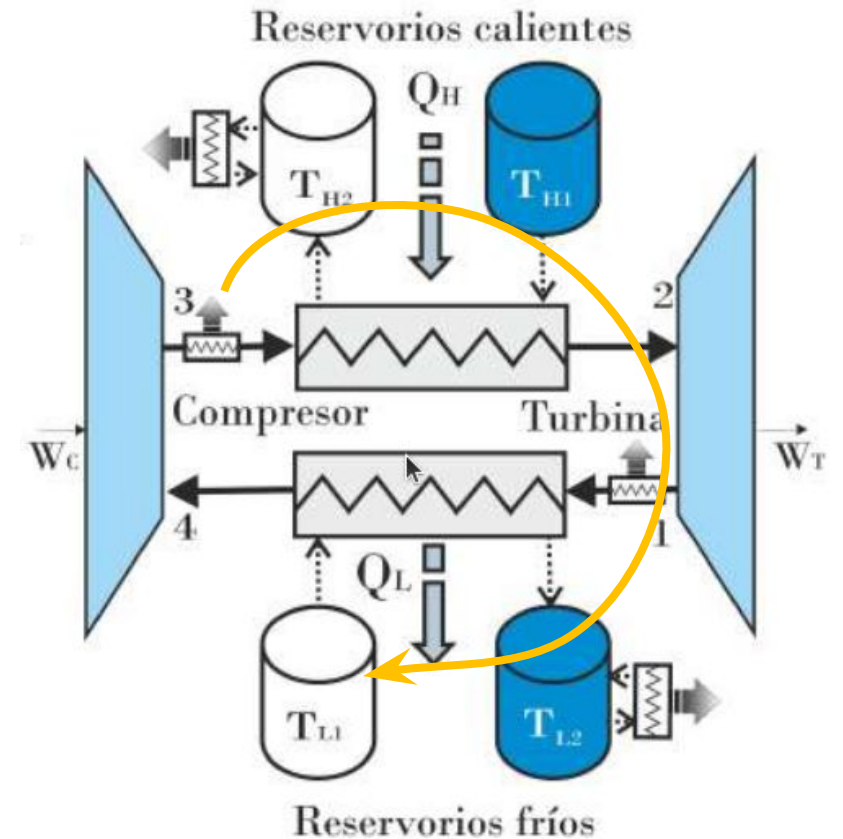
$$COP_B = \frac{Q_{HB}}{W_{nB}} \quad \text{con} \quad W_{nB} = Q_{HB} - Q_{LB}$$



Acumulación de energía con sistema PHES

Generación de Potencia, modo Motor Térmico (Brayton)

$$\eta_P = \frac{W_{nP}}{Q_{HP}} \quad \text{con} \quad W_{nP} = Q_{HP} - Q_{LP}$$



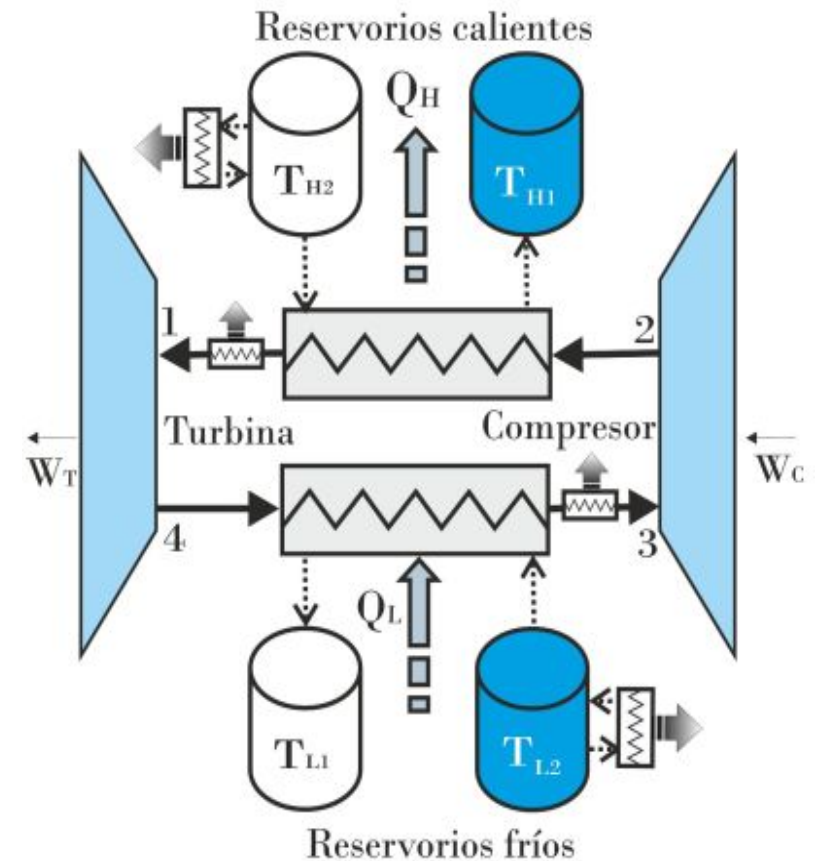
Acumulación de energía con sistema PHES

Generación de Potencia, modo Motor Térmico (Brayton)

$$\eta_P = \frac{W_{nP}}{Q_{HP}} \quad \text{con} \quad W_{nP} = Q_{HP} - Q_{LP}$$

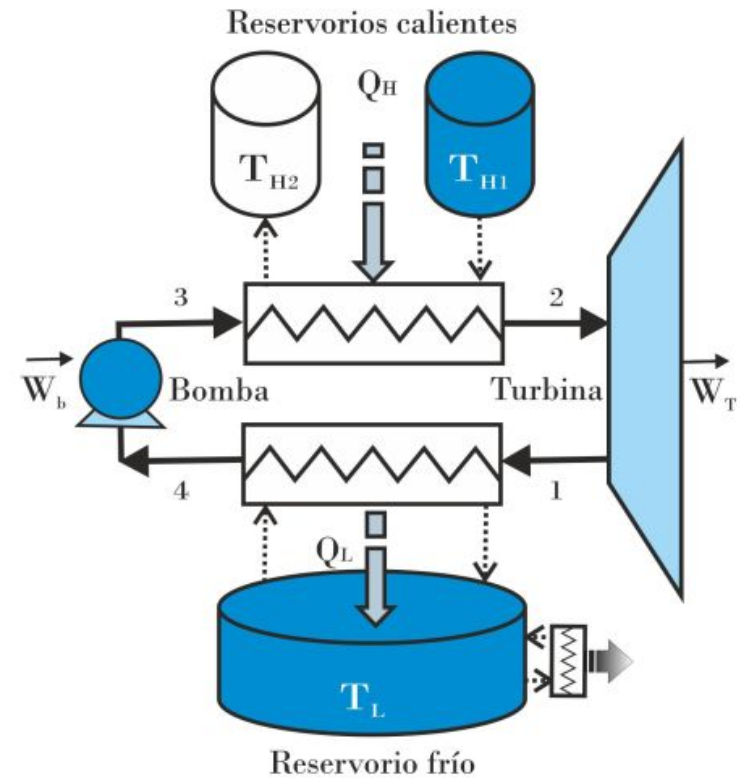
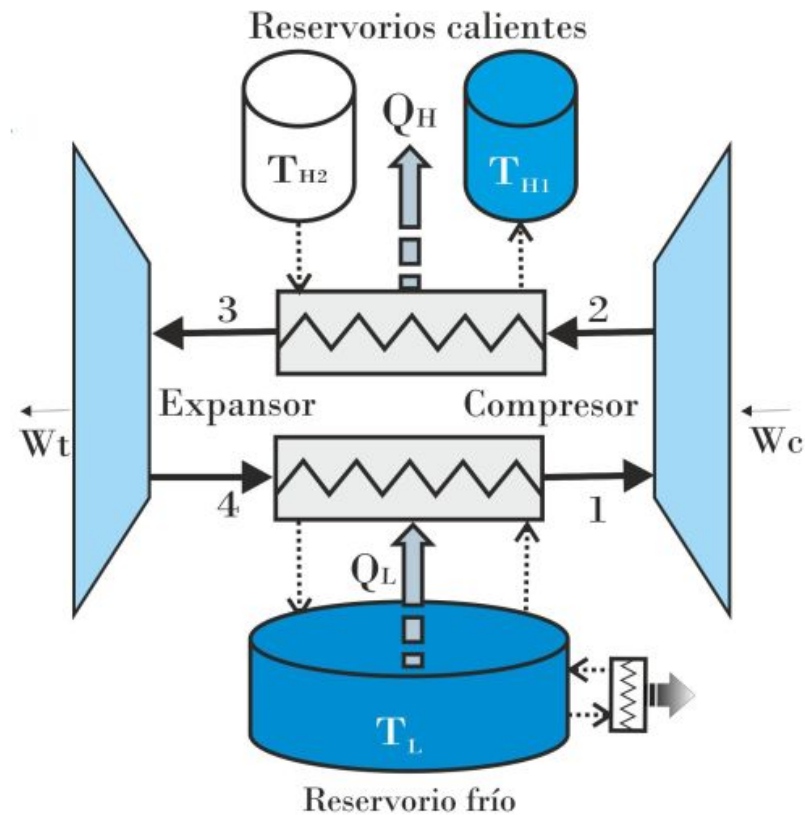
$$COP_B = \frac{Q_{HB}}{W_{nB}} \quad \text{con} \quad W_{nB} = Q_{HB} - Q_{LB}$$

$$RTE = \frac{W_{nP}}{W_{nB}}$$



Acumulación de energía con sistema PHES

Ciclo Rankine transcrito con CO_2



Acumulación de energía con sistema PHES

Eficiencias a corto plazo

RTE ciclo Brayton	~ 40%
RTE Rankine Transcrítico (CO ₂)	~ 70%

Muchas gracias



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY