



Universidad de Salamanca
Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Industrial

Aprovechamiento de energía geotérmica

Norberto Redondo Melchor
Doctor Ingeniero Industrial

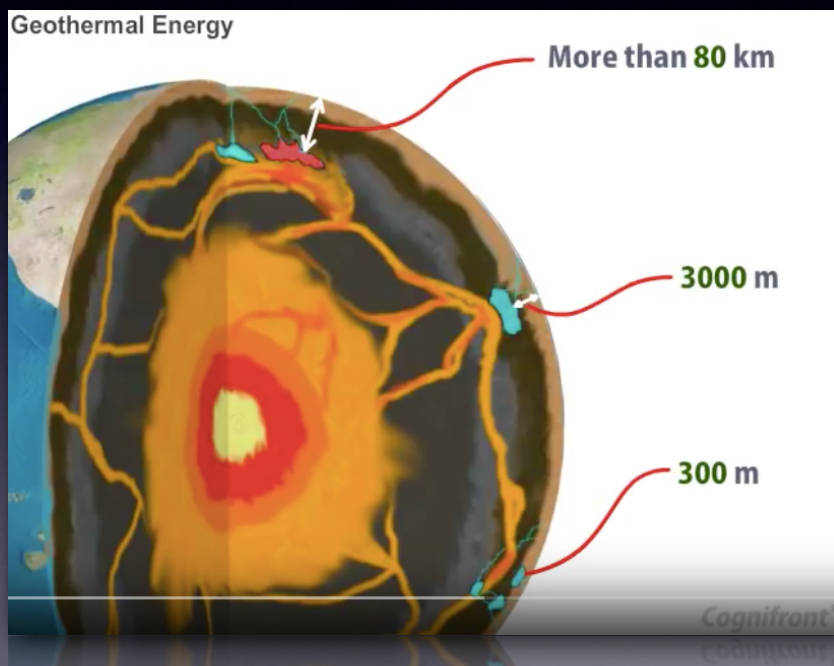
1

Programa

1. Alta y baja temperatura
2. Centrales geotérmicas
3. Climatización residencial
4. Bomba de calor

Alta y baja temperatura

Energía geotérmica de alta temperatura



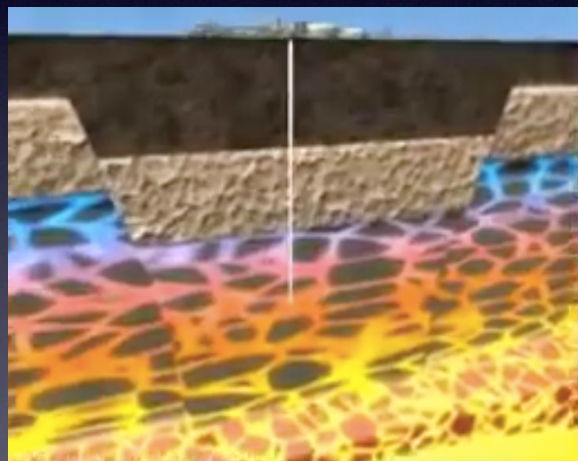
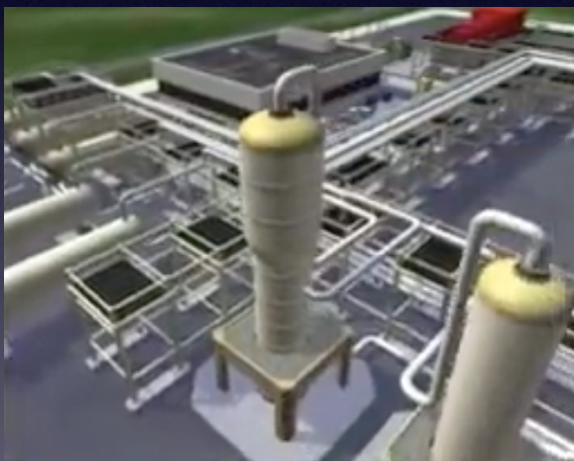
<https://www.youtube.com/watch?v=eyOXmqu4PS8>

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

3

Centrales geotérmicas

Central eléctrica geotérmica de agua presurizada (*flash steam*)



<https://www.youtube.com/watch?v=kjpp2MQffnw>

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

4

Centrales geotérmicas

Central eléctrica geotérmica de agua presurizada (*flash steam*)

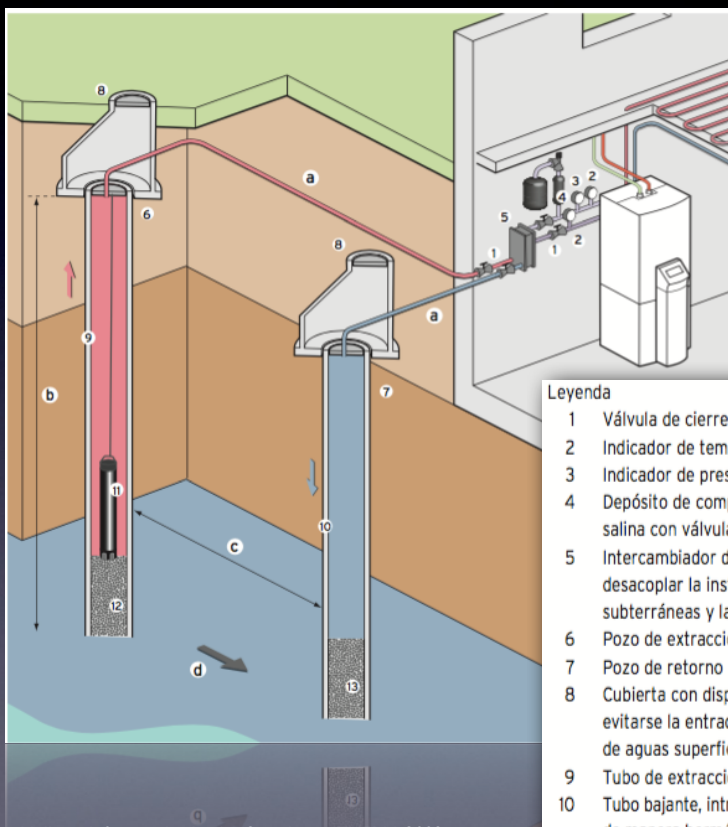


<https://www.youtube.com/watch?v=mCRDf7QxjDk>

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

5

Climatización residencial



Pozo vertical lazo abierto

Legenda

- 1 Válvula de cierre
- 2 Indicador de temperatura
- 3 Indicador de presión
- 4 Depósito de compensación de solución salina con válvula de seguridad
- 5 Intercambiador de calor intermedio para desacoplar la instalación de pozos de aguas subterráneas y la bomba de calor
- 6 Pozo de extracción
- 7 Pozo de retorno
- 8 Cubierta con dispositivo de purga; debe evitarse la entrada de animales pequeños y de aguas superficiales
- 9 Tubo de extracción
- 10 Tubo bajante, introducido en el nivel freático de manera hermética y anticorrosiva

- 11 Bomba sumergible
- 12 Tubo filtrante con engravillado
- 13 Tubo filtrante

Profundidad de tendido y distancias

- a Tendido de los conductos con inclinación hacia los pozos a una profundidad protegida contra las heladas de entre 1,0 y 1,5 m aprox.
- b La profundidad máxima de las aguas subterráneas no debería superar los 15 m
- c Distancia entre los pozos de al menos 15 m
- d Dirección del flujo de las aguas subterráneas desde el pozo de extracción hasta el pozo de retorno

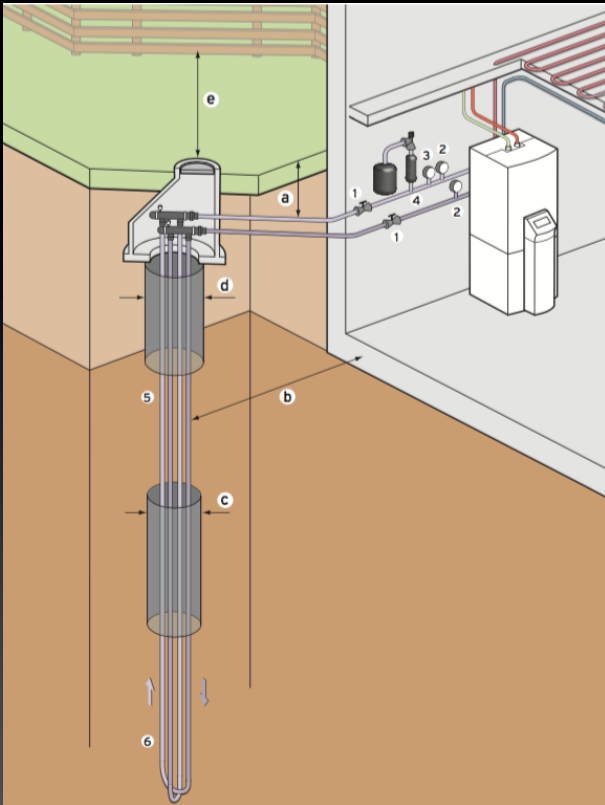
No se muestran en el gráfico los filtros ni las llaves de llenado y vaciado.

Vaillant : Información de planificación geoTHERM, 2009

6

Climatización residencial

Pozo vertical lazo cerrado



Leyenda:

- 1 Válvula de cierre
- 2 Indicador de temperatura
- 3 Indicador de presión
- 4 Depósito de compensación de solución salina con válvula de seguridad
- 5 Sonda de doble tubo en U (2 circuitos por perforación), profundidad de perforación en función de la estructura del suelo según dimensionamiento
- 6 Cabezal de inversión con líneas de colector soldado en fábrica, longitud aprox. 150 cm, diámetro aprox. 10 cm

Profundidad de tendido, distancias mínimas y dimensiones:

- a Ida/retorno con inclinación desde la bomba de calor hasta la sonda geotérmica en lecho de arena a una profundidad de aprox. 1,0 m, sistema de purga del colector en la bomba de calor
- b La distancia mínima a los cimientos del edificio debe ser de 2,0 m
- c Diámetro de perforación aprox. 115 - 220 mm (llenado del espacio hueco con arena de cuarzo, sellante Dämmmer u hormigón)
- d Tubo de revestimiento con material suelto, longitud aprox. 6 - 20 m, diámetro aprox. 170 mm
- e Al menos 3,0 m de distancia a las lindes del terreno

No se muestran en el gráfico los filtros ni las llaves de llenado y vaciado.

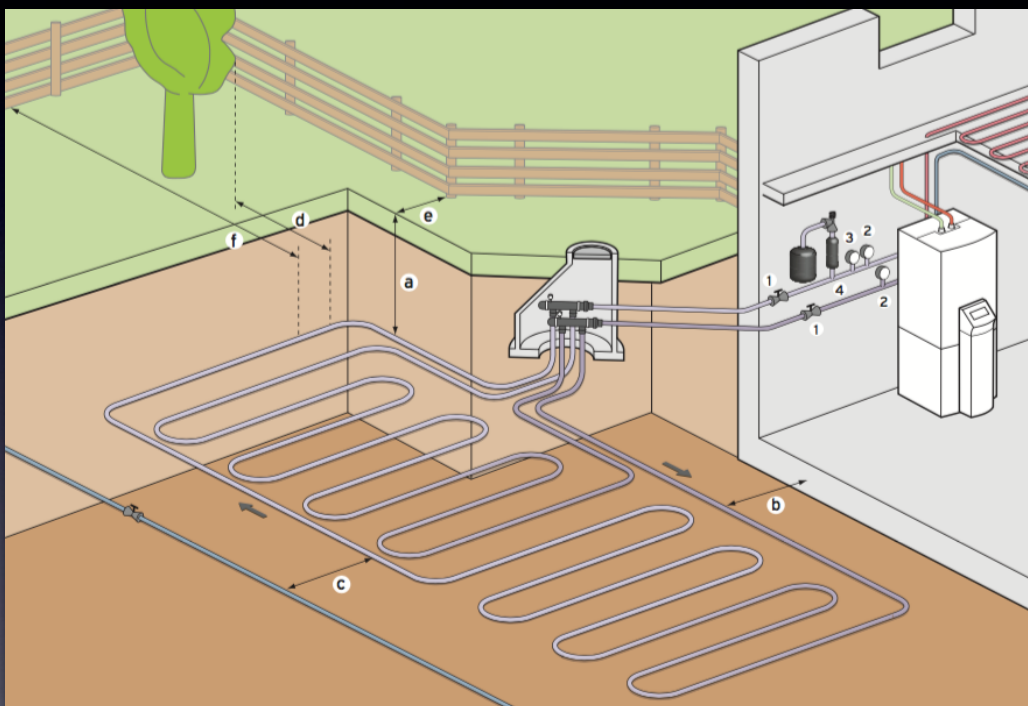
Vaillant : Información de planificación geoTHERM, 2009

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

7

Climatización residencial

Lazo horizontal cerrado



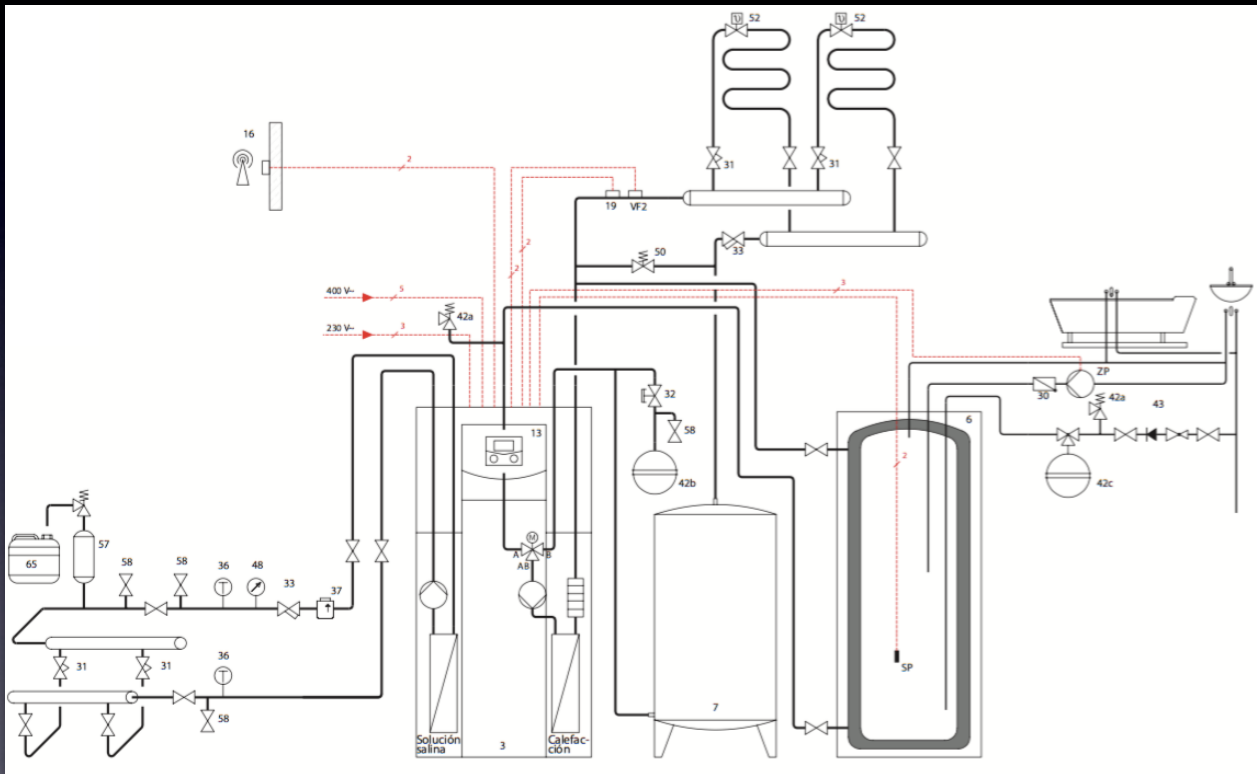
Vaillant : Información de planificación geoTHERM, 2009

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

8

Climatización residencial

Esquema hidráulico y eléctrico



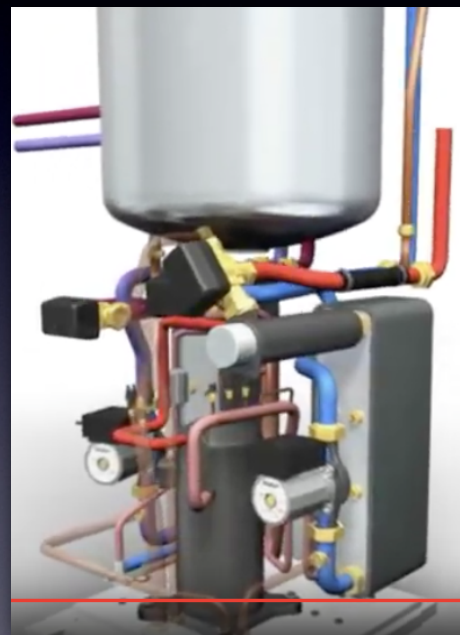
Vaillant : Información de planificación geoTHERM, 2009

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

9

Climatización residencial

Bomba de calor



Intercambiador de placas

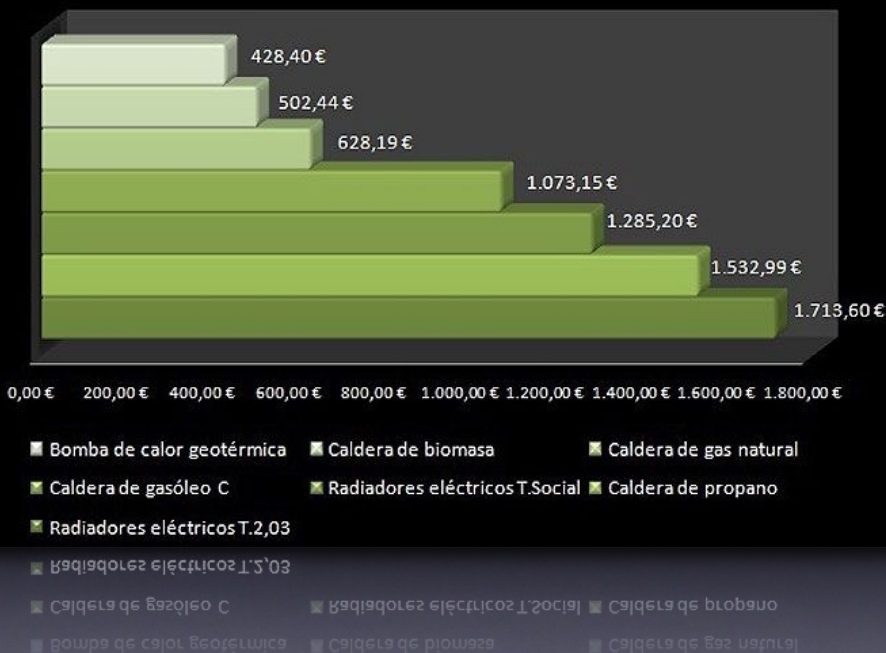
Vaillant : Información de planificación geoTHERM, 2009

© NRM 2018 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

10

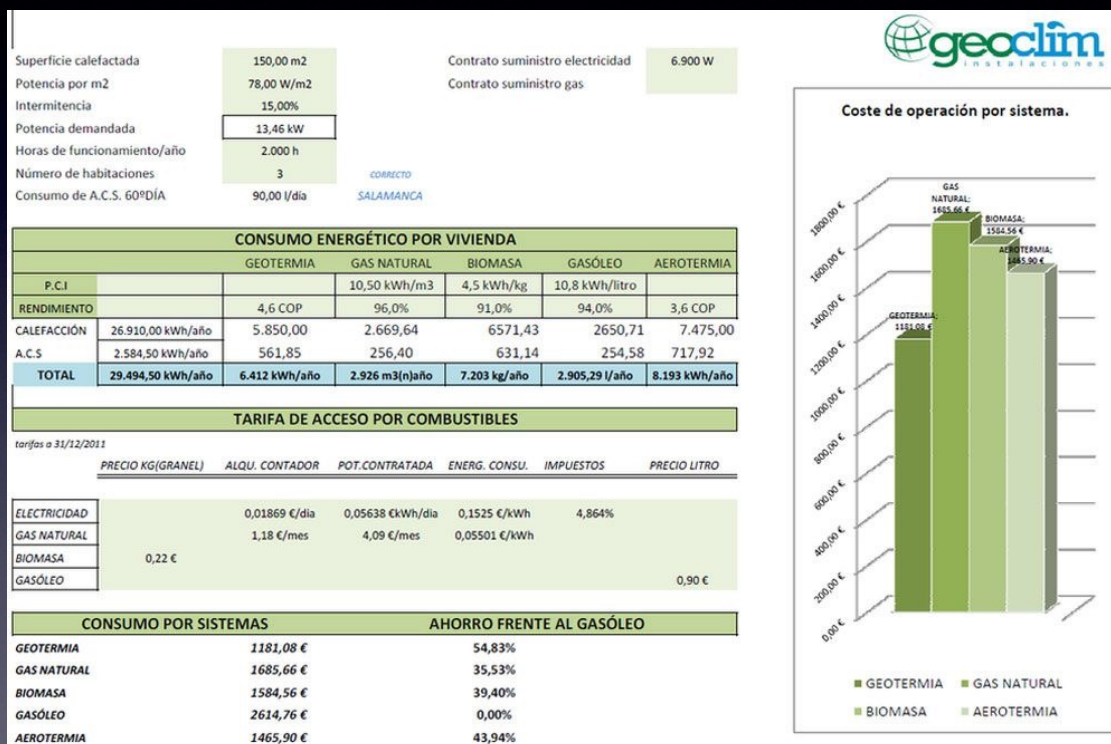
Climatización residencial

Comparación de rendimientos



Climatización residencial

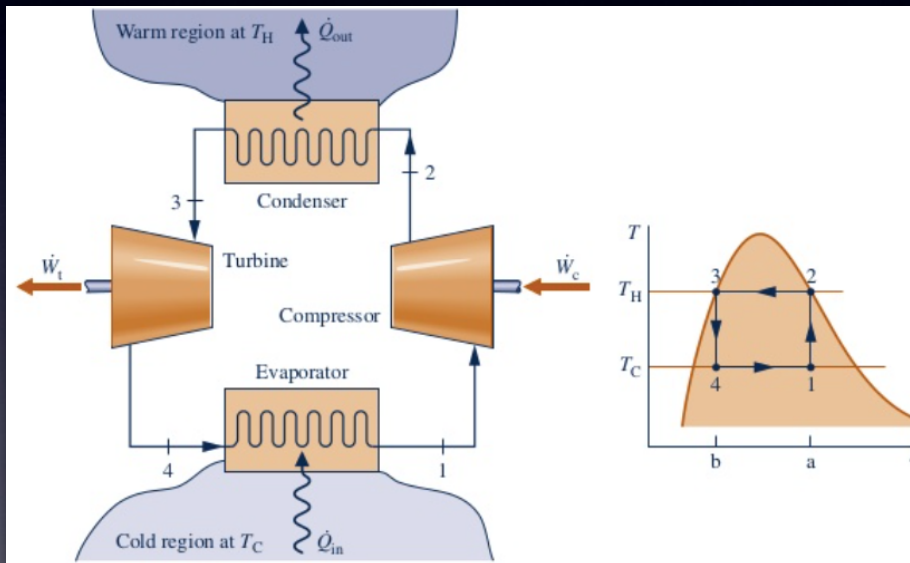
Comparación de rendimientos



Bomba de calor

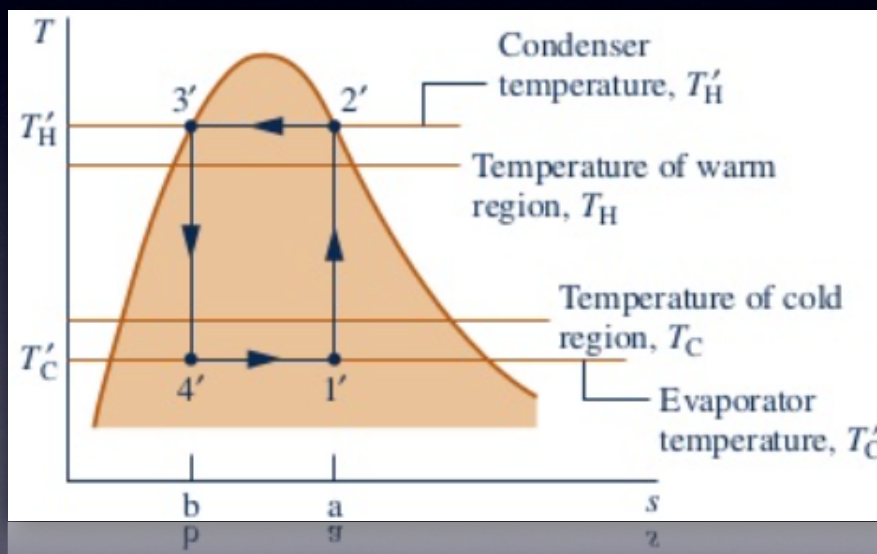
Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

$$\beta_{\max} = \frac{\dot{Q}_{in}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m} - \dot{W}_t/\dot{m}} = \frac{\text{area } 1-a-b-4-1}{\text{area } 1-2-3-4-1} = \frac{T_C(s_a - s_b)}{(T_H - T_C)(s_a - s_b)}$$



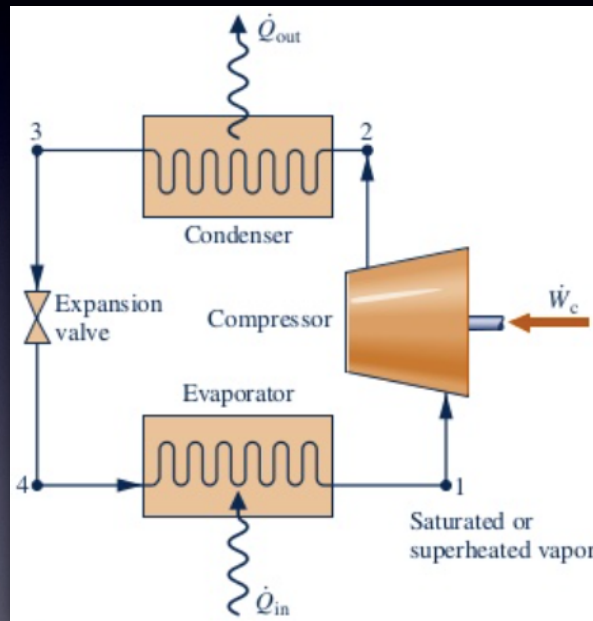
Bomba de calor

Diferencias de temperatura en los intercambiadores de calor



Bomba de calor

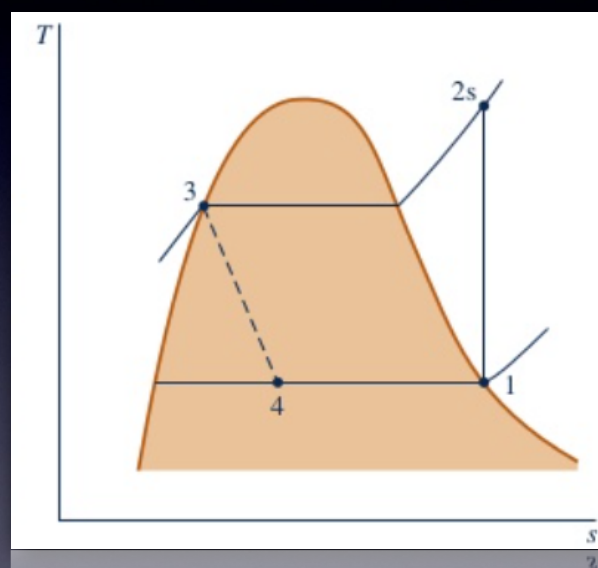
Introducción de la válvula de expansión



El rendimiento de la turbina original es prácticamente insignificante

Bomba de calor

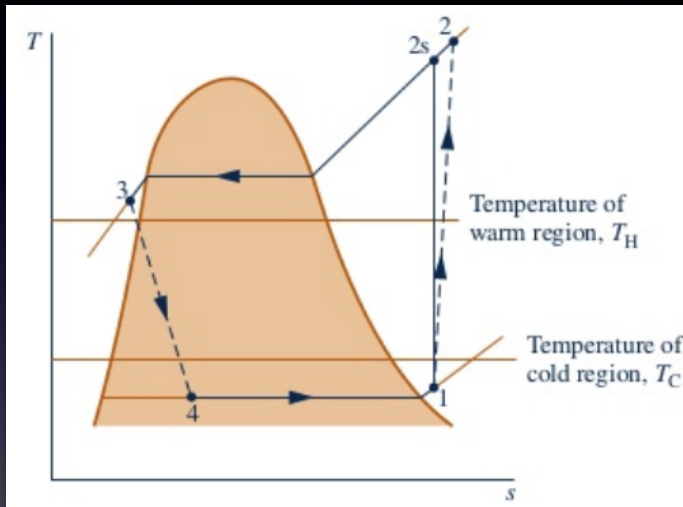
Compresión de vapor saturado



Para evitar la compresión de mezcla vapor-líquido (daña al compresor) se vaporiza completamente la fase líquida

Bomba de calor

Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor

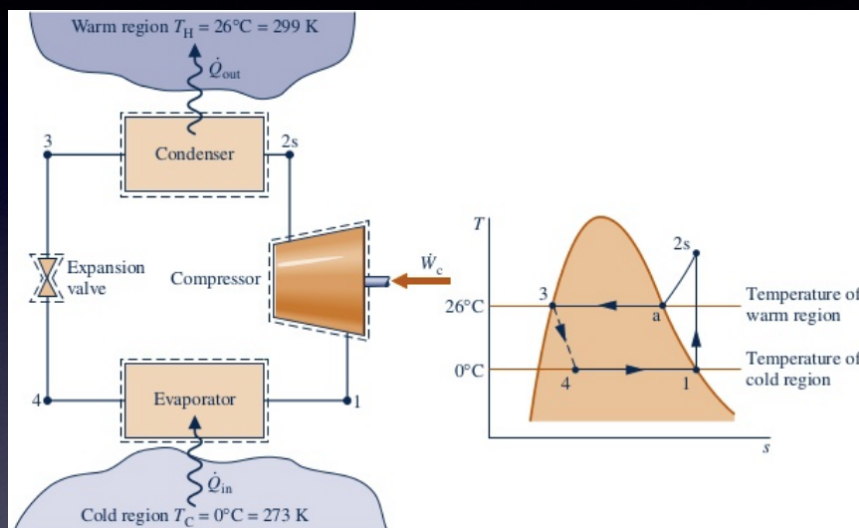


Irreversibilidades por:

- Sobrecalentamiento del vapor (1)
- Ineficiencia del compresor (2)
- Mayor temperatura foco cálido
- Subenfriamiento de la fase líquida (3)
- Ineficiencia válvula de expansión (4)
- Menor temperatura del foco frío

Bomba de calor

Ejemplo: compresión ideal del vapor

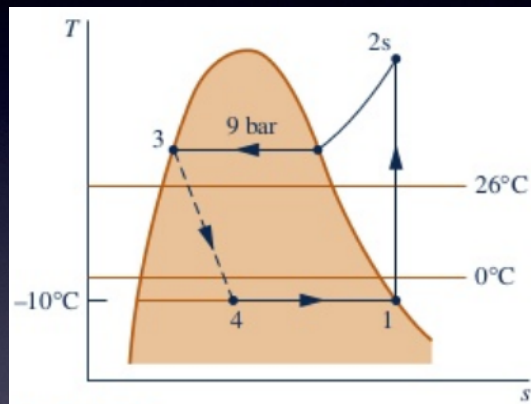


$$\beta_{\max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = 10.5$$

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{W}_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_{2s} - h_1} = \frac{247.23 - 85.75}{264.7 - 247.23} = 9.24$$

Bomba de calor

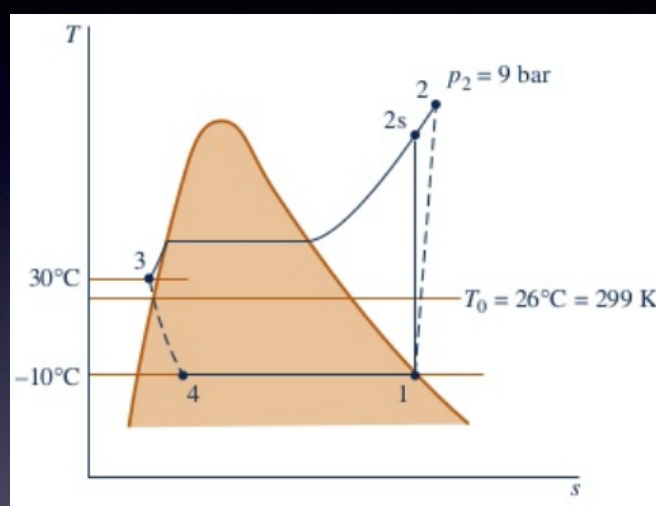
Ejemplo: temperaturas reales de los focos caliente y frío



$$\beta = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{W}_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_{2s} - h_1} = \frac{241.35 - 99.56}{272.39 - 241.35} = 4.57$$

Bomba de calor

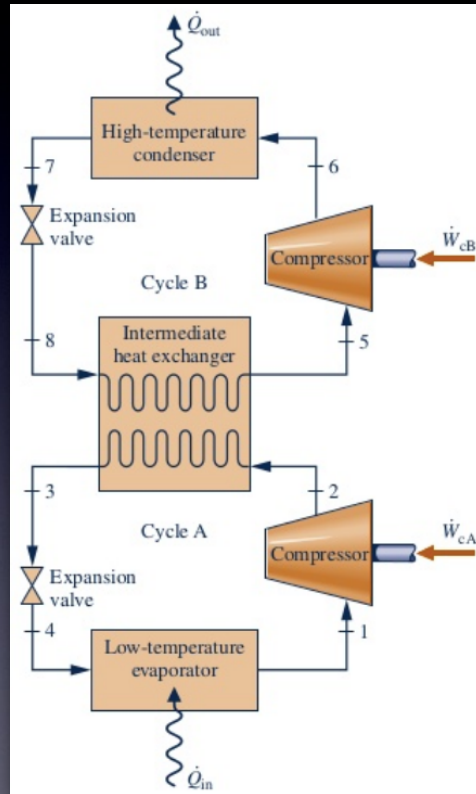
Ejemplo: introducción del resto de irreversibilidades



$$\beta = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} = \frac{(241.35 - 91.49)}{(280.15 - 241.35)} = 3.86$$

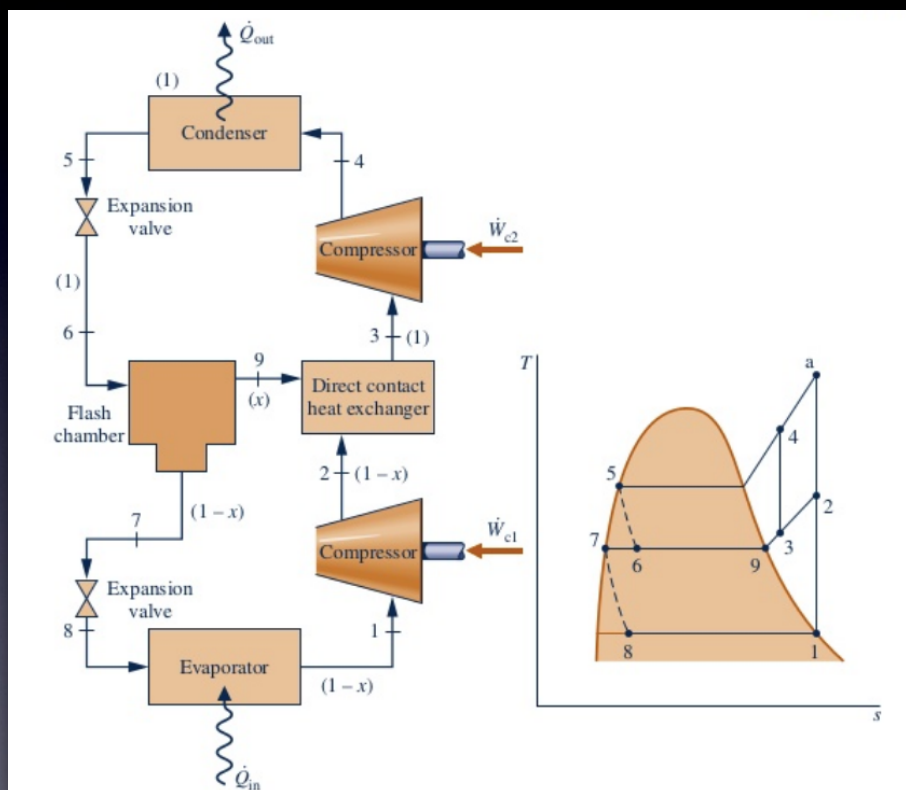
Bomba de calor

Mejoras:
compresión
multi etapa
(compresión
en cascada)



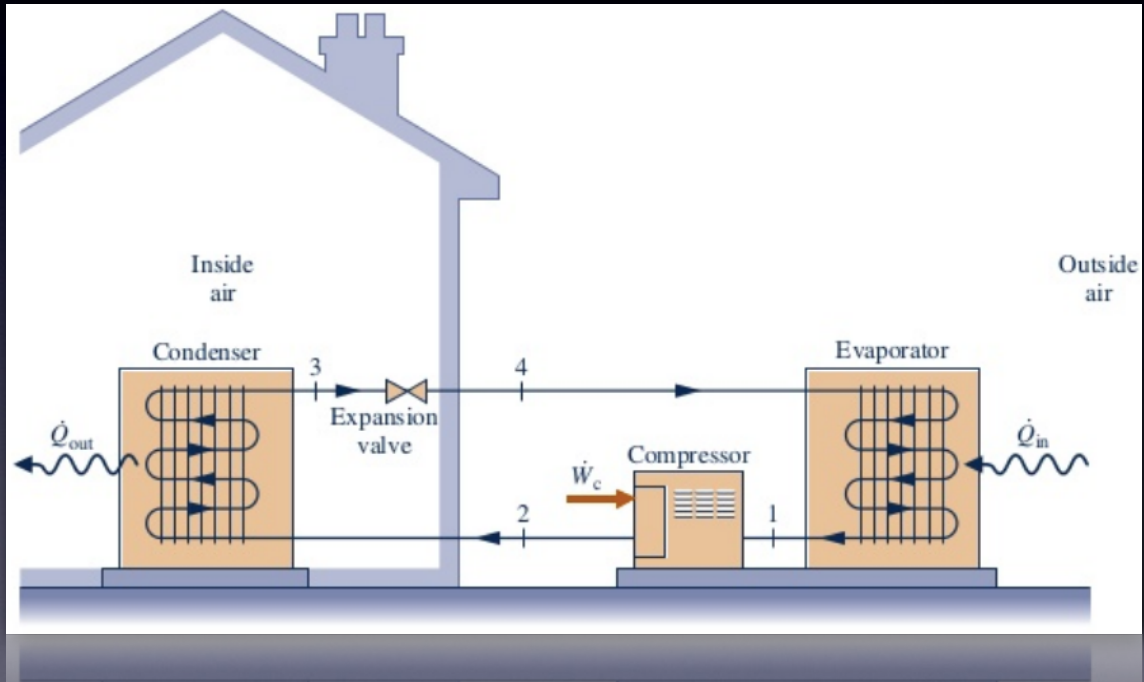
Bomba de calor

Mejoras:
compresión
con
refrigeración
intermedia
(intercooling)



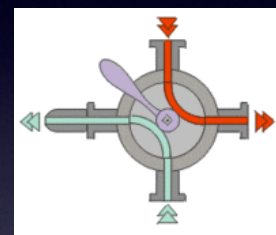
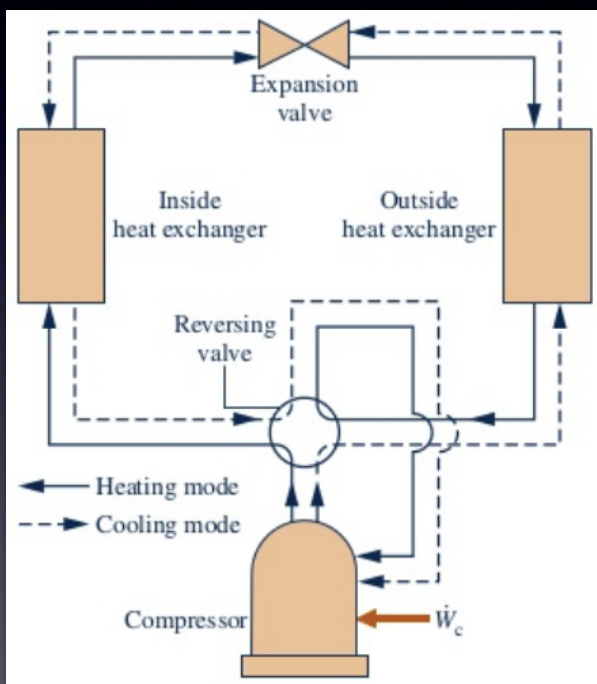
Bomba de calor

Mejoras:
ciclo reversible (*heat pump*)



Bomba de calor

Mejoras:
ciclo reversible (*heat pump*)



Válvula de 4 vías

Programa

1. Alta y baja temperatura
2. Centrales geotérmicas
3. Climatización residencial
4. Bomba de calor **Fin**