

MÁQUINAS DE COMPRESIÓN SIMPLE

BASE TERMODINAMICA

Pag 1

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

FASES DE ESTUDIO

1. Ciclo de Carnot
2. La máquina perfecta de compresión simple
3. La máquina real de compresión simple
4. Elementos integrantes. Primer principio
5. Parámetros de cálculo

Pag 2

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

FASES DE ESTUDIO

1. Ciclo de Carnot
2. La máquina perfecta de compresión simple
3. La máquina real de compresión simple
4. Elementos integrantes. Primer principio
5. Parámetros de cálculo

Pag 3

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

MÁQUINAS DITÉRMICAS Interacción con el exterior

- Si se piensa en una máquina térmica "M" que evoluciona cíclicamente, en régimen permanente, con intercambio de calor con dos fuentes térmicas " F_1 " y " F_2 ", a temperaturas " T_1 " y " T_2 " ($T_2 > T_1$), y aporte externo de energía mecánica, podemos decir que para un ciclo, o para un tiempo " t " en el que se han sucedido " n " ciclos completos, la máquina ha recibido una cantidad " W " de trabajo externo y unas cantidades de calor " Q_1 " y " Q_2 " de las fuentes.

Pag 4

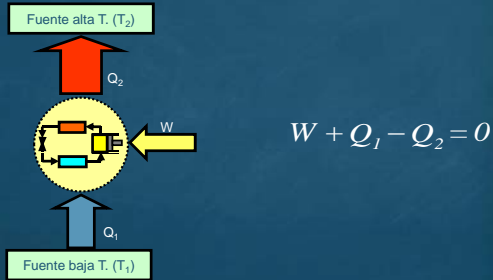
ENRIQUE TORRELLA

1

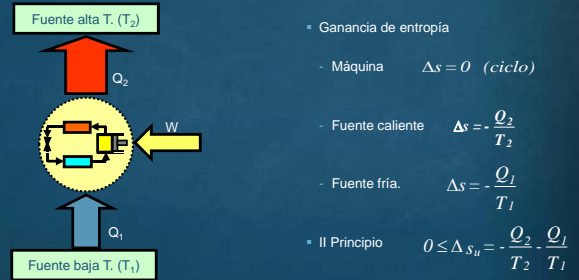
2

3

I Principio. Balance energético



II Principio de la Termodinámica



MÁQUINAS DITÉRMICAS Sentidos de las potencias

- Evidentemente en una máquina de producción de frío se debe cumplir:

$$Q_1 > 0$$

- Combinando los dos principios.

$$T_2 \Delta s_u = W - Q_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1} \geq 0$$

- Siendo necesaria la adición de energía externa, por lo que:

$$W > 0$$

- Se deduce finalmente:

$$Q_2 < 0 \quad |Q_2| > Q_1$$

MÁQUINAS DITÉRMICAS Eficiencia máquina frigorífica

- Partiendo de la ecuación obtenida anteriormente.

$$T_2 \Delta s_u = W - Q_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1} \geq 0$$

- Se obtiene como coeficiente de efecto frigorífico C.O.P., relación entre el efecto útil y la potencia consumida para obtenerlo:

$$COP_{MF} = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \left[1 - \frac{T_2 \Delta s_u}{W} \right]$$

MÁQUINAS DITÉRMICAS

Bomba de calor

- Es ahora " Q_2 " el efecto buscado, conservándose " W " como la energía necesaria para la consecución del ciclo. El término "bomba de calor" se debe a que el efecto útil " Q_2 " se obtiene por "bombeo" del calor extraído de la fuente fría, esta energía, junto a la mecánica absorbida, son las cedidas a la fuente caliente.

MÁQUINAS DITÉRMICAS

Eficiencia como bomba de calor

- De haber eliminado la potencia absorbida de la fuente fría.

$$W = -Q_2 \frac{T_2 - T_1}{T_2} + T_1 \Delta S_u$$

- Se obtiene como coeficiente de efecto frigorífico C.O.P, de utilizar como efecto útil la potencia cedida a la fuente caliente (BOMBA DE CALOR).

$$\begin{aligned} COP_{BC} &= \frac{|Q_2|}{W} = -\frac{Q_2}{W} = \frac{Q_1 + W}{W} = COP_{MF} + 1 = \\ &= \frac{T_2}{T_2 - T_1} \left[1 - \frac{T_1 \Delta S_u}{W} \right] \end{aligned}$$

MÁQUINAS DITÉRMICAS

Comentarios sobre el COP

- Puede observarse que los máximos valores de eficiencia son de " $T_1/(T_2 - T_1)$ " y " $T_2/(T_2 - T_1)$ ", hecho que se produce con funcionamiento de la máquina de manera totalmente reversible, pudiendo concluir que la eficacia disminuirá al aumentar el grado de irreversibilidad de las transformaciones que integran el ciclo.
- Un análisis de la expresión deducida para el máximo COP, obtenible en una máquina frigorífica ditérmica de compresión, permite decir que su valor tomará un valor superior a la unidad siempre que se cumpla:

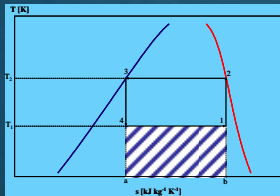
$$T_1 [^\circ\text{C}] + 273.15 > T_2 [^\circ\text{C}] - T_1 [^\circ\text{C}]$$

MÁQUINAS DITÉRMICAS

Ciclo de CARNOT

- El ciclo de Carnot, al estar integrado por un conjunto de transformaciones reversibles, va a presentar el máximo rendimiento posible de una máquina frigorífica evolucionando entre dos temperaturas.

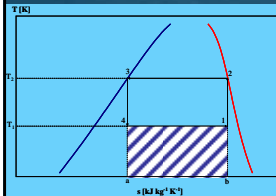
MÁQUINAS DITÉRMICAS Transformaciones ciclo CARNOT



- 1→2: Compresión ideal isoentrópica.
- 2→3: Cesión de calor reversible (isoterma e isobárica).
- 3→4: Expansión ideal isoentrópica.
- 4→1: Absorción de calor reversible (isoterma e isobárica)

Nota.- Saturación en los estados "2" y "3"

MÁQUINAS DITÉRMICAS Potencias según CARNOT



$$Q_2 = T_2 (s_2 - s_3)$$

$$Q_1 = T_1 (s_1 - s_4)$$

$$W = Q_2 - Q_1 = (s_2 - s_3)(T_2 - T_1)$$

MÁQUINAS DITÉRMICAS Eficiencia ciclo CARNOT

- Máximos valores posibles trabajando entre los mismos valores de temperatura (dado que el conjunto de transformaciones se producen de forma reversible).

$$COP_{MF} (Carnot) = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

$$COP_{BC} (Carnot) = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

MÁQUINAS DITÉRMICAS Conclusiones al ciclo CARNOT

- Las expresiones del COP, derivadas del análisis del ciclo de Carnot, coinciden con los máximos valores posibles, válidas para cualquier máquina térmica que intercambia calor con dos fuentes a distinta temperatura.
- Como ya se ha indicado, las transformaciones que componen el ciclo de Carnot son reversibles, por tanto ideales e irrealizables en la práctica, no obstante el cálculo del COP correspondiente a este ciclo nos indicará, por comparación con el encontrado en una instalación real, lo alejados que nos encontramos de las condiciones óptimas.

FASES DE ESTUDIO

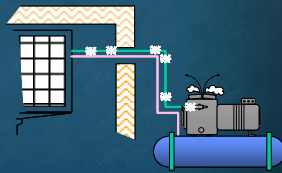
1. Ciclo de Carnot
2. La máquina perfecta de compresión simple
3. La máquina real de compresión simple
4. Elementos integrantes. Primer principio
5. Parámetros de cálculo

MÁQUINA PERFECTA

- La imposibilidad de realización de una máquina que describa el ciclo de Carnot conlleva una serie de modificaciones con respecto a éste. Un primer paso es la definición del llamado ciclo de una máquina perfecta

MÁQUINA PERFECTA Diferencias con el ciclo de Carnot

- La compresión permanece ideal (isoentrópica), pero su inicio se produce en forma de vapor saturado seco, para evitar las entradas de líquido a compresor.
- La absorción y cesión de potencia térmica permanecen, como en el ciclo de Carnot, reversibles.
- La expansión tiene lugar en un dispositivo en el que el fluido experimenta una transformación "isoentálpica", y por tanto irreversible.
- Esta última transformación elimina la característica de ciclo reversible al de la máquina perfecta.



MÁQUINA PERFECTA Diagrama T-s

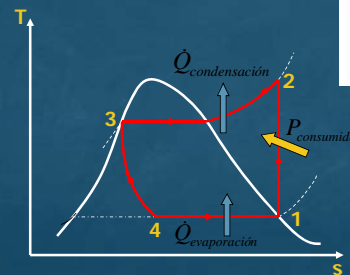
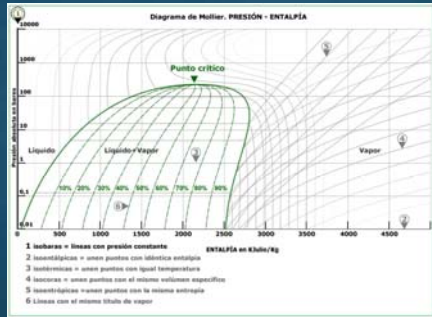
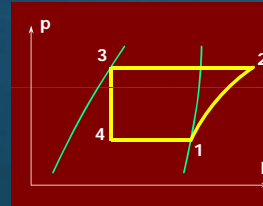


DIAGRAMA p-h



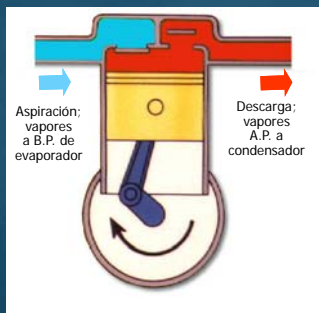
MÁQUINA PERFECTA Diagrama p-h



- 1 → 2; Compresión ideal isoentrópica.
- 2 → 3; Cesión de calor reversible (isobárica).
- 3 → 4; Expansión no ideal isoentrópica.
- 4 → 1; Absorción de calor reversible (isoterma e isobárica)

Nota.- Saturación en los estados "1" y "3"

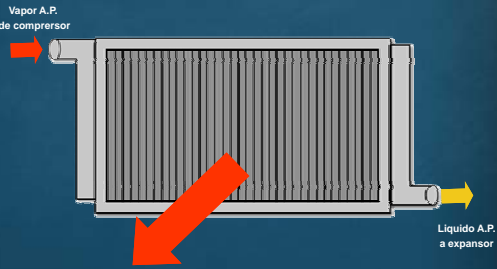
COMPRESION



MÁQUINA PERFECTA Compresión

- Compresión isoentrópica, por tanto reversible, no obstante a diferencia del ciclo de Carnot, va a tener lugar en la zona de vapor recalentado, lo cual se debe, como posteriormente se comentará, a la búsqueda de un aumento en la capacidad de producción de frío y a evitar los golpes de líquido. El equipo destinado a efectuar esta transformación es el compresor, el cual realiza dos importantes funciones, por un lado la absorción de los vapores de baja presión, en estado "1" (vapor saturado seco) y por otro la descarga posterior de éstos a una presión superior, tal que puedan ser condensados con la ayuda de un medio exterior. Además, aseguran la circulación del fluido a través de todos los órganos de la instalación.

CONDENSACION



Pag 25 ENRIQUE TORRELLA

1 2 3

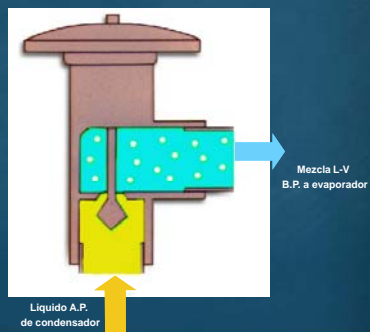
MÁQUINA PERFECTA Condensación

- Los vapores suministrados por el compresor son condensados de manera reversible, lo cual precisa que la diferencia de temperaturas, entre el fluido circulante por la instalación y el agente exterior de condensación, sea de un infinitésimo. El equipo previsto para este fin es un intercambiador de calor llamado "condensador" que, en razón de la diferencia de temperaturas definida, debe poseer una superficie de transferencia infinita. Este cambiador de calor, por hipótesis, no debe introducir pérdidas de carga en el circuito refrigerante.

Pag 26 ENRIQUE TORRELLA

1 2 3

EXPANSION



Pag 27 ENRIQUE TORRELLA

1 2 3

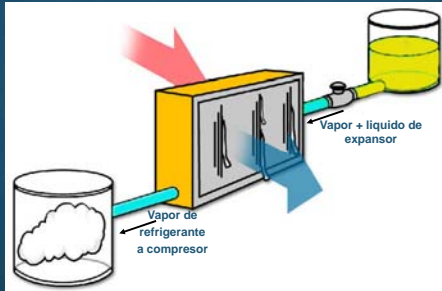
MÁQUINA PERFECTA Expansión

- Se dispone de un dispositivo de expansión, en la que se produce, sin intercambio de energía mecánica o calorífica (isoentálpica), el paso de la alta a la baja presión. Esta transformación es de carácter irreversible, en contraste con la que se producía en el ciclo de Carnot. La utilización de este elemento, en lugar de un expansor isoentrópico que produjese un proceso reversible, conduce a una pérdida de energía mecánica y a un descenso en la eficacia. A pesar del beneficio que, desde el punto de vista energético, supone la utilización del expansor isoentrópico, éste no es usado en la práctica por su complicado mantenimiento y la dificultad de aprovechamiento del trabajo que desarrolla, en su lugar se utiliza el dispositivo de expansión isoentálpico cuyas virtudes primordiales son simplicidad y fiabilidad.

Pag 28 ENRIQUE TORRELLA

1 2 3

EVAPORACION. EFECTO UTIL



Pag 29 ENRIQUE TORRELLA



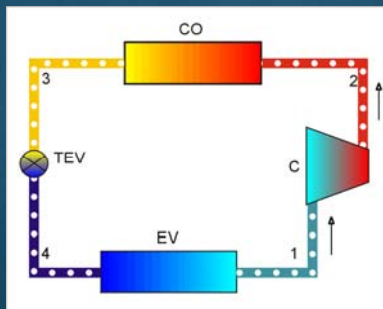
MÁQUINA PERFECTA Evaporación

- La disposición de un segundo intercambiador de calor, en el que por adición de calor de la fuente fría se consigue la vaporización a baja temperatura del porcentaje de líquido en condiciones "4". Este equipo se denomina "evaporador" y su funcionamiento es similar al del condensador, es decir, el proceso es reversible y sin pérdidas de carga, lo que va a implicar también ahora una superficie infinita. La salida de este evaporador produce un vapor en estado de saturación, apto para ser absorbido por el compresor.

Pag 30 ENRIQUE TORRELLA



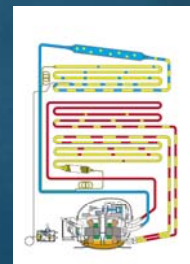
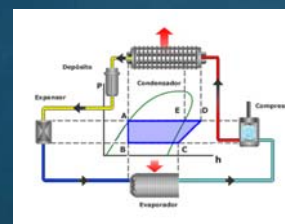
MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Elementos básicos



Pag 31 ENRIQUE TORRELLA



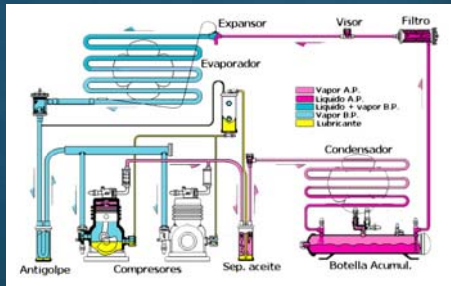
MÁQUINAS DE COMPRESIÓN



Pag 32 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN



Pag 33

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

FASES DE ESTUDIO

1. Ciclo de Carnot
2. La máquina perfecta de compresión simple
3. La máquina real de compresión simple
4. Elementos integrantes. Primer principio
5. Parámetros de cálculo

Pag 34

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

MÁQUINA REAL

▪ Se ha visto en el estudio de una máquina perfecta una serie de circunstancias que van a impedir su construcción real, por lo cual, en la práctica, no sólo hay que alejarse del ciclo reversible de Carnot sino incluso del de la máquina de compresión perfecta.

Pag 35

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

MÁQUINA REAL

Diferencias con la perfecta

- La compresión no es ideal (isoentrópica) en los equipos reales, por lo que la transformación tendrá lugar con aumento de entropía.
- La absorción y cesión de potencia térmica no pueden realizarse de manera reversible, pues esto supondría trabajar con una diferencia de temperaturas de un infinitésimo entre el fluido frigorígeno y el fluido externo, por lo que se necesitarían superficies infinitas para lograrlo.
- En la práctica no sólo hay que alejarse de la máquina de Carnot, sino incluso de la máquina perfecta.

Pag 36

ENRIQUE TORRELLA

1

2

3

Transformaciones irreversibles

- Para la máquina perfecta.

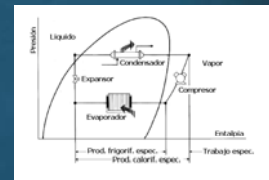
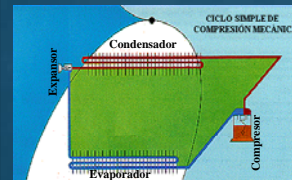
$$\Delta T_1 = 0 \quad (p_K = p_M)$$

$$\Delta T_2 = 0 \quad (p_m = p_o)$$

- Para la máquina real. Incrementos de temperatura finitos.

$$t_r = \frac{p_K}{p_o} > t \quad t = \frac{p_M}{p_m}$$

CICLO DE COMPRESION



LA MÁQUINA REAL DE COMPRESIÓN

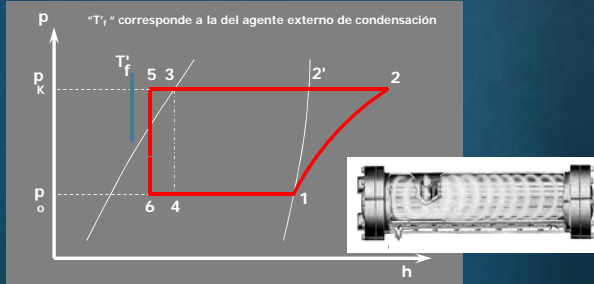
Otras desviaciones

MÁQUINA REAL

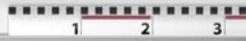
Desviaciones con el ciclo básico

- Subenfriamiento del líquido en salida del condensador.
- Recalentamiento del vapor antes de compresión.
- Presencia del dispositivo (intercambiador intermedio) de subenfriamiento de líquido y recalentamiento del vapor.
- Pérdidas de carga.
- Efectos debidos a compresor.

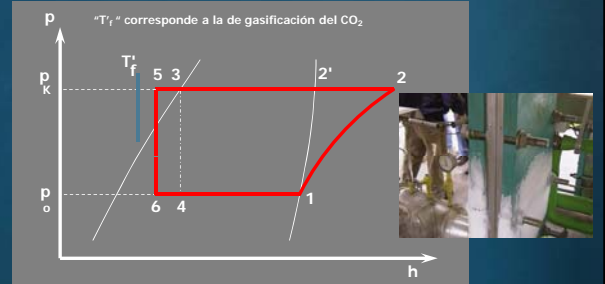
MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Subenfriamiento de líquido.



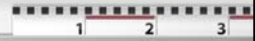
Pag 45 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN. Fábrica cerveza Subenfriamiento de líquido. Agente externo CO₂



Pag 46 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Subenfriamiento de líquido.

- El subenfriamiento del líquido previo al dispositivo de laminación, producido bien en el propio condensador, bien en dispositivos ideados a tal efecto, es un proceso muy corriente, ya que el condensador suele ser un intercambiador próximo al tipo "contracorriente", en el que la entrada del agente condensante intercambia calor con el último tramo del condensador.
- La entrada de líquido en la válvula de expansión se efectúa ahora en el estado del punto "5", siendo el subenfriamiento efectuado desde "3" a "5". El límite teórico, al cual puede llegar la temperatura del fluido refrigerante, es la temperatura de entrada del fluido de condensación, esto es en la práctica imposible, ya que implica un comportamiento ideal del dispositivo intercambiador, por lo que siempre existirá una diferencia mayor que cero entre las temperaturas de "5" y la de entrada del agente condensante, esto es:

$$T_5 - T_{f'} > 0$$

Pag 47 ENRIQUE TORRELLA



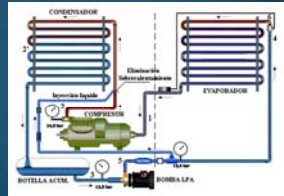
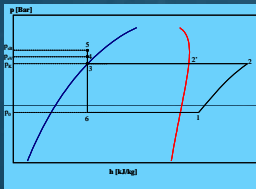
Subenfriamiento de líquido. La amplificación de presión de líquido (LPA)

- La tecnología LPA modifica un sistema de compresión introduciendo una bomba de circulación a la salida del dispositivo de condensación, de tal manera que aumenta la presión en la entrada a la válvula de expansión, consiguiendo de esta manera un subenfriamiento del líquido a la entrada del dispositivo.
- Mediante el incremento de presión del refrigerante líquido, aumenta la temperatura de saturación asociada debido a dicho incremento, mientras que la temperatura real del líquido no varía apreciablemente. El líquido, por tanto, está subenfriado y no se evapora por influencia de las pérdidas de presión en la tubería de líquido.

Pag 48 ENRIQUE TORRELLA



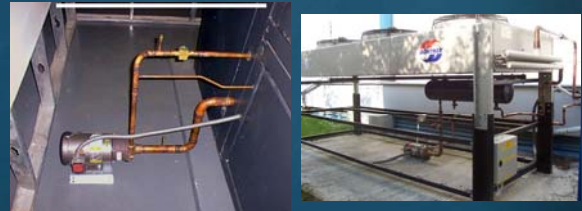
Subenfriamiento de líquido. La amplificación de presión de líquido (LPA)



Pag 49 ENRIQUE TORRELLA



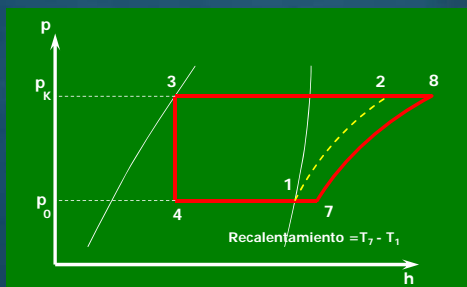
Subenfriamiento de líquido. La amplificación de presión de líquido (LPA)



Pag 50 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Recalentamiento del vapor



Pag 51 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Recalentamiento del vapor

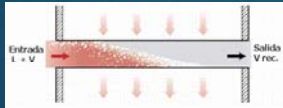
- El recalentamiento de vapor, desde el estado de saturación hasta un punto en la zona de vapor recalentado, puede tener lugar:
 - En el mismo intercambiador (evaporadores secos), en los cuales todo el líquido pasa a vapor y sufre además un recalentamiento posterior antes de su salida del equipo. Este recalentamiento se llama útil pues se produce por adición de calor desde la carga almacenada.
 - En el trayecto de aspiración del compresor, desde la salida del intercambiador hasta la entrada del compresor. Si el recalentamiento se efectúa en la cámara sigue siendo un efecto útil, pero si tiene lugar fuera de ella se denomina "menos útil", dado que este proceso aún no absorbiendo calor de la carga puede deberse a un enfriamiento de órganos ajenos, tales como devanado de motores eléctricos, enfriamiento de muelles de carga, etc.

Pag 52 ENRIQUE TORRELLA

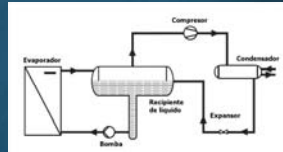


MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Recalentamiento del vapor. Tipos evaporadores



Evaporador seco



Evaporador inundado

Pag 53

ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Recalentamiento del vapor

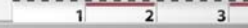
En caso de recalentamiento de vapor, la entrada al compresor se produce en estado "7". Este recalentamiento de vapor asegura la ausencia de líquido en la entrada del compresor y por tanto la imposibilidad de golpes de líquido, no obstante, al aumentar la temperatura antes de la compresión, será mayor la de los vapores de escape al finalizar ésta, aumento que será progresivo debido al incremento de la inclinación de las isoentrópicas a medida que nos adentramos en la zona de vapor recalentado, este efecto produce, en algunos refrigerantes, unas temperaturas finales de compresión elevadas, y por tanto peligrosas para la vida del equipo. En efecto, si consideramos comportamiento perfecto para el fluido refrigerante y transformación adiabática:

$$\frac{T_8}{T_7} = \left[\frac{P_K}{P_0} \right]^{\left(\frac{n-1}{n} \right)} \quad n = \frac{C_p}{C_v}$$

por lo que la temperatura final será mayor cuanto mayor sea la tasa de compresión y la relación de calores específicos. Evidentemente, todo recalentamiento se acompaña de un aumento de volumen específico, por lo que si el dispositivo de compresión es del tipo volumétrico, el caudal másico circulante disminuye con este aumento de temperatura en el vapor.

Pag 54

ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Recalentamiento del vapor. Alta temp. descarga



Pag 55

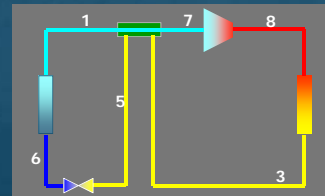
ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Sub. y recalentamiento conjunto

El recalentamiento de vapor y el subenfriamiento de líquido puede ser conseguidos simultáneamente mediante un intercambiador intermedio

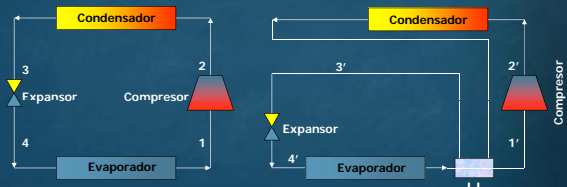


Pag 56

ENRIQUE TORRELLA



SITUACION DEL INTERCAMBIADOR



Pag 57 ENRIQUE TORRELLA



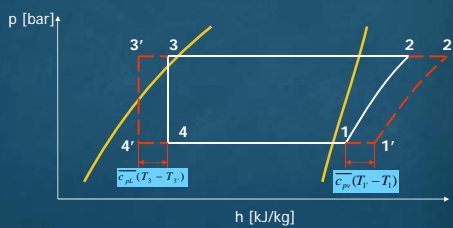
SITUACION DEL INTERCAMBIADOR



Pag 58 ENRIQUE TORRELLA



CICLOS CON Y SIN INTERCAMBIADOR



Pag 59 ENRIQUE TORRELLA



CARACTERISTICAS BASICAS

- Aspectos positivos:
 - Aumento de la producción frigorífica específica en evaporador.
 - Subenfriamiento del líquido, previo a expansor, lo que asegura únicamente fase líquida a la entrada del dispositivo.
 - Seguridad de únicamente fase vapor en aspiración a compresor.
- Aspectos negativos:
 - Aumento del volumen específico en aspiración, con el descenso consiguiente del caudal másico movido por compresor.
 - Aumento de la temperatura final en descarga de compresor.
 - Aumento de las pérdidas de carga tanto en la línea de líquido como en la de aspiración.
 - Posible trampa para el retorno de lubricante.

Pag 60 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Sub. y recalentamiento conjunto

- Balance energético en el intercambiador intermedio.

$$c_{pv}(T_7 - T_1) = c_{pL}(T_3 - T_5)$$

- en la que "cpv" y "cpL" son los calores específicos medios de las fases vapor y líquido, y dado que:

$$c_{pv} < c_{pL}$$

- el salto de temperaturas en la fase vapor supera la que se produce en la fase líquida.

CRITERIOS TEORICOS AUMENTO DEL COP

- APREA

$$(h_i - h_i) > (h_i - h_i) \left[\frac{T_v}{T_1} - 1 \right]$$

- DOMANSKY

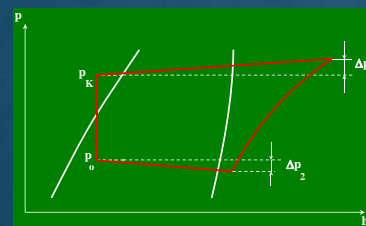
$$\frac{1}{\frac{\lambda_{T_0}}{c_{pv}} - (T_K - T_0) \frac{c_{pL}}{c_{pv}}} > \frac{v_v - v_1}{v_1 (T_1 - T_1)}$$

MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Pérdidas de carga

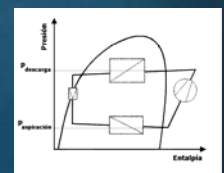
- En la máquina real, el paso de fluido refrigerante a través de los distintos componentes se acompaña de unas pérdidas de carga, las cuales van a depender:

- Del tipo y dimensiones de los intercambiadores elegidos como condensador y evaporador.
- De las dimensiones (longitud y diámetro) de las tuberías que interconectan los distintos componentes, así como de la presencia de singularidades.
- De las propiedades físicas del refrigerante

MÁQUINAS DE COMPRESIÓN Pérdidas de carga

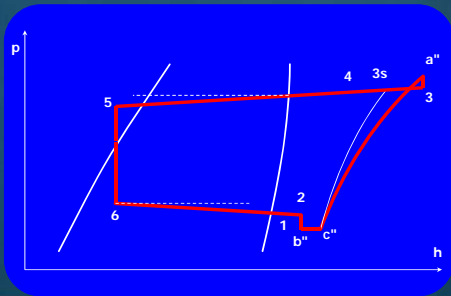


$$t = \frac{p_K + \Delta p_1}{p_0 - \Delta p_2}$$



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Esquema total del ciclo real



Pag 65 ENRIQUE TORRELLA



FASES DE ESTUDIO

1. Ciclo de Carnot
2. La máquina perfecta de compresión simple
3. La máquina real de compresión simple
4. Elementos integrantes. Primer principio
5. Parámetros de cálculo

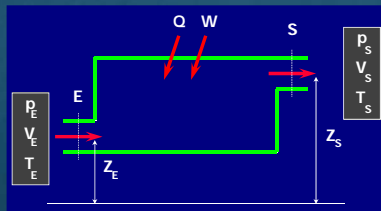
Pag 66 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Elemento genérico.

▪ Cada uno de los equipos, en los que se producen las transformaciones que componen un ciclo, puede ser considerado como un sistema abierto con una entrada y su correspondiente salida.



Pag 67 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Balance en elemento genérico.

▪ El sistema recibe una energía mecánica "W" y una calorífica "Q", ambas del exterior, por lo que la ecuación de la energía en régimen permanente viene dada por:

$$u_E + \frac{v_E^2}{2} + g z_E + p_E V_E + Q + W = u_S + \frac{v_S^2}{2} + g z_S + p_S V_S$$

▪ Energías; u = interna; $v^2/2$ = cinética; g.z = potencial; p.V = de desplazamiento.

▪ Despreciando las diferencias de energías cinética y potencial

$$h(\text{entalpía}) = u + p V$$

$$h_E + Q + W \approx h_S$$

Pag 68 ENRIQUE TORRELLA



MÁQUINAS DE COMPRESIÓN

Aplicación del balance energético

- Intercambiadores de calor

$$Q = h_S - h_E$$

- Compresores adiabáticos

$$W = h_S - h_E$$

- Válvulas de expansión

$$h_E = h_S$$

FASES DE ESTUDIO

- Ciclo de Carnot
- La máquina perfecta de compresión simple
- La máquina real de compresión simple
- Elementos integrantes. Primer principio
- Parámetros de cálculo

