

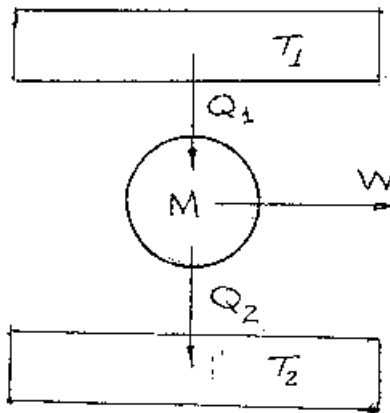
CICLOS DE REFRIGERACIÓN.

CICLO DE CARNOT

MÁQUINA DE CARNOT.

El investigador francés Sadi Carnot presentó en 1824 una memoria con los resultados de sus estudios sobre el rendimiento termodinámico de las máquinas térmicas. Para ello, estudió el esquema mostrado en la figura, donde M representa a la máquina ideal de Carnot que funciona tomando Q_1 Cal de la fuente caliente y cediendo Q_2 Cal a la fuente fría para producir el trabajo W .

La necesidad de que una máquina térmica cuente con dos fuentes a temperaturas diferentes, para poder funcionar cíclicamente, está impuesta por el segundo principio de la termodinámica, enunciado de esa forma por el mismo Carnot.



Por el primer principio de la termodinámica debe cumplirse que :

$$Q_1 = Q_2 + W \implies W = Q_1 - Q_2$$

El rendimiento térmico (η) de cualquier máquina está dado por :

$$\eta = \frac{\text{Trabajo producido}}{\text{Calor absorbido}}$$

De acuerdo con el esquema de la figura :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Carnot demostró que el rendimiento térmico de su máquina que funciona en condiciones ideales, está dado por :

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{Válido sólo para la máquina de Carnot})$$

Donde :

η_c = rendimiento térmico de la máquina de Carnot.

T_1 = temperatura absoluta de la fuente caliente.

T_2 = temperatura absoluta de la fuente fría.

Asimismo demostró que el η_c era el máximo obtenible para dos fuentes térmicas dadas y mayor que el rendimiento térmico de cualquier máquina no ideal, que funcionara entre las mismas fuentes, es decir :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} > \eta_m = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (\text{Válido sólo para la máquina térmica})$$

η_m = rendimiento térmico de una máquina cualquiera que funciona entre las fuentes a T_1 y T_2 .

Cualquiera sea una máquina térmica necesita un cuerpo (generalmente un fluido) intermediario que evolucionando cíclicamente intercambie calor con las fuentes y realice el trabajo mecánico (W) que es su razón de ser.

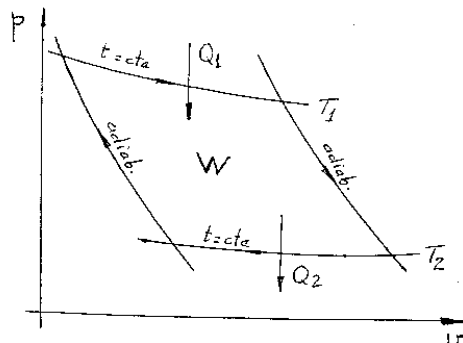
Este fluido intermediario debe recibir calor de la fuente caliente en forma ideal, para lo cual su temperatura debe coincidir con la de ésta. Y lo mismo debe ocurrir cuando cede calor a la fuente fría.

En el intervalo entre ambos intercambios, el sistema (fluido intermediario) debe variar su temperatura entre T_1 y T_2 sin intercambiar calor con las fuentes para que esa transformación se haga en forma ideal.

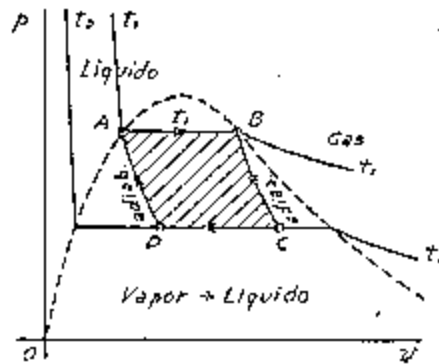
Para volver al estado inicial y poder reiniciar el ciclo, el sistema debe aumentar su temperatura desde T_2 a T_1 , en las mismas condiciones ideales, x indicadas antes.

La transformación en que el sistema (fluido) no intercambia calor con el medio (fuentes) se denomina adiabática.

En la máquina de Carnot el sistema describe un ciclo compuesto por cuatro transformaciones : 2 isothermas x ($T = \text{cte.}$) y 2 adiabáticas ($Q = 0$).



En la figura de arriba, se muestra el ciclo correspondiente a un gas y en la siguiente, el ciclo cuando el fluido es un vapor que se condensa al ponerse en contacto con la fuente fría y se evapora al recibir calor de la fuente caliente.



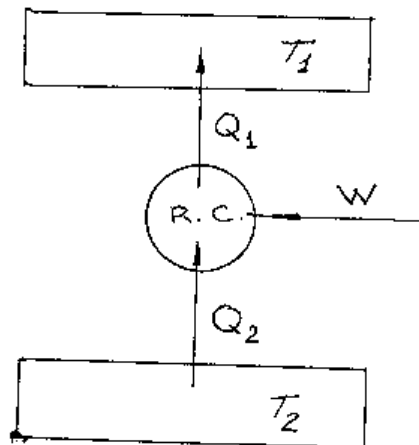
En ambos ejemplos, el área encerrada por el ciclo representa el trabajo realizado por la máquina de Carnot.

REFRIGERADOR DE CARNOT

Como la máquina de Carnot es totalmente reversible (ideal) se puede invertir su sentido de marcha, describiendo el ciclo en sentido contrario. Cambian los signos del W y el Q.

Recibe el trabajo W y quita Q_2 Cal de la fuente fría entregando Q_1 Cal en la fuente fría, cumpliéndose también :

$$Q_1 = W + Q_2$$



Una máquina frigorífica (enfría la fuente fría) que funciona según el ciclo de Carnot inverso, se llama refrigerador de Carnot.

EFFECTO JOULE - THOMSON

Describe la transformación que efectúa un fluido termoelástico para enfriarse y se aplica a sistemas que no se encuentran en equilibrio consigo mismos ni con el medio. En su interior existen diferencias de temperaturas y de presión.



Se considera un fluido que se desplaza por una cañería aislada donde en A existe un obstáculo tal como una válvula o un tapón poroso, que permite el paso de la corriente pero ocasiona una disminución de la presión.

Se conoce el estado del fluido en (1) y (2) pero no en A, pues la transformación en A, no es en equilibrio, es decir que su estado varía de instante a instante y por ello no es expresable por una ecuación de estado, ni representable en los diagramas de equilibrio.

Aplicando el principio de la Conservación de la energía, se tiene :

$$U_1 + p_1 V_1 + \frac{W_1^2}{2g} + Z_1 + Q = U_2 + p_2 V_2 + \frac{W_2^2}{2g} + Z_2 + W_c$$

donde :

U = energía interna del fluido a cada lado de A

p = presión del líquido.

V = volumen específico del fluido.

$\frac{W^2}{2g}$ = energía cinética del fluido.

$2g$

Con W = velocidad del fluido

Z = altura de la cañería por sobre un plano de referencia.

Q = calor intercambiado entre el fluido y el medio.

W_c = trabajo de circulación efectuado por el fluido sobre algún mecanismo interpuesto en la corriente.

Como la cañería está aislada y no existe ningún mecanismo intercalado en ella :

$$Q = 0 \quad \text{y} \quad W_c = 0$$

Además la velocidad en (1) es prácticamente la misma que en (2), entonces :

$$\frac{W_2^2}{2g} - \frac{W_1^2}{2g} = 0$$

y como la cañería es horizontal, resulta :

$$Z_2 - Z_1 = 0 \quad \text{Quedando :}$$

$$U_1 + p_1 v_1 = U_2 + p_2 v_2$$

que representa la definición de la función entalpía H :

$$h_1 = h_2$$

No se trata de una isoentálpica sino de una transformación en no equilibrio donde el valor de h es el mismo antes y después de la transformación.

La variación de la temperatura al disminuir la presión, entalpía constante, está dada por :

$$\Delta t$$

$$\left(\frac{dT}{dp} \right)_h = \mu$$

Como $\mu > 0$, para las condiciones usuales de trabajo y la mayoría de los fluidos y como $\Delta p < 0$, la variación de temperatura debe tener el mismo signo para que μ resulte positivo, es decir, $\Delta t < 0$, que implica que la estrangulación de la vena fluida debe producir una disminución de temperatura, o sea un efecto refrigerante sobre el fluido.

CICLOS FRIGORÍFICOS.

COEFICIENTE DE EFECTO FRIGORÍFICO.

La eficiencia de una máquina frigorífica se mide como en toda instalación, por el cociente entre el beneficio obtenido o propósito realizado y la energía que ha sido necesario consumir o trabajo gastado. Como el objeto de la máquina frigorífica y la energía consumida son las W cal del trabajo recibido, se define esa relación como “coeficiente de efecto frigorífico” :

$$E = \frac{\text{Calor absorbido}}{\text{Trabajo recibido}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Y para el ciclo Carnot, donde las cantidades de calor son proporcionales a las temperaturas absolutas es :

$$E_c = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Este coeficiente mide las calorías absorbidas (frigorías) por cada caloría de trabajo. Asimismo se deduce que cuanto más alta sea T_2 y menor la diferencia entre T_1 y T_2 , mayor será el rendimiento de la instalación frigorífica.

Al igual que la máquina de Carnot, la máquina frigorífica más eficiente en la que funciona de acuerdo con el ciclo inverso de Carnot.

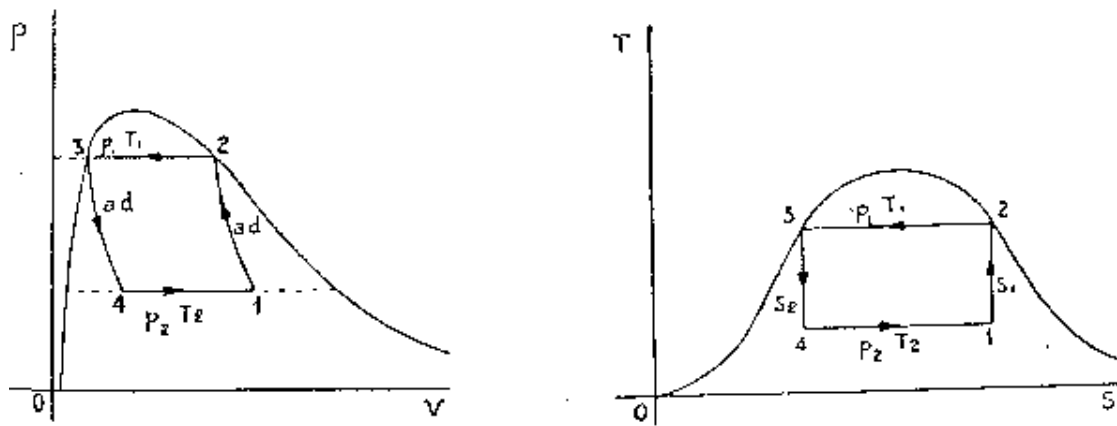
$$E_M \leq E_c \quad \text{Con } E_M = \text{coeficiente de ef frig. de una máquina cualquiera.}$$

La bondad de cualquier otra máquina se mide por su aproximación a la de Carnot, mediante la expresión :

$$\eta_c = \frac{E_M}{E_c} = \text{rendimiento respecto del ciclo de Carnot}$$

La forma más ventajosa de la realización práctica del refrigerador de Arnot, es hacer evolucionar un fluido fácilmente condensable para que las dos transformaciones inotérmicas sean la condensación y evaporación con lo que se consigue que sean a su vez, isobáricas ($p = \text{cte.}$), pudiéndose realizar en recipientes de volumen invariable.

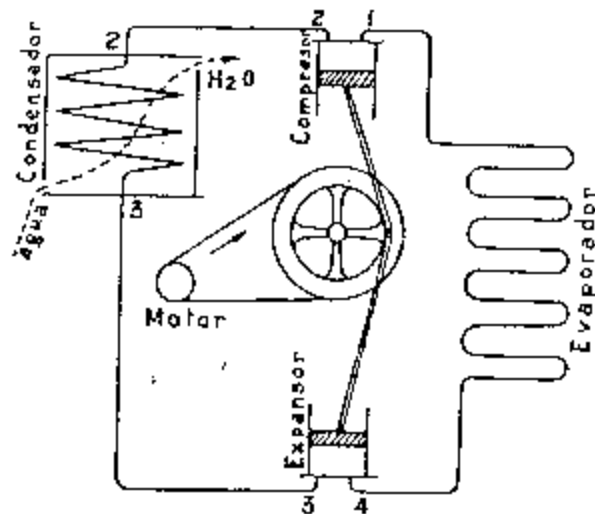
En la Fig. se representa el ciclo de Arnot inverso en el diagrama ($p; v$) y en uno de los diagramas denominados “entrópicos”, un $T - S$ en este caso, donde en ordenadas se lleva la temperatura (T) y en abscisas la función de estado entropía (S).



Por otra parte como en las transformaciones isotérmicas es donde debe verificarse el intercambio de calor con las fuentes conviene que la transmisión de calor sea eficaz y de todas las formas de transmisión una de las mejores es cuando el fluido se evapora o condensa en contacto con una superficie.

MÁQUINA FRIGORÍFICA DE COMPRESIÓN.

Como cada transformación mostrada en los diagramas (p ; v y T - S) requiere un mecanismo distinto, la forma de realizar en la práctica el ciclo de Carnot inverso, es con los elementos mostrados en la fig. donde el proceso se describe a continuación :



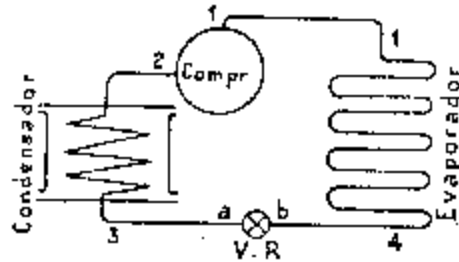
- 1 : El compresor aspira vapor y lo comprime adiabáticamente (isoentrópicamente) hasta 2 (p_1 , T_1);
- 2-3 : Pasa por el condensador, enfriado comúnmente con agua, donde se condensa (licúa);
- 3 : El fluido entra en un expansor, semejante al compresor, pero aquí es alimentado por el líquido a alta presión, funcionando como un motor, o sea efectuando trabajo que puede aprovecharse para ayudar a accionar el compresor;
- 3-4 : Expansión adiabática (isoentrópica) en el expansor hasta presión p_2 ;
- 4-1 : Absorción de calor por parte del fluido para evaporarse hasta alcanzar el estado 1, donde se reinicia el ciclo.

Para que el fluido describa el ciclo se debe suministrar del exterior (medio) un trabajo igual a la diferencia entre el recibido por el compresor y el efectuado por el expansor:

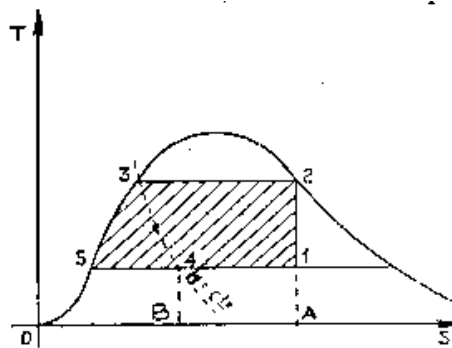
$$W = W_{\text{comp.}} - W_{\text{Exp.}} \quad (\text{superficie del diag.})$$

El uso del expansor permite aproximar el ciclo al de Arnot pero su uso no es práctico puesto que introduce un mecanismo más en la instalación y es dificultoso regular su marcha para adaptarlo a las condiciones variables de funcionamiento.

Desde el punto de vista práctico (no termodinámico) es mejor sustituir al expansor por una válvula de regulación o expansión que mantiene la diferencia de presión entre el condensador y el evaporador, pero hace imposible la recuperación del trabajo.



En la válvula de regulación (V.R.) se dan las condiciones vistas en el efecto Joule-Thompson por lo que : $h_a = h_b$ y el ciclo se modifica como se muestra en el diagrama resultando que las transformaciones que lo forman son :



1-2 : adiabática (isoentrópica)

2-3 ; 4-1 : isóbaras ($p = \text{cte}$ y $T = \text{cte}$)

3-4 : isoentálica no ideal irreversible ($h = \text{cte}$)

Para estudiarlas se parte de la expresión del Primer Principio de la Termodinámica en función de la entalpía

$$Q = h_f - h_i - \sum_1^f v \Delta p$$

donde :

$$Q = \sum_1^f v \Delta p = W_c = \text{trabajo de circulación del fluido.}$$

Entonces : $Q = h_f - h_i + W_c$

En la transformación adiabática resulta :

$$Q = 0 \quad \implies \quad W_c = h_i - h_f$$

Para la condensación o evaporación que es a $p = \text{cte}$; resulta $\Delta p = 0 \implies Q = h_f - h_i$

Se denomina “efecto frigorífico” al calor absorbido en el evaporador por kg. de refrigerante que se evapora y se mide en frigorías (Cal negativas).

Está dado por el Δh entre la entrada y la salida del evaporador y está medido por m (1-A-B-4-1) < que si se usara el expansor que correspondería al punto 5.

El trabajo exterior es mayor al no aprovecharse el trabajo de expansión; entonces el trabajo en la compresión adiabática es :

$$W_c = h_i - h_f = -(h_f - h_i) = -(h_2 - h_1) \quad (\text{Sup 1-2-3-5})$$

Llamando

E_c = coef. de ef. frig. para el ciclo de Carnot

E_E = ídem para el ciclo con expansor

E_{VR} = ídem utilizando la V.R.

Resulta :

$$E_c \geq E_E > E_{VR}$$

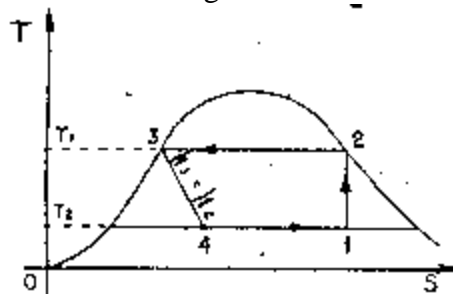
Como se trabaja en la zona de vapor húmedo, el ciclo se denomina de régimen húmedo.

DIMENSIONAMIENTO DE UN CICLO FRIGORÍFICO.

El ciclo está determinado por las temperaturas del condensador y del evaporador. La primera fija la del agua disponible para la condensación y la segunda, la más baja que la máquina de la producir.

Conocido el Q_2 (Frig. / h) que debe absorberse en el evaporador y las temperaturas del refrigerante en él y en el condensador puede calcularse el ciclo.

Se comienza trazando el ciclo en el diagrama, leyéndose las entalpías en los puntos inicial y final de cada transformación. Luego se consideran los elementos siguientes :



- Calor total por absorber en el evaporador, que es dato.
- Efecto frigorífico útil por cada kg. de fluido que evoluciona : $q_2 = (h_1 - h_4)$ Cal/ kg.
- Equivalente térmico del trabajo de compresión : $W_c = (h_2 - h_1)$ Cal/ kg.
- Calor cedido en el condensador : $q_1 = q_2 + W_c = (h_3 - h_2)$ Cal / kg.
- Volumen específico al inicio de la compresión : v_1 (del diagrama) (m^3 / kg.)
- Coef. de ef. frig. $E = \frac{q_2}{W_c} \frac{\text{Cal}}{\text{Cal}}$; el efecto frigorífico por caballo-hora, o sea por cada 632 Cal (que

será 632 veces mayor) está dado por : $k = 632 E \frac{\text{Cal}}{\text{HP.h}}$

$$7. \text{ Potencia teórica indicada : } N_i = \frac{Q_2 \frac{\text{Cal}}{\text{h}}}{k \frac{\text{Cal}}{\text{HP.h}}} \quad (\text{HP})$$

- Peso del fluido que circula por hora :

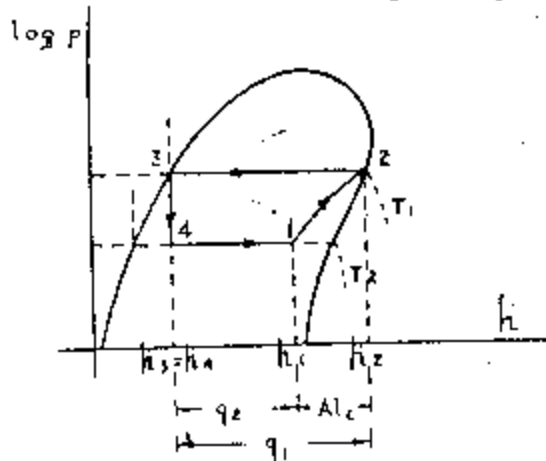
$$G = \frac{Q_2 \frac{\text{Cal}}{\text{h}}}{q_2 \frac{\text{Cal}}{\text{kg.}}} \quad (\text{kg. / h})$$

9. Volumen de vapor aspirado en una hora :

$$V = G v_1 \left(\frac{\text{kg.}}{\text{h.}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg.}} \right) \quad (\text{m}^3 / \text{h})$$

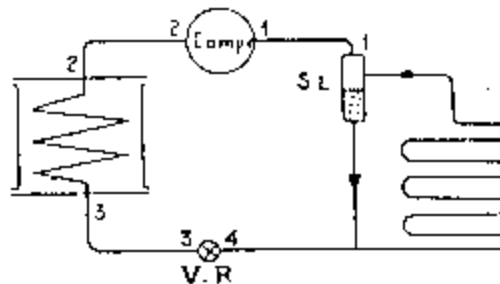
Como las entalpías son los elementos con los que se efectúa todo el cálculo, conviene utilizar un diagrama que permita su lectura directa para evitar interpolaciones. En este sentido son más ventajosos los diagramas log - h (de Mollier), ya que permiten leer directamente las entalpías, entrando con las presiones leídas en el manómetro.

En la figura se muestra el ciclo de funcionamiento de una máquina frigorífica, representado en un diagrama de Mollier.

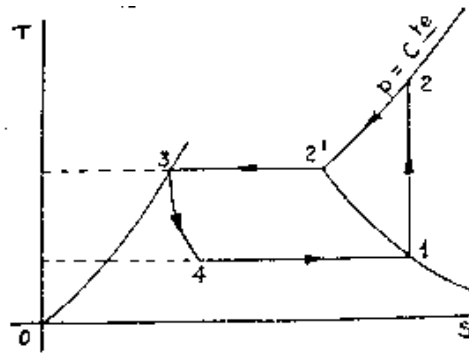


CICLOS PRÁCTICOS.

Una instalación funcionando en régimen húmedo tiene un alto E, pero el líquido (gotitas) que queda al final de la compresión puede provocar graves desperfectos. Estos se corrigen empleando el ciclo denominado de “régimen seco”, colocándose un separador de líquido (S.L.) para que el compresor aspire vapor saturado seco a la temperatura del evaporador.

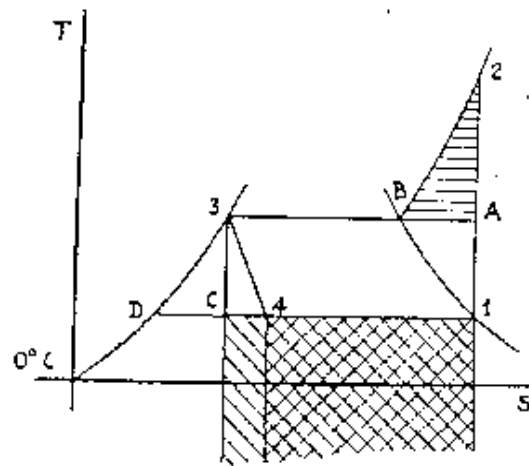
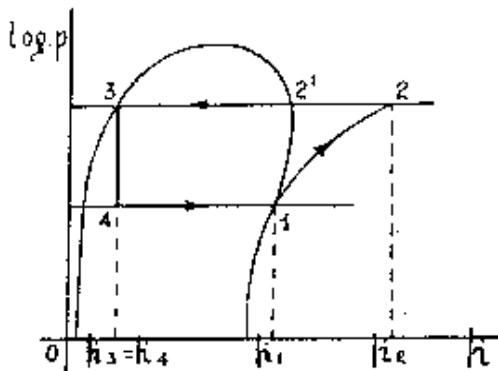


El punto 2 final de la compresión se encuentra en la zona de vapor sobrecalentado, en la intersección de la adiábica que pasa por 1 con la isobara (p = cte.) correspondiente al condensador.



Antes de condensar hay que quitar el calor del sobrecalentamiento (2 - 2'), el resto del ciclo es igual al de régimen húmedo. La disminución del rendimiento debido a la presencia del S.L. surge de comparar este ciclo con el de Carnot, que en el diag. T - S está representado por un rectángulo.

$$E_{\text{Carnot}} = \text{área bajo } c - 1$$



$$E_{\text{ciclo}} = \text{área bajo } 4 - 1$$

$$W_{\text{Carnot}} = (3 - A - 1 - C)$$

$$W_{\text{ciclo}} = (4 - 3 - B - 2 - 1)$$

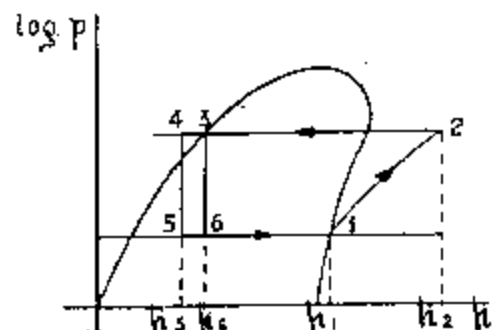
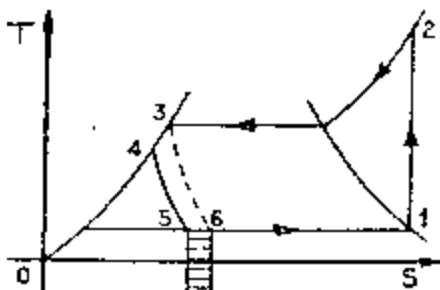
Exceso de W debido al sobrecalentamiento representado por la sup. (B - 2 - A), puesto que la pérdida de rendimiento debida a la presencia de la V.R. en lugar del expansor (3 - C - 4) ya se analizó en el régimen húmedo.

Finalmente :

$$E_c > E_{r.h.} > E_{r.s.}$$

Mejoras en el E.

-) Sub-enfriamiento. Una de las formas de aumentar el E es enfriar el líquido que sale del condensador, lo cual modifica el ciclo, pues el fluido a la salida del condensador no está en 3 sino en 4 y entra al evaporador en 5 en vez de 6.



El aumento del E está medido por $(h_6 - h_5)$ y por el área bajo el segmento 5 - 6, sin haber variado el trabajo de compresión E.

Ejemplo : Ciclo de una instalación funcionando con régimen seco y sub-enfriamiento del líquido condensador (NH_3).

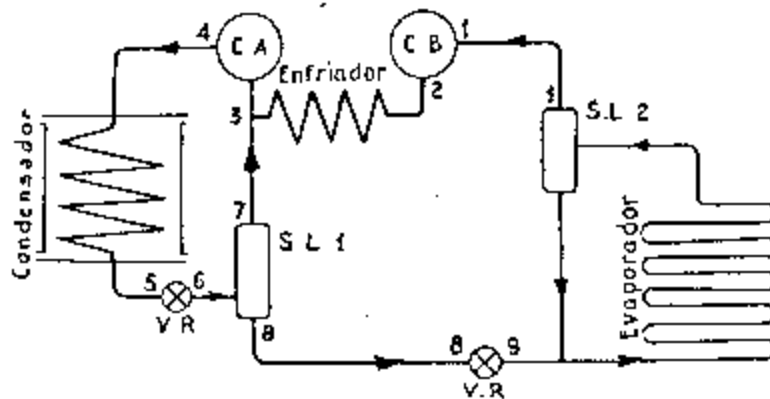
Potenciofrigorífica $Q_2 = 100.000 \text{ Frig./h}$

Temp. de condensación $t_1 = 30^\circ \text{C}$

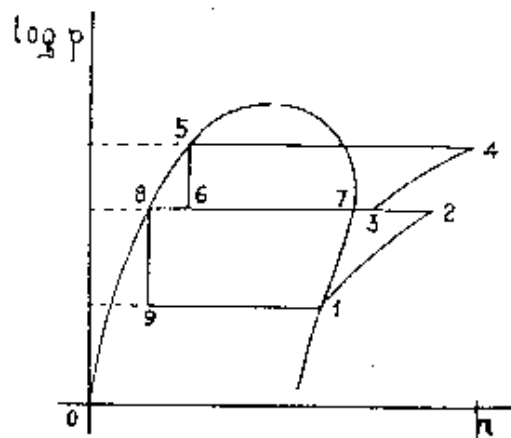
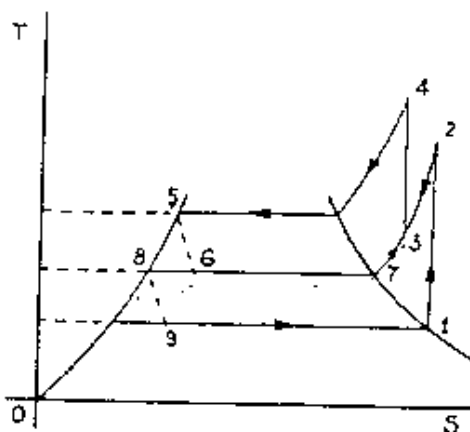
Temp. de evaporación $t_2 = -10^\circ \text{C}$

Temp. de subenfriamiento $t = 25^\circ \text{C}$

- b) Doble compresión. Si la diferencia de temperaturas entre el evaporador y el condensador es muy grande, el área (B - 2 - A) mostrada en el ciclo práctico, puede alcanzar un valor elevado, con lo que el E disminuirá apreciablemente y la temperatura máxima de compresión sería muy alta provocando inconvenientes serios.



Para solucionar estos problemas se recurre a la doble compresión (sistema "compound"). El cilindro de baja aspira vap. sat. seco del evaporador, lo comprime hasta una presión intermedia, se lo enfría en un enfriador hasta donde convenga según el agua disponible y se lo comprime en el cilindro de alta hasta la presión del condensador.



Para que el trabajo en ambas entalpías sea aproximadamente el mismo se elige la presión intermedia (p_i) como la media geométrica entre la del evaporador y la del condensador :

$$p_i = \sqrt{p_c p_e}$$

Sea G = peso del fluido que circula en 1 h por el condensador. Al pasar por la V.R. (5 - 6) la presión disminuye hasta p y el refrigerante se evapora parcialmente, alcanzando el título x_6 . La mezcla se compone ahora de Gx_6 kgr. de vapor y $G(1 - x_6)$ kgr. de líquido, cumpliéndose :

$$G = G X_6 + G (1 - X_6)$$

Si $G_1 = GX_6$ y $G_2 = G (1 - X_6)$; será :

$$G = G_1 + G_2$$

G_1 pasa en el S.L.1 al punto 7 donde se une a la corriente que viene por el enfriador hacia la etapa de alta para pasar al condensador y repetir el ciclo indicado por : 5 - 6 - 7 - 3 - 4 - 5.

G_2 comienza en 8, pasando del S.L.1 a la segunda V.R. (8 - 9) donde sufre una disminución de presión hasta la del evaporador (punto 9).

De allí pasa al evaporador (9 - 1), al S.L.2 y a la etapa de baja para llegar a la del enfriador intermedio donde disminuye la temperatura por la acción combinada del agua de refrigeración y de la mezcla con la corriente G_1 , cuya temperatura T_7 es próxima a 0°C . Así se puede obtener en 3 una temperatura menor en algunos grados de la del condensador.

G_2 describe todo el ciclo y es la que produce el efecto frigorífico al pasar de 9 a 1.