

Curso Online

Eficiencia Energética en el Sector Agroalimentario

Módulo 6: Refrigeración (1ª Parte)

Dictado por: Ricardo Cereceda
Ingeniero Civil Químico
CEM-CMVP-Auditor Líder ISO 50001
Gerente de Proyectos
Ingeniería Proquilab Ltda.



Módulo 6 (1ª Parte)

- ❖ Conceptos Energéticos
- ❖ Propiedades de los refrigerantes
- ❖ Ciclo de Refrigeración
- ❖ Balance de Energía en el Ciclo de Refrigeración
- ❖ COP- Coeficiente de Desempeño
- ❖ Principales Fuentes de Pérdidas de Eficiencia



Conceptos Energéticos

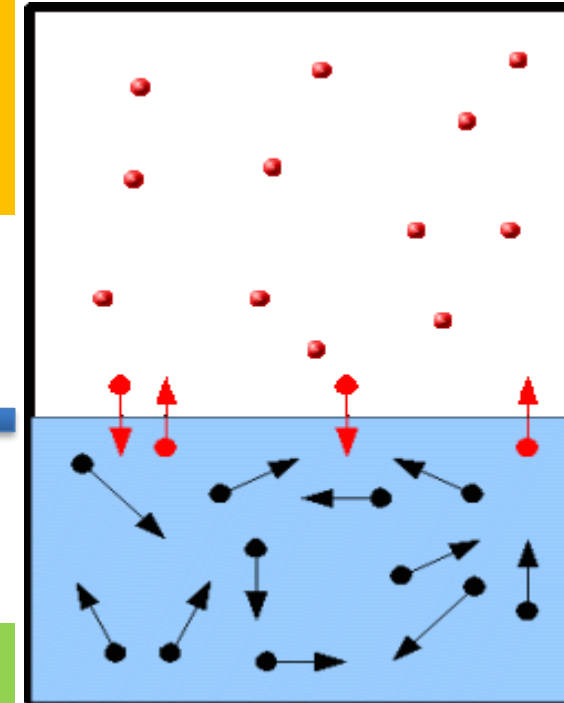
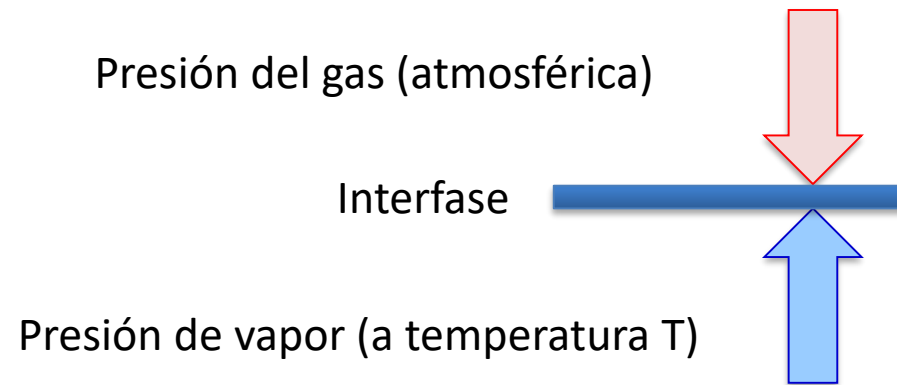
- La refrigeración consiste en trasladar calor desde un lugar frío a otro más caliente.
- Para esto, un fluido refrigerante en un sistema cerrado, extrae calor de un sistema a enfriar evaporándose a baja presión, lo transporta, se comprime (aumentando su presión y temperatura) para luego descargar el calor al ambiente en el proceso de condensación.
- El tamaño de un sistema de refrigeración se mide por las toneladas de refrigeración o TR (Calor requerido por una tonelada de hielo para fundirse en un día)

$$1 \text{ TR} = 3.024 \text{ Kcal/h} = 12.000 \text{ BTU/h} = 3,517 \text{ kW.}$$

- La capacidad neta de refrigeración corresponde al calor removido en el evaporador del sistema, expresado en unidades de potencia térmica, kcal/h, BTU/h, kJ/s, kWt u otros.

Conceptos Energéticos

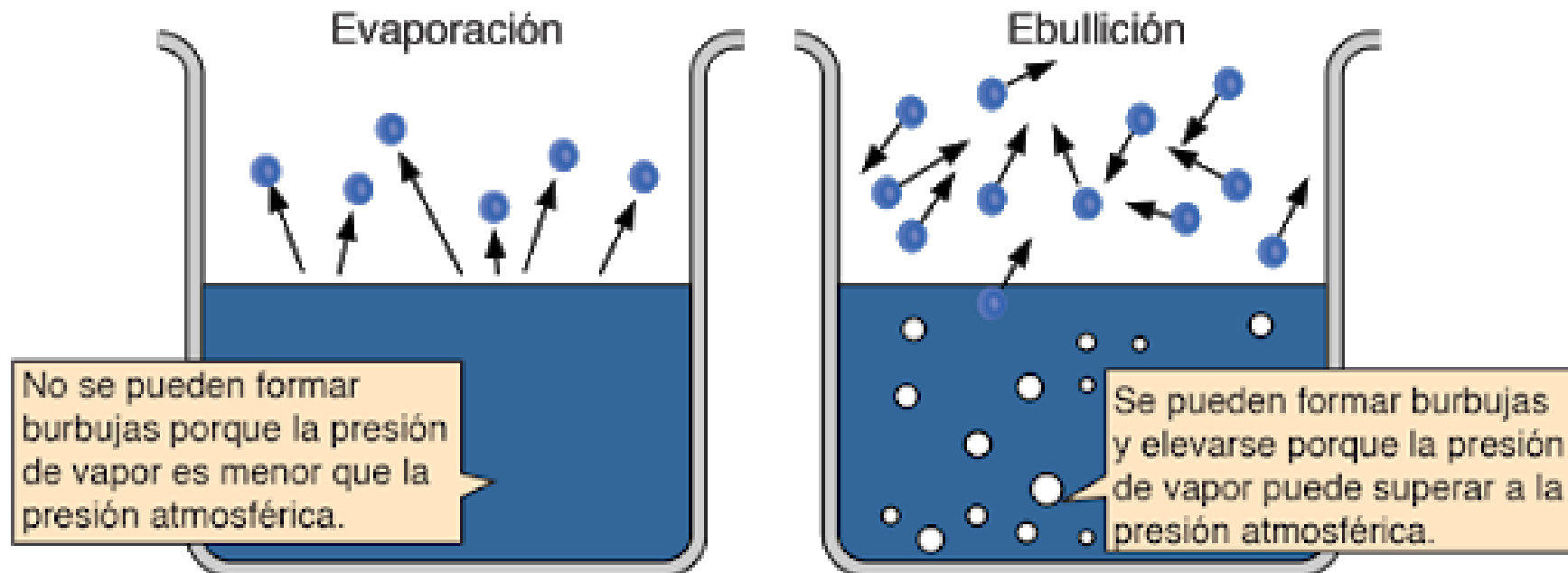
Presión de vapor: presión ejercida por un líquido para pasar a estado gaseoso, a una temperatura determinada



Saturación: Punto en el cual un líquido comienza a pasar a estado gaseoso o bien un gas comienza a pasar a estado líquido, a una presión determinada

Conceptos Energéticos

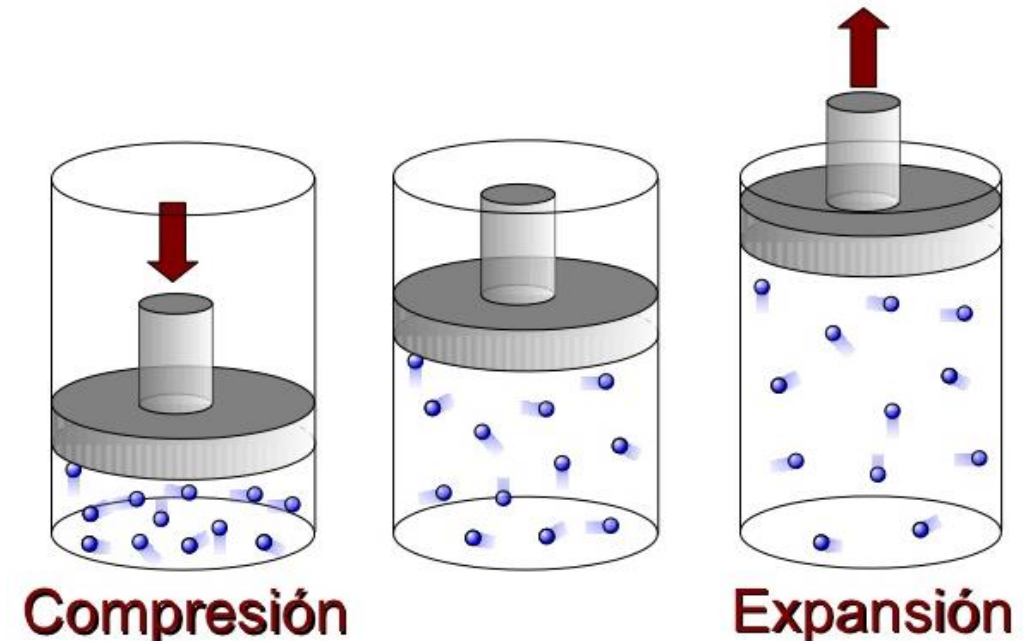
- **Punto de ebullición normal** : Temperatura a la cual un líquido pasa a estado gaseoso, a presión atmosférica.



Conceptos Energéticos

- **Compresión:** Aumento de la presión a un fluido compresible, reduciendo su volumen y aumentando su temperatura.

Expansión: reducción de la presión a un fluido compresible, aumentando su volumen y reduciendo su temperatura.



Conceptos Energéticos

- Entalpía: Contenido de energía de una sustancia a una temperatura y presión determinada

$$h_i = C_p * (t_i - t_{ref})$$

•

Si $h_1 = C_p * (t_1 - t_{ref})$ es la entalpía a temperatura t_1 ,

y

$h_2 = C_p * (t_2 - t_{ref})$ es la entalpía a temperatura t_2

- La diferencia de entalpía entre ambas condiciones sería :

$$\Delta h = h_2 - h_1 = C_p * (t_2 - t_1)$$

Refrigerantes

Puntos de ebullición normal			
Etilenglicol	197 °C	R-134 a	-26,5 °C
Agua	100 °C	R-12	-29,8 °C
Etanol	79 °C	R-717	-33,3 °C
Metanol	65 °C	R-22	-40,7 °C
Acetona	56 °C	R-502	-45,4 °C

Refrigerantes

3. Propiedades de los principales refrigerantes

Tabla 3.1: Propiedades del líquido y vapor saturados para el R-717

R-717, NH₃, Amoníaco

t (°C)	P (kPa)	ρ_l (kg/m ³)	v_g (m ³ /kg)	h_l (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)	s_l (kJ/kg·K)	s_g (kJ/kg·K)
-34	97.9	682.8	1.1607	45.8	1417.2		
-32	108.2	680.7	1.0570	54.7	1420.3		
-30	119.4	678.7	0.9642	63.6	1423.3		
-28	131.5	676.7	0.8810	72.6	1426.3		
-26	144.6	674.7	0.8062	81.5	1429.2	0.546	5.999
-24	158.6	672.7	0.7398	90.5	1432.1	0.582	5.967
-22	173.8	667.7	0.6784	99.5	1434.9	0.618	5.935
-20	190.1	665.1	0.6237	108.6	1437.7	0.654	5.904
-18	207.6	662.6	0.5742	117.6	1440.4	0.689	5.874
-16	226.3	660.0	0.5294	126.7	1443.1	0.725	5.844
-14	246.4	657.3	0.4888	135.8	1445.7	0.760	5.814
-12	267.9	654.7	0.4518	144.9	1448.2	0.795	5.785
-10	290.8	652.1	0.4182	154.0	1450.7	0.829	5.757
-8	315.2	649.4	0.3875	163.2	1453.1	0.864	5.729
-6	341.2	646.7	0.3596	172.3	1455.5	0.898	5.701
-4	368.9	644.0	0.3340	181.5	1457.8	0.932	5.674
-2	398.3	641.3	0.3106	190.8	1460.1	0.966	5.647
0	429.6	638.6	0.2892	200.0	1462.2	1.000	5.621

Presión de vapor

Entalpía de la fase líquida

Entalpía de la fase gaseosa

Temperatura

Refrigerantes

Entalpía del líquido subenfriado y el vapor sobrecalentado para el R-717

h (kJ/kg), R-717, NH₃, Amoníaco

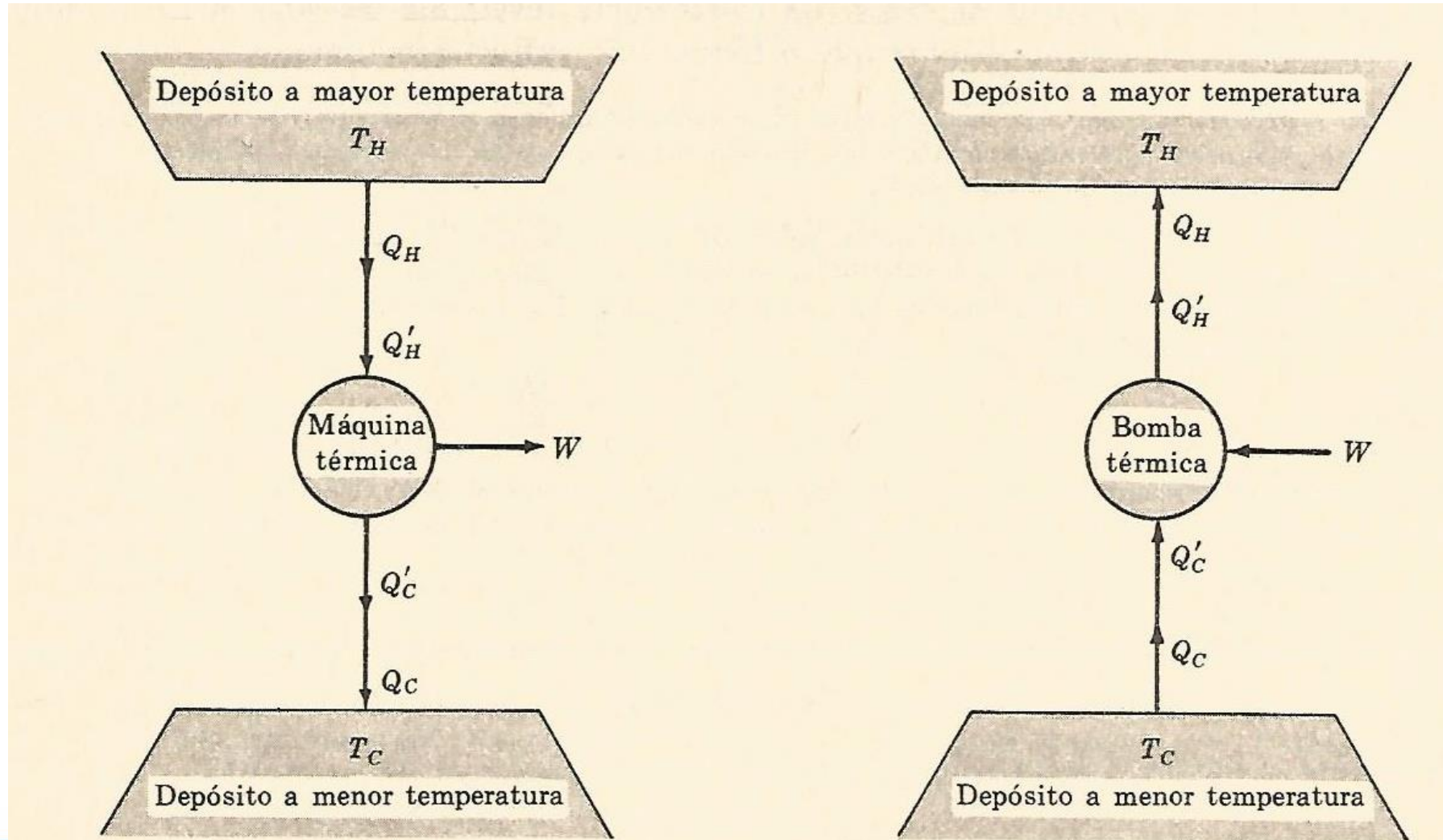
		t (°C)															
t_{sat} (°C)	P (kPa)	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
70	3312.0	-21.8	21.9	66.2	110.9	156.2	201.9	248.1	294.9	342.5	391.0	440.6	491.8		1527.4	1565.6	1600.6
65	2947.8	-22.1	21.6	65.9	110.7	155.9	201.6	247.9	294.8	342.4	390.9	440.6	491.9	1508.5	1547.2	1582.3	1615.1
60	2614.5	-22.4	21.3	65.6	110.4	155.7	201.4	247.7	294.6	342.3	390.8	440.6		1528.7	1564.1	1596.8	1627.8
55	2310.3	-22.7	21.0	65.3	110.1	155.4	201.2	247.5	294.5	342.2	390.8	440.6	1510.0	1545.7	1578.5	1609.5	1639.0
50	2033.5	-23.0	20.7	65.0	109.8	155.2	201.0	247.4	294.3	342.1	390.7		1527.2	1560.2	1591.1	1620.5	1648.9
45	1782.3	-23.3	20.4	64.7	109.5	154.9	200.9	247.2	294.2	342.0	390.7	1508.7	1541.8	1572.7	1602.0	1630.2	1657.6
40	1555.3	-23.6	20.1	64.4	109.2	154.6	200.7	247.1	294.1	341.9		1523.4	1554.3	1583.5	1611.6	1638.7	1665.3
35	1350.8	-23.8	20.0	64.3	109.1	154.5	200.6	247.0	294.0	341.8	1504.8	1535.8	1565.0	1592.9	1619.9	1646.2	1672.1
30	1167.4	-23.7	20.1	64.5	109.3	154.6	200.5	246.9	293.9		1517.3	1546.5	1574.3	1601.1	1627.2	1652.8	1678.1
25	1003.5	-23.9	20.0	64.3	109.2	154.5	200.4	246.8	293.8	1498.8	1528.0	1555.6	1582.3	1608.2	1633.6	1658.6	1683.3
20	857.8	-24.0	19.8	64.2	109.1	154.4	200.3	246.7		1509.4	1537.0	1563.5	1589.2	1614.4	1639.1	1663.6	1688.0
15	728.8	-24.1	19.7	64.1	109.0	154.3	200.2	246.6	1490.8	1518.3	1544.7	1570.2	1595.2	1619.7	1644.0	1668.0	1692.0
10	615.3	-24.2	19.6	64.0	108.9	154.2	200.1		1499.7	1525.9	1551.3	1576.8	1601.8	1626.1	1650.3	1674.5	1698.6
5	516.0	-24.3	19.5	63.9	108.8	154.2	200.1	1481.0	1507.2	1532.4	1556.9	1581.4	1605.8	1630.1	1654.3	1678.6	1701.2
0	429.6	-24.4	19.5	63.9	108.7	154.1		1488.4	1513.5	1537.8	1561.7	1586.1	1610.4	1634.7	1658.9	1683.2	1703.5
-5	354.9	-24.4	19.4	63.8	108.7	154.1	1469.5	1494.5	1518.7	1542.4	1565.8	1589.9	1614.0	1638.1	1662.2	1686.3	1705.4
-10	290.8	-24.5	19.4	63.7	108.6		1475.6	1499.7	1523.2	1546.3	1569.2	1592.9	1616.8	1640.7	1664.6	1688.5	1707.0
-15	236.2	-24.6	19.3	63.7	108.6	1456.7	1480.6	1504.5	1528.4	1552.3	1576.1	1600.0	1623.8	1647.6	1671.5	1695.4	1708.4
-20	190.1	-24.6	19.3	63.7		1461.5	1484.7	1507.9	1531.8	1555.7	1579.5	1603.4	1627.2	1651.0	1674.9	1698.8	1709.6
-25	151.5	-24.6	19.2	63.6	1442.4	1465.5	1488.1	1510.7	1534.6	1558.4	1582.2	1606.0	1629.8	1653.6	1677.4	1701.2	1710.5
-30	119.4	-24.7	19.2		1446.3	1468.7	1490.9	1512.8	1536.6	1560.4	1584.2	1608.0	1631.8	1655.6	1679.4	1703.2	1711.3
-35	93.1	-24.7	19.2	1427.0	1449.3	1471.3	1493.1	1514.7	1536.3	1557.9	1579.5	1601.2	1623.0	1644.9	1666.9	1689.0	1711.3

Entalpía de líquido subenfriado

Entalpía de gas sobrecalentado

Línea de saturación

Ciclo de Refrigeración



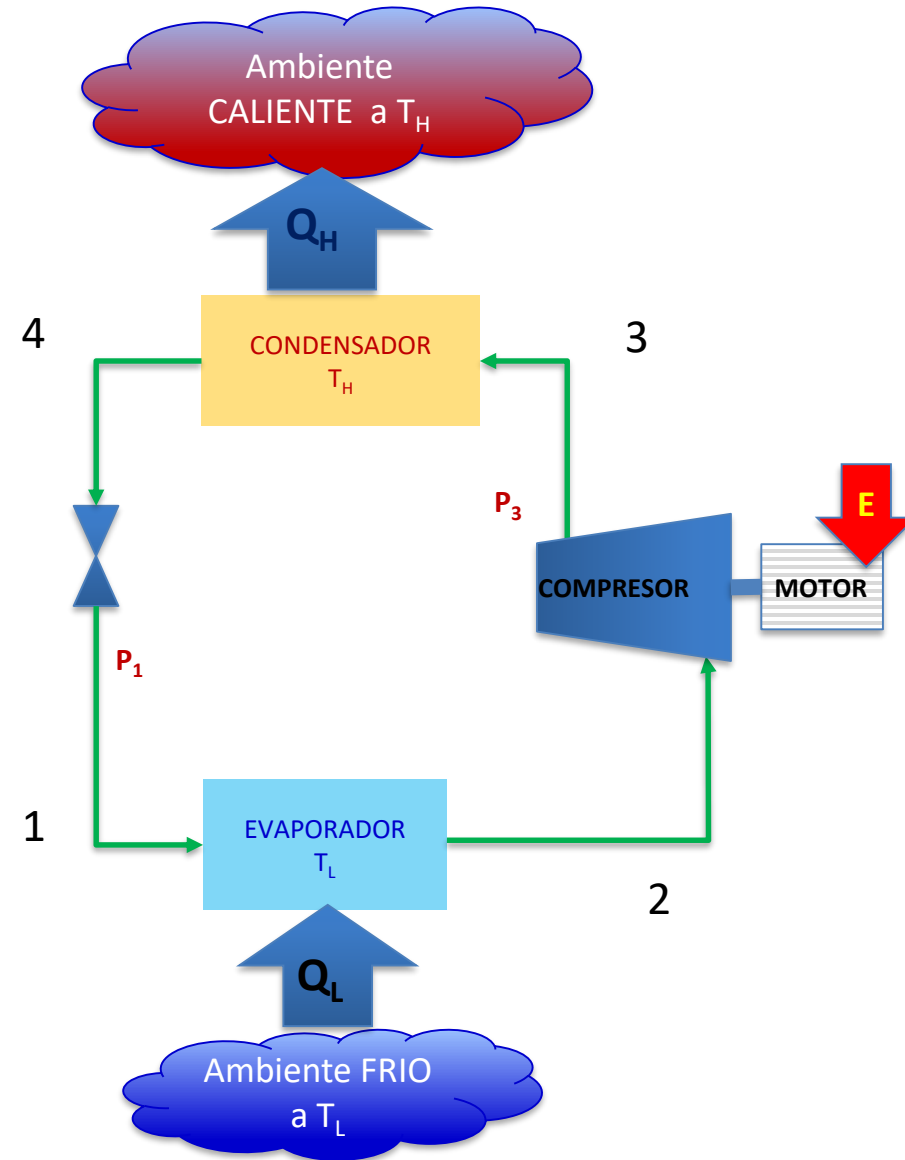
Ciclo de Refrigeración

Proceso 1-2: El refrigerante absorbe calor Q_L de una fuente a baja temperatura T_L

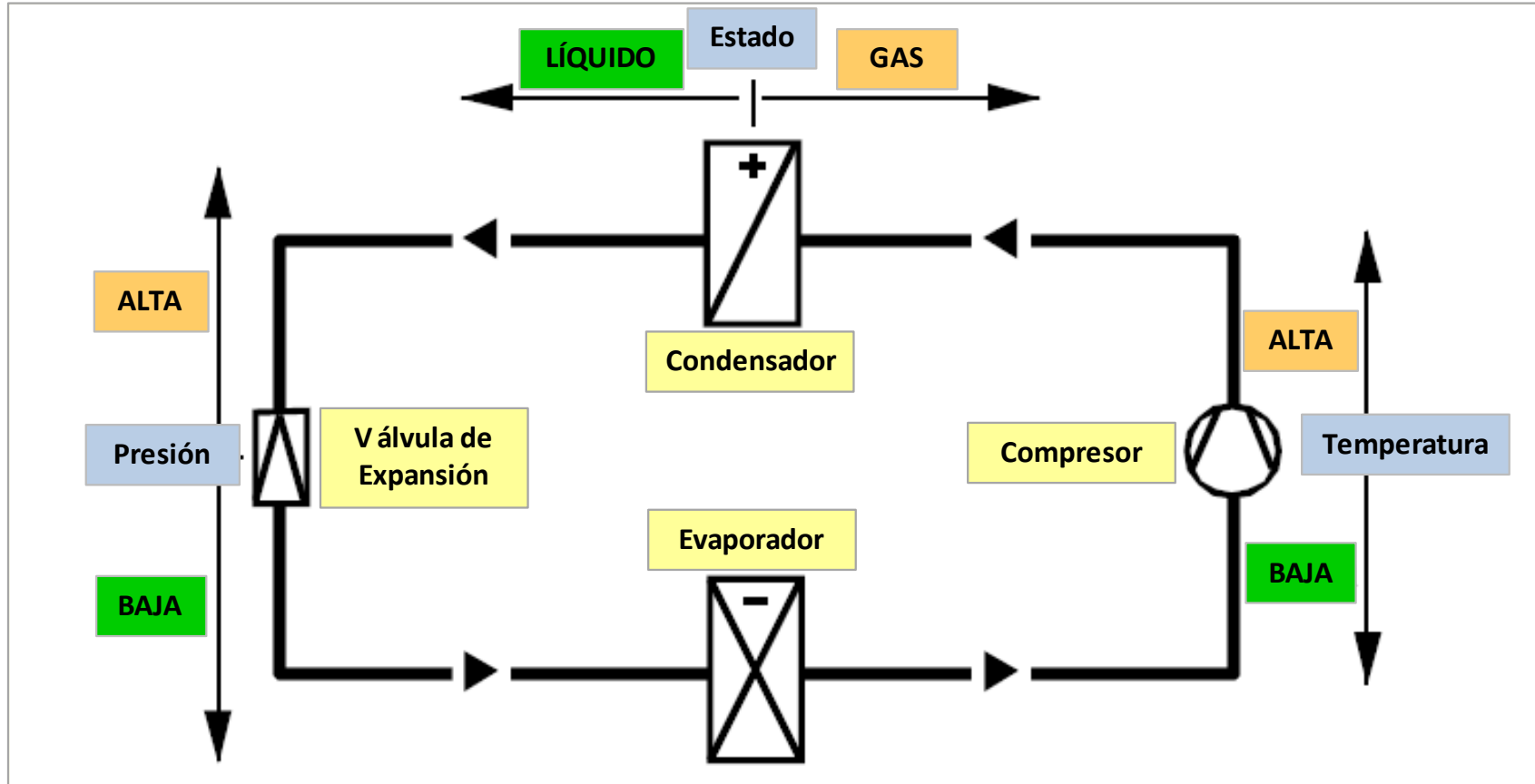
Proceso 2-3: Se agrega Energía E al motor del compresor. Se comprime hasta P_3 . La temperatura se eleva hasta T_H

Proceso 3-4: Se elimina calor Q_H en un sumidero de alta temperatura a T_H

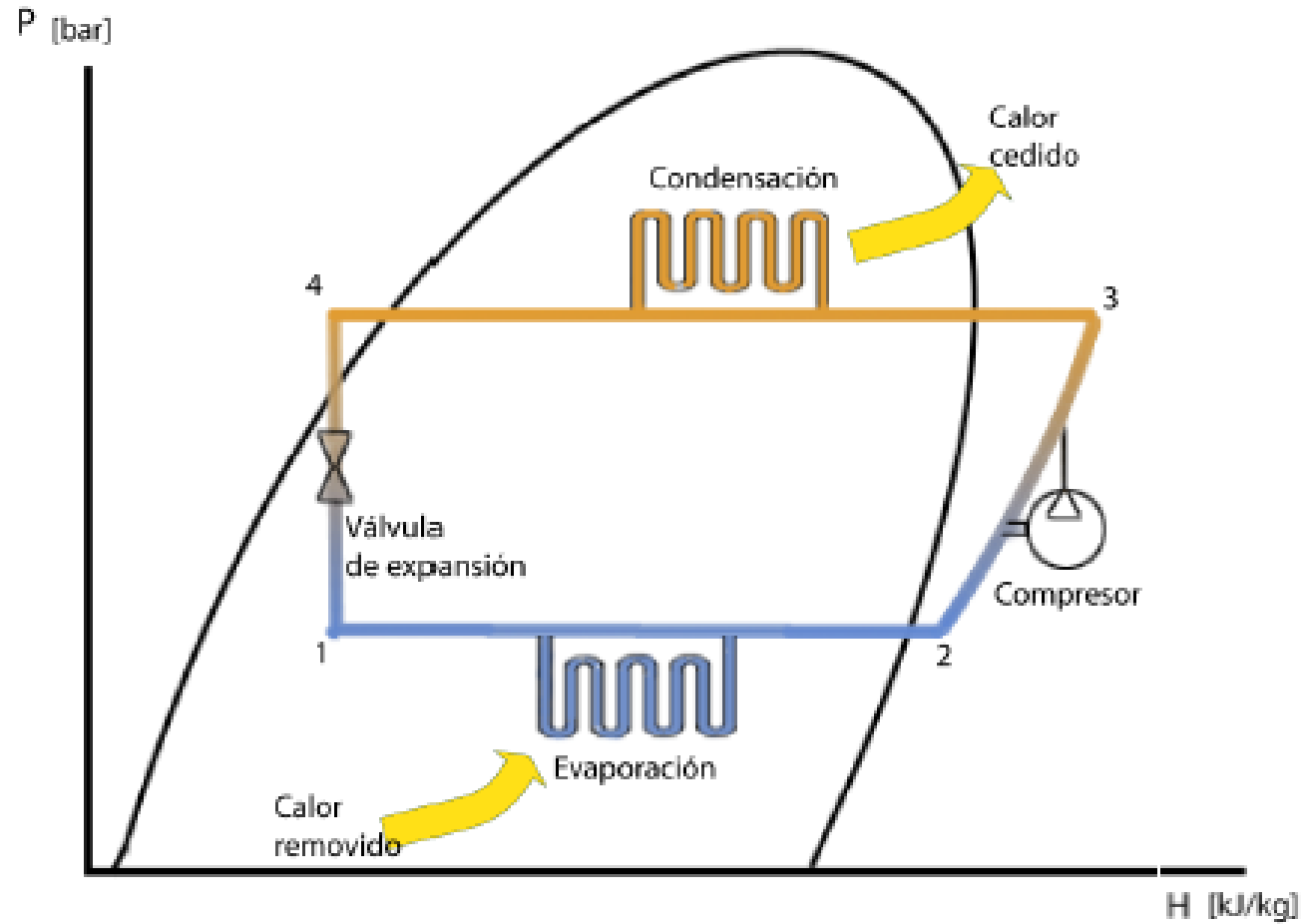
Proceso 4-1: Se expande el refrigerante hasta presión P_1 . La temperatura desciende hasta T_L



Ciclo de Refrigeración



Ciclo de Refrigeración



Balance de energía del ciclo de refrigeración

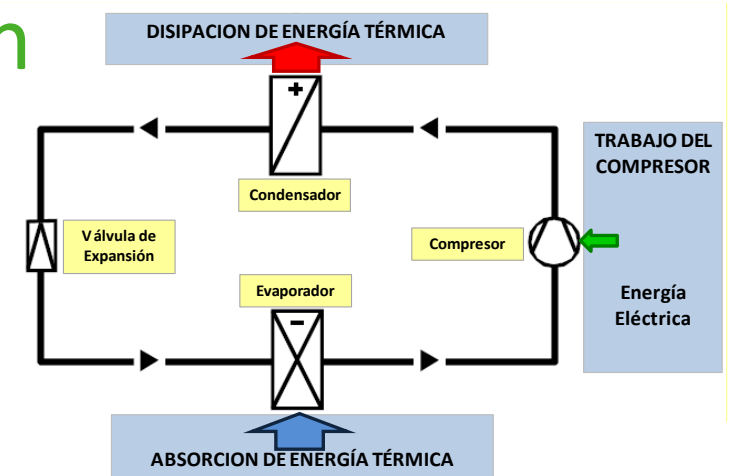
La variación de entalpías de cada corriente corresponde a

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h$$

- **Calor resultante en la evaporación o refrigeración resultante** $\Rightarrow Q_K = m^* (h_S - h_E)_{\text{Evap}}$
- **Energía en el compresor** $\Rightarrow P_{\text{eff}} = m^* (h_S - h_E)_{\text{Comp}}$
- **Calor de condensación** $\Rightarrow Q_C = m^* (h_E - h_S)_{\text{Cond}}$

$$\text{Balance de Energía} \Rightarrow Q_C = Q_K + P_{\text{eff}}$$

$$\text{Coeficiente de desempeño} \Rightarrow \text{COP} = Q_K / P_{\text{eff}}$$



COP: Coeficiente de Desempeño

- Es el indicador de eficiencia más utilizado y corresponde al frío entregado en el evaporador con relación a la potencia que recibe el compresor en su eje.
- Ambos datos se expresan en unidades de potencia energética, siendo el COP un valor adimensional con valores mayores que 1, es decir, se mueve más calor que el consumo de energía del sistema.

$$COP = \frac{Calor_{evaporador} [kW]}{Potencia_{compresor} [kW]} = \frac{\dot{m}_{refrigerante} \left[\frac{kg}{s} \right] \cdot (h_{evaporador}^{out} - h_{evaporador}^{in}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{Potencia_{compresor} [kW]}$$

$$COP = \frac{\Delta h_{evaporador} \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{\Delta h_{compresor} \left[\frac{kJ}{kg} \right]} = \frac{(h_{evaporador}^{out} - h_{evaporador}^{in}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{(h_{compresor}^{out} - h_{compresor}^{in}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}$$

Principales Fuentes de Pérdidas

- Temperaturas de evaporación excesivamente bajas en cámaras
- Presencia de cargas térmicas no productivas
- Ciclos de deshielo inadecuados
- Distribución de la carga inadecuada
- Ingreso de flujos de aire
- Falta de control en accesos - Circulación no restringida a cámaras y túneles-
- Partida simultánea de compresores

Principales Fuentes de Pérdidas

- Operación simultánea de compresores a carga parcial – Esclavo/maestro
- Temperatura y presión de descarga del compresor muy alta
- Hermeticidad del compresor
- Aislación dañada en línea de succión del compresor
- Temperatura ambiente alta
- Falta de control de ventiladores y suministro de agua en los condensadores.
- Subenfriamiento del refrigerante en el condensador
- Falta de limpieza y desincrustación de condensadores

Principales Fuentes de Pérdidas

- La temperatura en el evaporador no debe ser menor que la requerida. Una reducción de 1º C en la temperatura requerida en el evaporador implica un 3% más de consumo energético.
- Se debe minimizar al máximo la temperatura en el condensador. Un aumento de 1º C en la temperatura implica un 1% más de consumo energético.
- Mientras mayor sea la relación de compresión (mayor diferencia entre la presión de entrada y salida), menor será el rendimiento volumétrico del compresor.
- Compresores sobredimensionados generan ineficiencias asociadas a carga parcial. El subdimensionamiento reduce el flujo de refrigerante lo que disminuye la capacidad del evaporador.

¡Muchas gracias por su atención!



Ricardo Cereceda

Ingeniero Civil Químico
CEM-CMVP-Auditor Líder ISO 50001

Gerente de Proyectos
Ingeniería Proquilab Ltda.

www.proquilab.cl

r.cereceda@proquilab.cl

'56 9 9919 7132