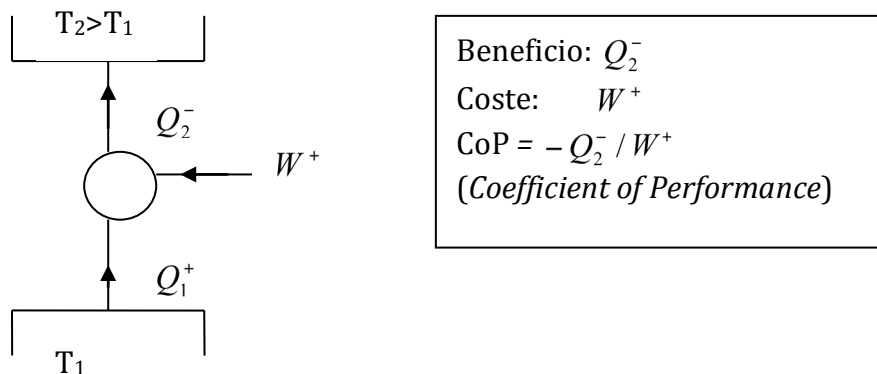


BOMBA DE CALOR (BC)

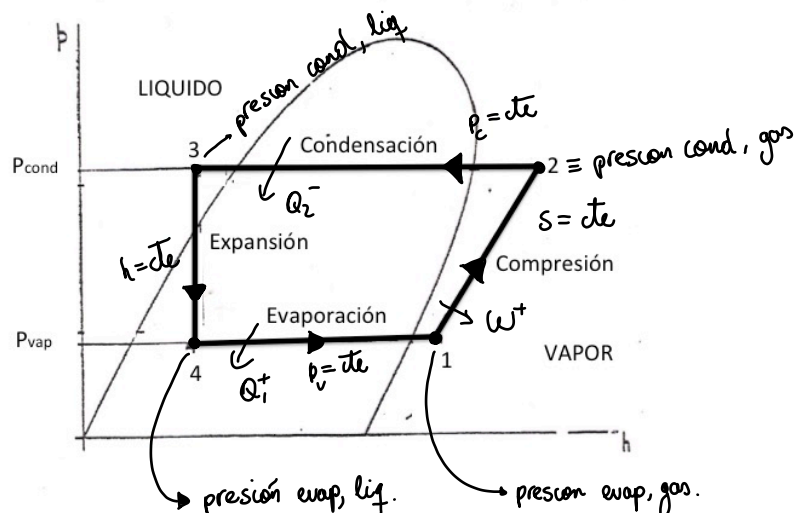
1. Objetivos y Fundamento Teórico

El objetivo de esta práctica es el cálculo del coeficiente de rendimiento (CoP) de una bomba de calor. Una bomba de calor es una máquina cuya función principal es absorber calor Q_1^+ de una fuente de bajo grado a temperatura T_1 (calor normalmente “gratis”) y mediante la realización de trabajo mecánico W^+ (o mediante la toma de calor a alta temperatura en algunos casos) entregar calor Q_2^- a una temperatura útil T_2 :



La “efectividad” de la bomba de calor se calcula como el cociente entre el calor útil entregado y la entrada de energía de alto grado (trabajo o calor), siendo siempre mayor que la unidad, razón por la cual no se denomina eficiencia sino coeficiente de rendimiento CoP.

La bomba de calor que disponemos en el laboratorio toma calor del aire y mediante la realización de trabajo mecánico entrega calor a un circuito de agua que circula con un determinado caudal. Se trata, por tanto, de una bomba aire-agua. El transporte energético es llevado a cabo por un refrigerante (tetrafluoretano, R134a), el cual experimenta el siguiente ciclo termodinámico de 4 fases en el diagrama P-h (diagrama de Mollier):



- 1→2 El compresor de la bomba realiza trabajo mecánico (W^+) e induce una compresión isentrópica del refrigerante en fase vapor desde la presión de evaporación (baja presión) a la de condensación (alta presión).
- 2→3 El refrigerante en fase vapor a alta presión no es estable. Se necesita retirar calor latente (Q_2^-) para pasar a la fase estable líquida. Esto se produce en un intercambiador de calor llamado condensador a presión constante P_{cond} .
- 3→4 El refrigerante en fase líquida sufre una expansión brusca a través de la válvula de expansión de la bomba desde la presión del condensador a la del evaporador. Se trata de un proceso isentálpico. Tras este proceso, nos encontramos con el líquido a baja presión.
- 4→1 El refrigerante en fase líquida a baja presión no es estable. Se necesita aportar calor latente (Q_1^+) para que pase a la fase vapor estable. Esta operación se realiza en el evaporador a presión constante P_{vap} . El refrigerante vuelve al punto de partida, cerrándose por tanto el ciclo termodinámico.

El coeficiente de rendimiento de la bomba lo calcularemos de tres formas diferentes. Suponiendo que nuestra bomba es una bomba de calor ideal ($\text{CoP}_{\text{Ideal}}$), a través del ciclo termodinámico que experimenta el refrigerante y que acabamos de describir ($\text{CoP}_{\text{Ciclo}}$), y utilizando el consumo de energía real que realiza la bomba (CoP_{Real}).

Si suponemos que tenemos una bomba de calor ideal, reversible de forma interna y externa, y en la que se cumple un ciclo de Carnot inverso se verifica:

$$\text{CoP}_{\text{Ideal}} = -\frac{Q_2^-}{W^+} = \frac{Q_2^-}{Q_2^- + Q_1^+} = \frac{1}{1 + \frac{Q_1^+}{Q_2^-}} = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

Si utilizamos los valores tabulados de las entalpías del refrigerante en cada uno de los cuatro puntos de su ciclo termodinámico (h_i ; $i = 1 - 4$), y sabiendo que en los procesos 2→3 y 4→1 la presión es constante ($Q_p = \Delta H$), y que $h_3 = h_4$, tendremos:

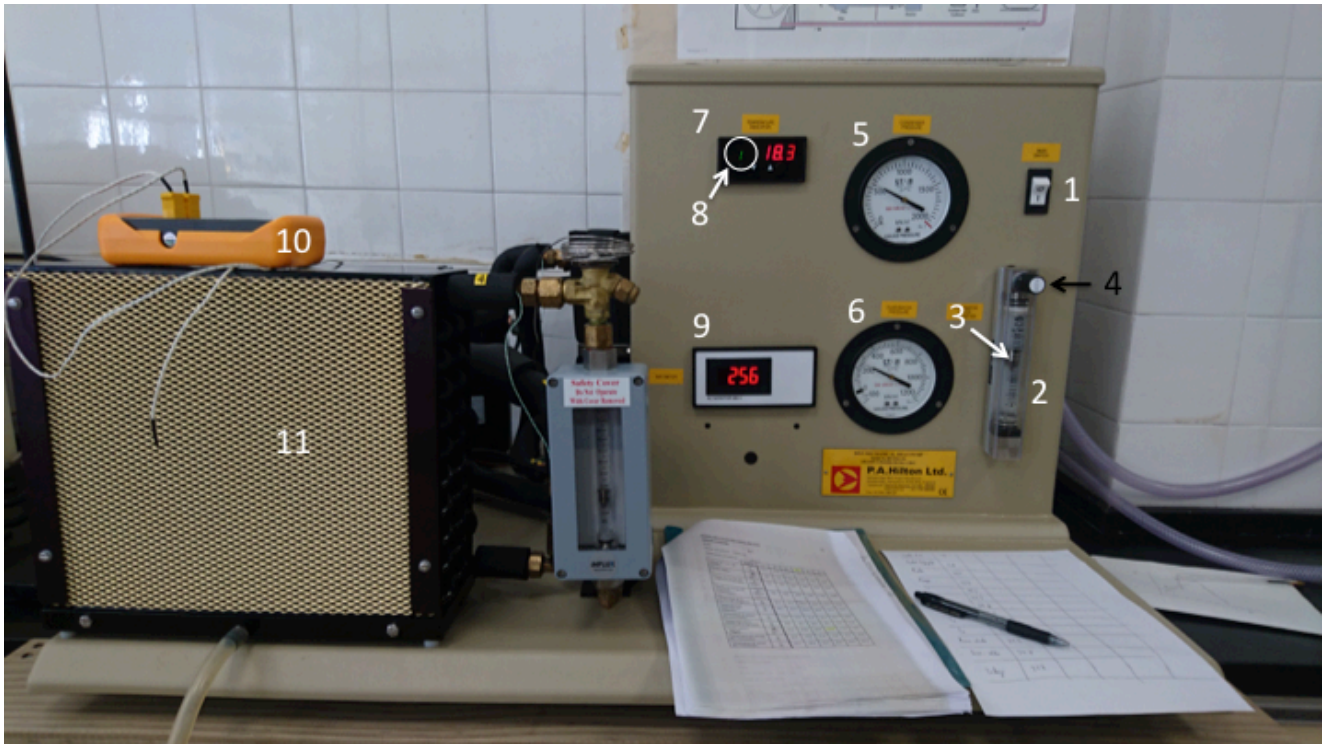
$$\text{CoP}_{\text{Ciclo}} = -\frac{Q_2^-}{W^+} = \frac{Q_2^-}{Q_2^- + Q_1^+} = \frac{(h_3 - h_2)}{(h_3 - h_2) + (h_1 - h_4)} = \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_2} \quad (2)$$

Si conocemos el consumo eléctrico real de la bomba (\dot{W}_{real}), que difiere del trabajo del ciclo ya que incluye factores reales como la fricción y la pérdida de idealidad del compresor, obtenemos:

$$\text{CoP}_{\text{Real}} = -\frac{Q_2^-}{W^+} = \frac{(dm/dt)c_p\Delta T}{\dot{W}_{\text{real}}} \quad (3)$$

donde (dm/dt) es el caudal de agua del circuito al que entregamos el calor en nuestra bomba aire-agua, ΔT es el incremento de temperatura que experimenta el agua al entregarle el calor, y c_p es el calor específico del agua.

2. Dispositivo Experimental



La bomba de calor del laboratorio dispone en su parte frontal de:

(1) interruptor de encendido y apagado que **únicamente el responsable del laboratorio accionará** (nunca lo hará el alumno).

(2) caudalímetro de área variable que nos mide el caudal del circuito de agua al que se entrega el calor Q_2^- . El caudalímetro en su interior presenta un flotador (3) que nos sirve de referencia para medir el caudal, y en su parte superior dispone de una rueda (4) que nos sirve para regular el caudal.

(5) manómetro analógico que nos indica la presión del condensador P_{cond} correspondiente al proceso $2 \rightarrow 3$ en el diagrama de Mollier.

(6) manómetro analógico que nos indica la presión del evaporador P_{vap} correspondiente al proceso $4 \rightarrow 1$ en el diagrama de Mollier.

(7) pantalla digital que nos permite obtener, accionando sucesivamente la botonera que hay en su parte inferior, la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ de cada uno de los cuatro puntos del ciclo termodinámico del refrigerante representados en el diagrama de Mollier (t_1 , t_2 , t_3 y t_4) y de la temperatura del circuito de agua antes y después de recibir el calor Q_2^- (t_5 y t_6 , respectivamente). Sabremos en cada instante que estamos leyendo la temperatura t_i de estas 6 temperaturas mediante el número en color verde que aparece en la pantalla digital y que corresponde a i (8).

(9) pantalla digital que nos da la potencia real de consumo eléctrico \dot{W}_{real} en vatios.

(10) termómetro digital con dos sondas que nos indica la temperatura del aire del laboratorio antes ($t_{\text{aire},1}$) y después ($t_{\text{aire},2}$) de pasar por el evaporador (11). Puesto que en el evaporador el refrigerante absorbe calor Q_1^+ del aire esperamos que $t_{\text{aire},2} < t_{\text{aire},1}$.

3. Modus operandi

A continuación se describe paso a paso todo el procedimiento experimental que se ha de llevar a cabo en el laboratorio.

1. Al iniciar la práctica, la bomba de calor ya debe de estar encendida. En caso de no ser así, pedimos al responsable del laboratorio que la encienda.
2. Fijamos el caudal del circuito de agua a su valor máximo de 50 g/s. El valor del caudal lo marca la parte superior plana del flotador del caudalímetro.
3. Cada 2 min anotamos los valores proporcionados por la bomba para: las 6 temperaturas t_i , $t_{\text{aire},1}$, y $t_{\text{aire},2}$, en total 8 temperaturas; P_{cond} y P_{vap} ; y \dot{W}_{real} .
4. Esperamos a que la bomba alcance el estado estacionario para el caudal de agua fijado. Sabremos que hemos alcanzado el estado estacionario cuando todas las magnitudes medidas en el punto anterior sean constantes en el tiempo u oscilen en torno a un valor medio. Los valores en el estado estacionario son los que utilizaremos en el tratamiento de datos posterior a la realización de la práctica.
5. Fijamos el caudal del circuito de agua sucesivamente para los valores 40, 30, 20 y 10 g/s, y repetimos los puntos 3. y 4. anteriores para cada uno de estos caudales.
6. Comunicamos al responsable del laboratorio la finalización de la práctica para que se proceda al apagado de la bomba de calor (**el apagado nunca lo hará el alumno**).

1: encend desp

2: ajustamos el caudal con el caudal 50 g/s

3: Anotamos 8 T, P_{cond} , P_{vap} , \dot{W}_{real}

$(T_1, T_2, T_3, T_4) \equiv \text{ref}$

$(T_5, T_6) \equiv \text{aire}$

$(T_7, T_8) \equiv \text{agua}$

Esperamos entre
entre cambios

4: Camb. el caudal 40, 30 ... 10
→ Ac

Bomba de calor

$$P_{\text{OC}} = - \frac{Q_1^-}{\dot{W}}$$

4. Tratamiento de datos

El objetivo de la práctica es el cálculo de los tres coeficientes de rendimiento ($\text{CoP}_{\text{Ideal}}$, $\text{CoP}_{\text{Ciclo}}$ y CoP_{Real}) para cada uno de los 5 caudales del circuito de agua estudiados en el laboratorio. Para ello emplearemos las Ecs. 1, 2 y 3 del modo en que se explica a continuación.

1. Cálculo de $\text{CoP}_{\text{Ideal}}$:

Según la Ec. 1, para el cálculo de $\text{CoP}_{\text{Ideal}}$ únicamente necesitamos calcular la temperatura T_1 del “foco frío” del que tomamos el calor (aire), y la temperatura T_2 del “foco caliente” al que entregamos el calor (agua). Aproximaremos estas temperaturas por los valores $\frac{t_{\text{aire},1} + t_{\text{aire},2}}{2}$ y $\frac{t_5 + t_6}{2}$ respectivamente, y aplicaremos la Ec. 1.

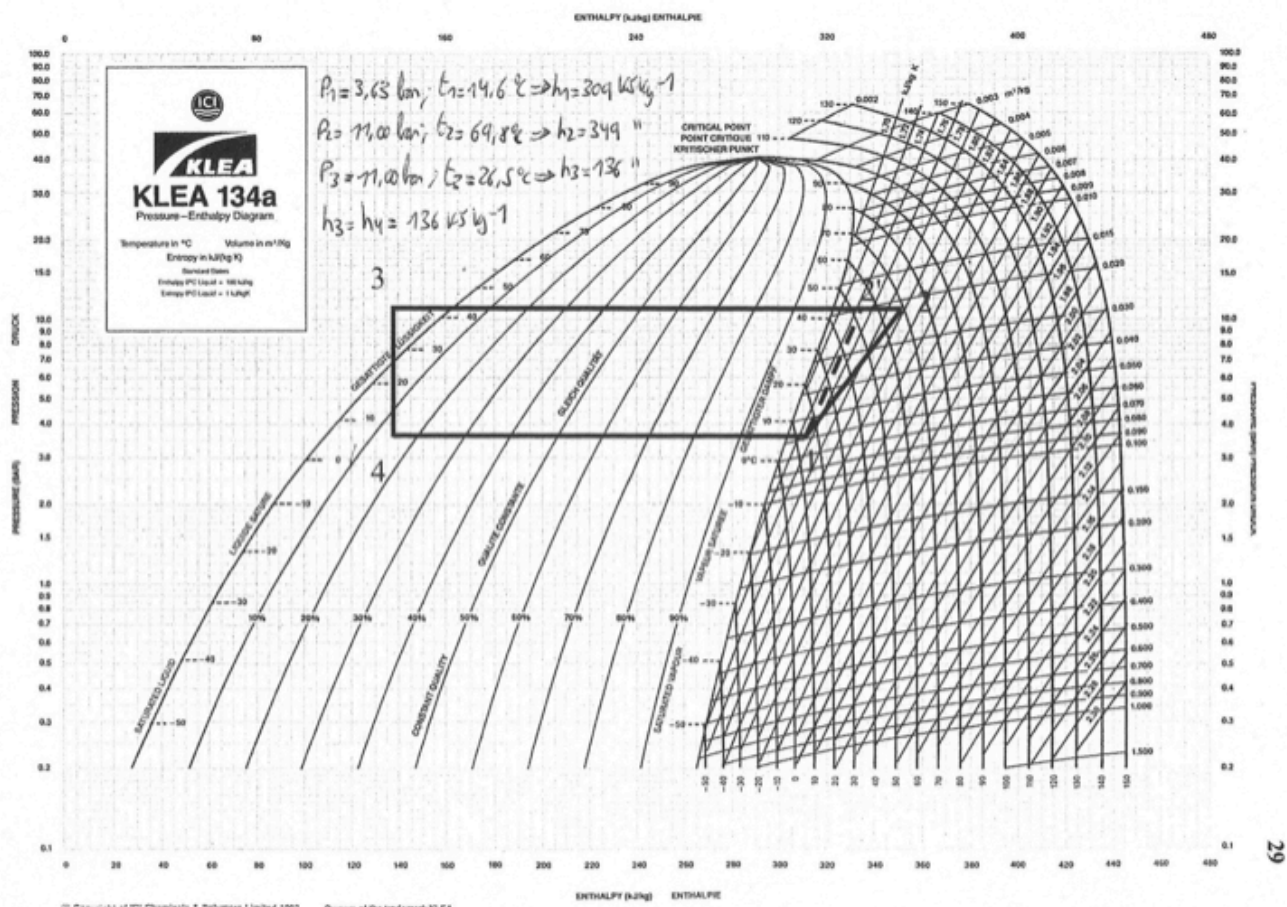
2. Cálculo de $\text{CoP}_{\text{Ciclo}}$:

Según la Ec. 2, para el cálculo de $\text{CoP}_{\text{Ciclo}}$ necesitamos saber las entalpías del refrigerante en los puntos 1, 2 y 3 del diagrama de Mollier. Para ello primero convertimos las presiones de condensación y evaporación medidas en laboratorio en presiones absolutas sumándoles 1 atm. Después simplemente situamos cada una de las coordenadas ($P_{\text{vap}} + 1\text{atm}$, t_1), ($P_{\text{cond}} + 1\text{atm}$, t_2) y ($P_{\text{cond}} + 1\text{atm}$, t_3) en el diagrama de Mollier y vemos cuales son sus entalpías obteniendo así h_1 , h_2 y h_3 , tal y como se ilustra en el ejemplo que se incluye en la página siguiente.

Situar los dos primeros puntos en el diagrama es trivial puesto que los puntos 1 y 2 pertenecen a la fase vapor del refrigerante, y en esta región del diagrama, como se observa en el ejemplo, aparecen dibujadas diferentes isotermas. Entre ellas nos fijaremos en las correspondientes a t_1 y t_2 y elegiremos sus puntos de corte con $P_{\text{vap}} + 1\text{atm}$ y $P_{\text{cond}} + 1\text{atm}$, respectivamente, para situar así los puntos 1 y 2 en el diagrama.

Por el contrario, en la fase líquida a la que pertenece el punto 3 no se representan isotermas. En esta fase tenemos que considerar que las isotermas corresponden a líneas verticales en el diagrama P-h. De esta forma para localizar el punto ($P_{\text{cond}} + 1\text{atm}$, t_3) en el diagrama nos fijamos en el límite izquierdo de la campana de coexistencia líquido-vapor (correspondiente a la fase líquida) y elegimos el punto asignado a t_3 . Una vez ahí, trazamos una línea vertical que corte $P_{\text{cond}} + 1\text{atm}$, situando de esta forma la coordenada ($P_{\text{cond}} + 1\text{atm}$, t_3) en el punto de corte.

Realizando el ejemplo numérico que se incluye en el diagrama se entiende perfectamente este proceso. Además del diagrama de Mollier disponemos de tablas con los valores numéricos de las entalpías representadas en el diagrama y que podemos utilizar para realizar un cálculo más preciso de las entalpías (las tablas se incluyen en el material del Aula Virtual). Una vez obtenidos h_1 , h_2 y h_3 empleamos la Ecuación 2 para obtener $\text{CoP}_{\text{Ciclo}}$.



Nota: en el diagrama que sirve como ejemplo aparece dibujado un punto 2' que sería el punto del ciclo al que llegaríamos si la compresión $1 \rightarrow 2$ fuese isentrópica, como idealmente debería ser. En la realidad vemos como la compresión nos lleva a un punto 2 con entalpía mayor.

3. Cálculo de CoP_{Real} :

La utilización de la Ec. 3 para el cálculo de CoP_{Real} es inmediata. Hacemos $\Delta T = t_6 - t_5$ y empleamos los valores obtenidos para el caudal (dm/dt) y la potencia eléctrica consumida (\dot{W}_{real}) en laboratorio, además del valor tabulado para c_p .

Lógicamente, esperaremos que el ordenamiento entre los tres coeficientes de rendimiento sea: $\text{CoP}_{\text{Ideal}} > \text{CoP}_{\text{Ciclo}} > \text{CoP}_{\text{Real}}$. Representamos las rendimientos respecto del caudal de agua y discutimos los resultados.