

Fuentes de Energía

Capítulo 10: Producción de calor y frío. Energía del ambiente. Energía geotérmica

Autor:

- Antonio Lecuona Neumann. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos. Dpto. De Ingeniería Térmica y de Fluidos, [Grupo ITEA](#), [Universidad Carlos III de Madrid](#), Leganés, España.

2019

La información contenida en este documento sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. Por ello no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comunique e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.

Introducción al Cap. 10: Producción de calor y frío. Energía del ambiente. Energía geotérmica

La mayoría del consumo energético de nuestra sociedad tiene un fin térmico. Como calor tenemos: calefacción, cocción, procesos químicos y físicos para la obtención de materiales, su procesado y conformación para formar bienes de consumo. Como frío tenemos la conservación de alimentos, medicinas y tejidos biológicos, además de la climatización, que busca temperaturas y humedades de confort.

La comunidad científica se plantea como objetivo producir esa energía térmica con un menor impacto ambiental y con un consumo de recursos finitos menor.

Una técnica obvia es hacer uso de calores residuales, muy a menudo vertidos al ambiente sin aprovechamiento. Dada la gran variedad de circunstancias no se aborda este asunto. Por otra parte, su temperatura suele ser insuficiente para muchos propósitos. Sin embargo, los **cambiadores de calor** se recuerdan y se cuantifica su desempeño, por ser la interfase necesaria para obtener energía térmica de una fuente térmica.

En este capítulo se abordan técnicas modernas de contribuir a ese objetivo.

- La **cogeneración**, vista en el [Cap. 2](#), sustituye una caldera con un motor térmico, produce electricidad con él y usa su calor residual para el propósito original. Esta técnica está primada por el gobierno.
- Las **bombas de calor** permiten saltar la temperatura de un calor, consumiendo trabajo. Alternativamente pueden consumir la exergía de un calor, que no necesita ser de un grado térmico elevado, por lo que puede ser energía solar térmica. Se presentan las máquinas de absorción como cajas negras, valorándose empíricamente, lo cual es relevante.

Las bombas de calor se pueden usar para extraer calor de un foco frío (efecto refrigerante) o calentar (efecto calefactor) y tienen la cualidad de consumir menos trabajo para el bombeo que el calor bombeado. Ello se presenta y cuantifica, tratándolas como caja negra. En especial, se desarrolla un modelo empírico de máquina de absorción.

De especial interés son las bombas de calor que toman calor del ambiente, el aire (**aeroterminia**), y del suelo (**geoterminia**), analizándose la ventaja termodinámica de esta última.

La materia se compone del núcleo expositivo, lo complementan temas avanzados, recordatorios y de ampliación (señalados en su caso como *ex cursus*), cuestiones de autoevaluación y ejercicios resueltos y propuestos sin resolver.

Índice

- 10.1.- Calefacción y agua caliente sanitaria.
- 10.2.- Calor del ambiente y bomba de calor.
- 10.3.- Caldera y cogeneración.
- 10.4.- Frío y calor por sorción.
- 10.5.- Calor de proceso e intercambiadores de calor.
- 10.6.- Energía geotérmica.
- 10.7.- Calor y frío solar
- 10.8.- Bibliografía.
- 10.9.- Cuestiones de autoevaluación.
- 10.10.- Actividades propuestas.

Objetivos: Dar a conocer las técnicas de producción de calor y frío con energías renovables, no renovables, con especial énfasis en la solar térmica y en particular las bombas de calor por absorción y adsorción. Introducción a la energía geotérmica.

10.1.- Calefacción y agua caliente sanitaria.

Situación en España solar térmica de baja temperatura: 2,6 GW acumulados hasta 2015. Se instalan anualmente unos 170 MW. La equivalencia oficial es de $700 \text{ W}_p/\text{m}^2$ de panel y un *FC* bajo.

Calefacción de ambiente interior (climatización)

- La climatización invernal puede producirse por aire caliente forzado o por circuito hidráulico, siendo este segundo método el más común. El sistema de aire forzado exige conductos voluminosos, sin embargo, con menos mantenimiento y peso, apto para sector servicios.
- Cuando se usan emisores térmicos de tipo [aerotermino](#) o [radiador](#), la temperatura de agua habituales ronda los $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ para evitar áreas de intercambio excesivas, dificultando estas altas temperaturas la aplicación de la energía solar térmica.
- El sistema de [suelo radiante](#) requiere agua caliente a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$ resultando idóneo para el aporte solar y para [calderas de condensación](#).
- El grado de cobertura solar (% de la demanda satisfecha) en calefacción raramente se acerca al 50% en nuestras latitudes, dada la elevada potencia requerida por unidad de superficie de suelo construido $\sim 100 \text{ W}/\text{m}^2$ en días fríos, que suelen ser nublados. Es más, en verano se produciría calor en exceso que, a) es necesario disipar para evitar el sobrecalentamiento de los paneles, b) sería conveniente usar para [frío solar](#), o c) almacenar hasta el invierno en [almacenamiento estacional](#) subterráneo de agua caliente.
- Otra posibilidad de la solar térmica en días fríos es aportar calor solar al evaporador de una [bomba de calor](#) eléctrica para calefacción, denominándose [paneles termodinámicos](#).
- Lo expuesto hace necesario un sistema de apoyo y respaldo al solar, basado en el consumo de electricidad o combustible.

10.1.- Calefacción y agua caliente sanitaria.

Agua caliente sanitaria

- El [agua caliente sanitaria](#) (ACS) es agua potable que se emplea en edificios para baño, cocina y limpieza. Otra posibilidad es el agua de piscina climatizada, que no llega a los 30 °C.
- Se prepara y acumula a una temperatura de 60 °C a 70 °C para evitar la proliferación de la bacteria [legionela](#) y se mezcla con agua fría en el punto de consumo hasta llegar a 30 °C - 45 °C.
- Estas temperaturas son compatibles con [captadores solares planos y de tubos de vacío](#). [Más aquí](#).
- Como la [producción solar](#) no coincide con el consumo, es necesario acumular agua preparada en tanques de temperatura estratificada, en base a su menor densidad a mayor temperatura. Así el agua fría entrante queda en la parte baja y el agua preparada en la parte alta, evitándose el mezclado.
- Dado que una cobertura solar del 100% daría lugar a instalaciones excesivamente grandes y exceso de producción en verano, suele practicarse una cobertura del 30% al 70%, dependiendo de las [zonas climáticas solares](#) en España, lo cual está regulado por el código técnico de la edificación CTE y el RITE, p. e. [Actividad Propuesta 6.2](#).
- Cuando la temperatura exterior puede bajar de 0 °C la probable congelación reventaría el circuito hidráulico. Es necesario recurrir a circuito al exterior primario con [anticongelante](#) (p. e. basado en propilenglicol) o a vaciado preventivo ([drainback](#)).
- En zonas exentas de congelación se emplea el sistema de [termosifón](#), que aúna captador y tanque en un una unidad compacta exterior, y usando agua de red, ascendiendo al agua caliente al tanque sin en uso de bomba, simplemente por su menor densidad (estratificación).

10.2.- Calor del ambiente y bomba de calor.

Las **bombas de calor** usan trabajo para subir el nivel térmico del calor que toman. Su aplicación es doble:

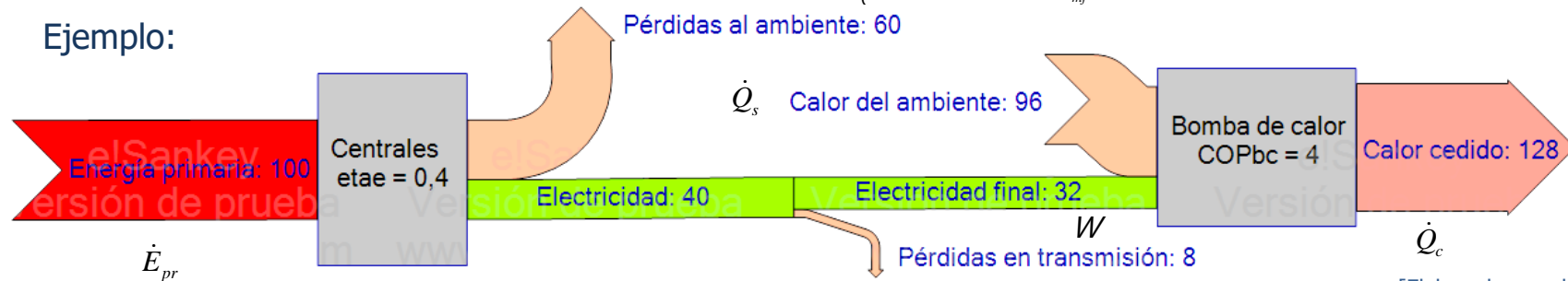
- Máquina frigorífica** mf : Evacúan calor para refrigerar, a una temperatura inferior a la ambiente, enviando la suma del calor evacuado y del trabajo suministrado en forma de calor al ambiente \dot{Q}_c . Tal es el caso del aire acondicionado. Mayoritariamente hacen uso del ciclo de compresión mecánica, = Rankine inverso.
- Máquina calorífica**, o bomba de calor propiamente dicha mc ó bc : Toman calor del ambiente \dot{Q}_s , que es gratuito y renovable, (o calor residual en algunos casos) bombeándolo hasta una temperatura superior, de utilidad, es decir, generando calor. La potencia de bombeo onerosa (trabajo) W ha de ser compensada, energética y económicamente, con el calor tomado gratuitamente. El trabajo requiere un valor mayor de energía primaria E_{pr} por lo que el calor cedido \dot{Q}_c debería de ser mayor que la energía primaria consumida para que su uso sea justificable.

$$COP_{mc} = \frac{\dot{Q}_c}{W} \text{ de 2 a 5 en media estacional, 4 en el diagrama}$$

$$W + \dot{Q}_s = \dot{Q}_c$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Eficiencia producción} \\ \text{electricidad de la red} \end{array} \right\} \eta_e = \frac{W}{\dot{E}_{pr}} \text{ de 0,2 a 0,5 en media anual}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_{pr} = \frac{\dot{Q}_c}{\eta_e COP_{bc}} \Rightarrow \left[\eta_e COP_{mc} > 1 \text{ para que } \dot{Q}_c > \dot{E}_{pr} \right] \\ \text{Tomado del foco frío} \\ \dot{E}_{pr} = \frac{\dot{Q}_s}{\eta_e (COP_{bc} - 1)} \left[\eta_e COP_{mf} \text{ es } 0,96 \right] \\ \text{COP}_{mf} \end{array} \right. \left[\text{En el diagrama es } 1,28. \right]$$



[Elaborada por el autor]

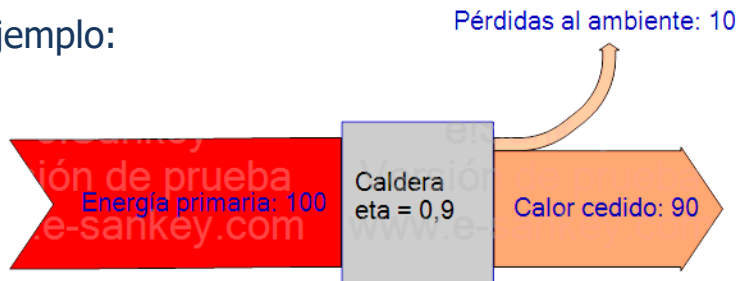
El calor del ambiente puede provenir del aire, del terreno o del agua (geotermia) o incluso del sol.

10.3.- Calor del ambiente y bomba (cont.).

Si en lugar de bomba de calor se usa una caldera, con igual energía primaria:

1. El material inventariable es menos costoso.
2. El *LCOE* (Cap. 8) puede ser menor si la bomba de calor es muy costosa, su eficiencia baja y el coste de combustible bajo frente al de la electricidad

Ejemplo:



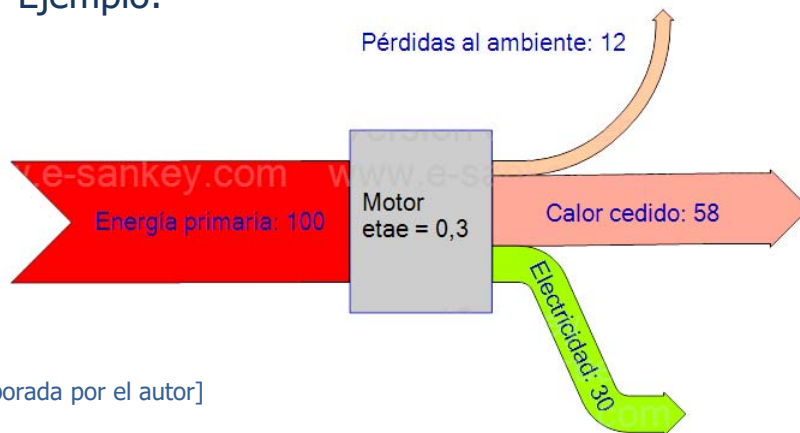
[Elaborada por el autor]

- Con igual consumo primario se obtiene menos calor que en el ejemplo anterior.
- Sin embargo, la caldera puede producir calor a mayor temperatura que la bomba de calor. Su *COP* se degrada al aumentar la diferencia de temperatura en el bombeo.

Las ventajas de la cogeneración quedan patentes en el siguiente diagrama:

Con igual consumo primario se logran $58+30 = 88$ unidades de energía, eficiencia global 0,88. Para tener 90 de calor hace falta 155 de primaria, el consumo es mayor y con ello el tamaño.

Ejemplo:



[Elaborada por el autor]

- La electricidad producida tiene un valor de mercado mayor que el calor ~ 2 a 3 veces.
- Si se deseara igual cantidad de calor cedido que en los casos anteriores es necesario aumentar el tamaño del motor.
- La electricidad puede inyectarse en la red, bajo el antiguo Régimen Especial en España o reglamento que le ha seguido.

10.4.- Frío y calor por sorción.

- En lugar de consumir trabajo, como lo hace la [máquina de compresión mecánica](#) de vapor, con ciclo Rankine inverso, es posible consumir calor para efectuar el bombeo de calor.
- Igualmente a la máquina de compresión mecánica, la **máquina de sorción** logra producir vapor de un fluido puro a alta presión. Tras condensarlo evacuándose el calor a temperatura interna $t_{c,r}$, el líquido es expansionado en una válvula y evapora a baja presión, absorbiendo calor a una menor temperatura interna t_e .
- La absorción sustituye al compresor, el cual devuelve la alta presión al vapor, por un compresor termoquímico que consume calor. El aumento de presión lo logra una bomba, con un minúsculo consumo de trabajo.
- Este calor motriz es necesario para generar vapor desgasificando una sustancia a alta presión, a una temperatura media interna t_g .
- Cuando esta sustancia es un sólido se habla de [adsorción](#) y cuando es un líquido se dice [absorción](#). [Más aquí](#). [More here](#). [More here](#). Genéricamente, sorción.
- La sustancia, a baja presión sorbe el vapor producido en el evaporador, liberando calor, a una temperatura media interna t_{ab} .
- El efecto neto es el bombeo de calor tomado a baja temperatura en el evaporador hasta una mayor temperatura en el condensador, consumiendo calor a una temperatura superior, en el generador. Se evacúa calor a una temperatura intermedia, en el absorbedor, que suele asociarse con el condensador, típicamente al ambiente en el caso de la producción de frío. [Un video](#).
- Para la producción de calor ($_{mc}$), el efecto útil es el calor del absorbedor y condensador que puede ser hasta 2,2 veces el calor consumido en el generador, pues se suma al calor tomado del ambiente con el evaporador.
- El calor solar puede ser empleado para alimentar el generador de una máquina de sorción de [simple efecto](#). [More here](#).
- Un ejercicio de aplicación se muestra en el [Cap. 2, apartado 2.5, ejercicio 2.7](#).

10.4.- Frío y calor por sorción (cont.).

- Para acondicionamiento de aire basta con producir agua fría de 4 a 15 °C, por lo que las máquinas de adsorción de diverso tipo así como las de absorción basadas en la disolución de agua-bromuro de litio resultan adecuadas. El agua es el fluido refrigerante que cambia de fase.
- Para refrigeración industrial se requiere frío bajo cero, por lo que son necesarias máquinas con un refrigerante con solidificación a < 0 °C, p. e. amoníaco, usando el agua como absorbente.
- Las máquinas de absorción de **simple efecto** necesitan calor a 70 °C - 110 °C y proporcionan un $COP_{mf} \approx 0,7$ a 0,8 máximo. Un $COP_{mf} \approx 1,2$ a 1,3 máximo se logra con las máquinas de **doble efecto**, más costosas, necesitando calor a un mínimo de unos 150 °C. Por lo tanto, para usar energía solar térmica requerirían captadores de media temperatura, como los de tubos de vacío especialmente eficientes, tipo Fresnel o CPCs (véase [Cap. 8](#)).



[Principios operativos. Un curso introductorio. Refrigeración por absorción.](#)

Máquina de absorción de H₂O/LiBr.

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Absorption_heat_pump.jpg,
Domino Público

10.4.- Frío y calor por sorción (cont.).

- Comparación entre bombas de calor de compresión mecánica y por sorción, como máquina frigorífica m_f en este caso, en términos de **energía primaria**.

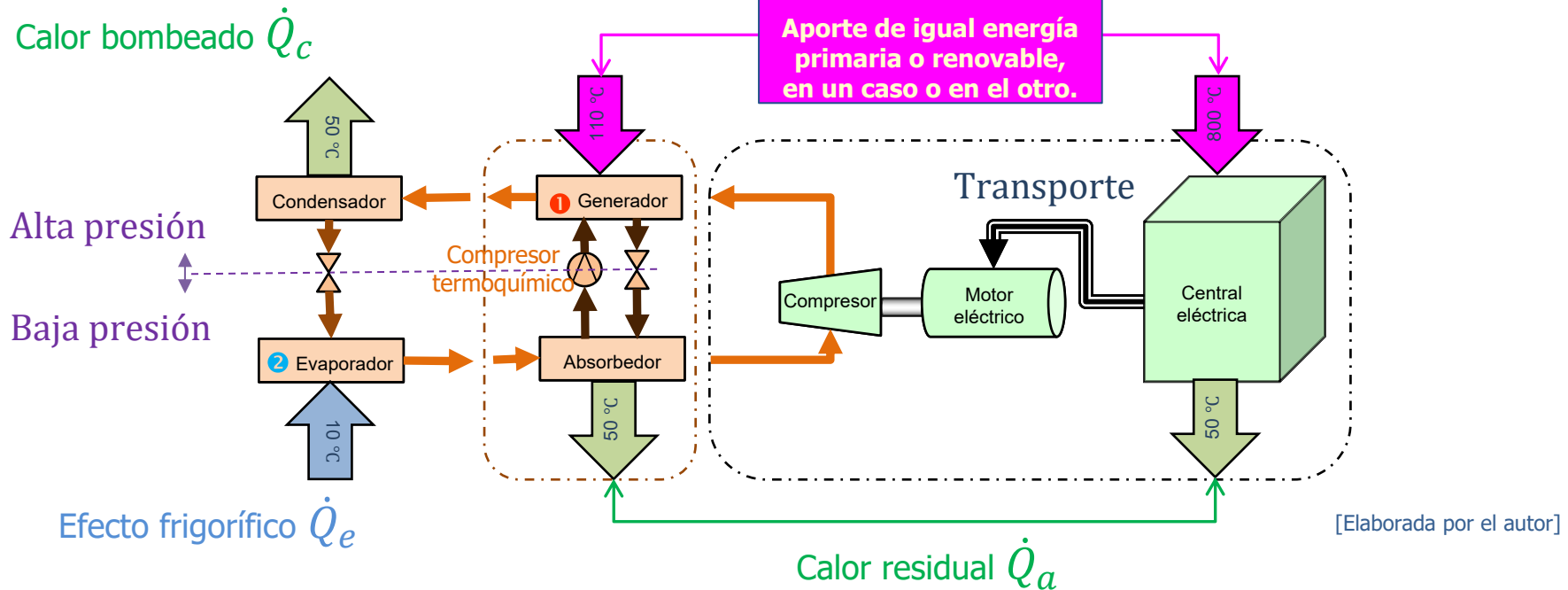


Figura 10.6.- Configuraciones alternativas (en cajas de línea de trazos) para la producción de vapor de refrigerante en ① a alta presión, el cual tras ser expandido produce, en este caso, efecto frigorífico útil en ② al evaporarse. Se ha asumido para ambos esquemas igual energía primaria usada e igual calor residual al ambiente, señalado con flechas. Flechas en marrón oscuro indican refrigerante líquido y más oscuras, disolución.

NOTA: Es de destacar, en esta figura y en general, que se denomina energía primaria a la de origen fósil, pero también se llama a la energía original, independientemente de si es renovable o no renovable. Por ejemplo, en ocasiones se calcula el denominado "ahorro de energía primaria" por introducción de energía renovables, aludiendo así a que la primaria es la no renovable.

10.4.- Frío y calor por sorción (cont.).

- La potencia térmica útil de una máquina de sorción, y como resultado su eficiencia, se modifica cambiando las temperaturas de sus cuatro cambiadores de calor con el exterior. Así, la potencia crece al aumentar la temperatura de generación t_g (tanto del fluido interno, como correspondientemente, del fluido caloportador externo que activa la máquina). Crece asimismo al aumentar la temperatura de vaporación t_e . Pero disminuye al aumentar la de absorción y de condensación (que suelen ser la misma) t_{ac} . Un modelo simple de máquina de absorción lo da el de la **temperatura característica** $\Delta\Delta t$, que se define como una combinación lineal de las tres temperaturas exteriores, medias entre entrada y salida del cambiador de calor correspondiente:

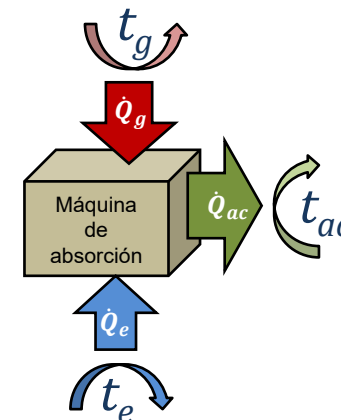
$$0 > \Delta\Delta t \doteq t_g - 2,5 \times t_{ac} + 1,8 \times t_e \quad (10.6) \quad \text{para H}_2\text{O/LiBr y simple efecto, } t \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

- Resultando, con la potencia nominal de la máquina como referencia ($_{nom}$), y para un caso típico:

$$\underbrace{\dot{Q}_g / \dot{Q}_{e,nom}}_{><1; \geq 0} = 0,2 + 0,051 \times \Delta\Delta t / ^\circ\text{C} \quad (10.7)$$

$$\underbrace{\dot{Q}_e / \dot{Q}_{e,nom}}_{><1; \geq 0} = 0,09 + 0,042 \times \Delta\Delta t / ^\circ\text{C} \quad (10.7\text{bis})$$

$$\underbrace{\dot{Q}_{ac}}_{\geq 0} = \underbrace{\dot{Q}_a + \dot{Q}_c}_{\substack{\geq 0 \\ \text{Por unirse sus} \\ \text{circuitos exteriores}}} = \underbrace{\dot{Q}_g + \dot{Q}_e}_{\substack{\geq 0 \\ \text{Por balance} \\ \text{energético}}} \quad (10.7\text{tri})$$



Las temperaturas exteriores medias del circuito de agua t se diferencian de las interiores a la máquina (fluido del ciclo) en unos 5 a 10 $^\circ\text{C}$. Las exteriores son mayores que las interiores si se aporta calor a la máquina (generador y evaporador) y menores si se toma de ella (absorbedor y condensador).

10.4.- Frío y calor por sorción (cont.).

Ejercicio 10.1.- Haga uso de las Ecs. (10.7) para:

I.- Determinar $\Delta\Delta t$ para potencia nominal de la máquina frigorífica $\dot{Q}_{e,nom}$.

Solución: $\dot{Q}_e / \dot{Q}_{e,nom} = 0,09 + 0,042\Delta\Delta t/^{\circ}\text{C} = 1 \rightarrow \Delta\Delta t = 21,7^{\circ}\text{C}$

II.- Con $t_e = 10^{\circ}\text{C}$ y $t_{ac} = 25^{\circ}\text{C}$, durante el verano en Madrid y con torre de refrigeración húmeda, determine t_g para potencia nominal.

Solución: hace falta una temperatura externa, media de generación, de:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\Delta t = t_g - 2,5t_{ac} + 1,8t_e = 21,7^{\circ}\text{C} \\ t_e = 10^{\circ}\text{C}; t_{ac} = 25^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \rightarrow t_g = 65,2^{\circ}\text{C}$$

Una temperatura de generación mayor ocasionaría, ceteris paribus, una potencia frigorífica superior a la nominal para \dot{Q}_e , de acuerdo a la Ec. (10.7bis).

III.- Compruebe que un aumento de la diferencia de temperatura para el bombeo reduce el COP_{mf} .

La diferencia de temperatura de bombeo (salto) es la diferencia entre las temperaturas medias externas de evaporación y de condensación, pero ambas tienen un efecto distinto, pues los factores que las afectan en la expresión de $\Delta\Delta t$ son diferentes, Ec. (10.6). Si optamos por bajar hasta el mínimo admisible para una máquina de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, $t_e = 4^{\circ}\text{C}$ y subimos hasta $t_{ac} = 29^{\circ}\text{C}$, resulta:

Solución: Caso base, $COP_{mf} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \frac{0,09 + 0,042\Delta\Delta t^{\circ}\text{C}^{-1}}{0,2 + 0,051\Delta\Delta t^{\circ}\text{C}^{-1}} = \frac{0,09 + 0,042 \times 21,7}{0,2 + 0,051 \times 21,7} = \frac{1}{1,31} = 0,77$, Producción 100%.

Para mínima t_e : $\Delta\Delta t = (65,2 - 2,5 \times 29 + 1,8 \times 4)^{\circ}\text{C} = -0,1^{\circ}\text{C} \rightarrow$

$COP_{mf} = \frac{0,09 + 0,042 \times -0,1}{0,2 + 0,051 \times -0,1} = \frac{0,0858}{0,195} = 0,44$, se produce solo un 8,58% de la potencia nominal!.

La subida a $t_{ac} = 30^{\circ}\text{C}$ daría \dot{Q}_e y $COP_{mf} < 0$, que es imposible; luego son nulos, aunque fuera $\dot{Q}_g \geq 0$, que tampoco puede ser < 0 . Para llegar a producir frío sería necesario aumentar t_g .

10.5.- Calor de proceso e intercambiadores de calor. (*Ex cursus*)

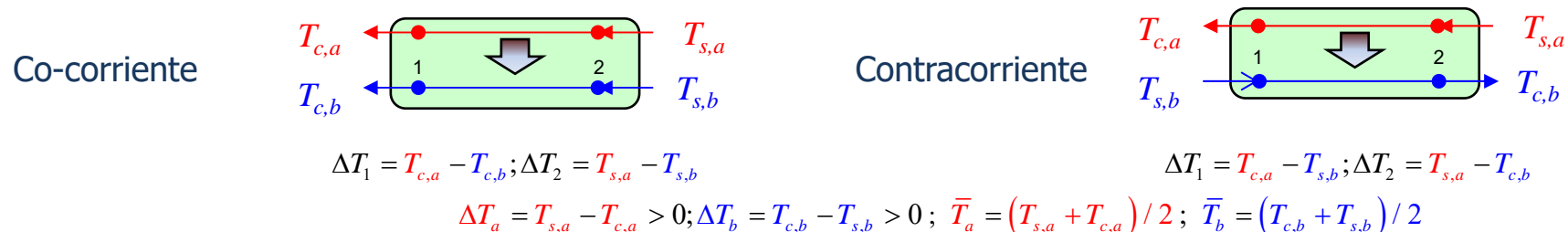
- En la industria se emplea calor a temperaturas muy diversas.
- Para facilitar el suministro es habitual el empleo de aceite térmico, hasta unos 300 °C. Una fuga puede originar un incendio o resultar en un vertido tóxico, por lo que la alternativa es distribuir el calor con vapor de agua (saturado o sobrecalentado) a la presión adecuada, que condensa en el punto de consumo de calor y evapora en el punto de producción. Su gran ventaja es el alto calor latente del cambio de fase, el cual ocurre sin variación de temperatura.
- El aprovechamiento de calores residuales de la industria depende de:
 - Simultaneidad de la producción con la demanda. Si no se da, es necesario recurrir al almacenamiento, incurriéndose en costes adicionales y ocupación de espacio.
 - Diferencia de temperatura suficiente, pues los intercambiadores de calor infringen una caída de temperatura. Su área de transferencia, y por lo tanto el coste, son menores si se dispone de una diferencia de temperatura amplia.
 - La proximidad espacial. Transportar energía térmica a larga distancia es costoso.
- Técnicas eficientes:
 - El calor de proceso puede generarse quemando un combustible, pero una opción más racional es la cogeneración.
 - Las bombas de calor tomando calor del ambiente solo resultan eficientes para calores de proceso a $T < 100$ °C, pues su *COP* disminuye al aumentar el salto térmico del bombeo.
 - El aporte de calor de proceso con energía solar requiere el uso de los captadores adecuados, planos y de tubos de vacío para temperaturas inferiores a 100 °C y captadores de concentración para temperatura superiores, véase **Cap. 8**.

10.5.- Calor de proceso e intercambiadores de calor (cont.) Importante.

- Para transferir calor se emplean intercambiadores de calor. Ponen en contacto dos flujos (a y b) y por diferencia de temperatura entre ambos se produce la transferencia de calor a través de un área de contacto total de referencia A . Sin embargo suelen resultar prácticamente adiabáticos con el exterior. En un estado estacionario la potencia transferida puede modelarse con la diferencia logarítmica media de temperaturas

$$\Delta T_{lm}: \quad \dot{Q}_{a \rightarrow b} = UA \Delta T_{lm} > 0; \quad 0 < \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \approx \underbrace{\bar{T}_a}_{\substack{\text{Temp.} \\ \text{media} \\ 1 \rightarrow 2}} - \underbrace{\bar{T}_b}_{\substack{\text{Temp.} \\ \text{media} \\ 1 \rightarrow 2}} \Rightarrow \underbrace{\text{Conductancia: } C}_{\text{Véase Ejercicio 8.2}} = \frac{\dot{Q}_{a \rightarrow b}}{\bar{T}_a - \bar{T}_b} = \frac{UA \Delta T_{lm}}{\bar{T}_a - \bar{T}_b} \approx UA \quad (10.8)$$

- U [W/(m²K)] es el coeficiente global de transferencia de calor medio entre entrada y salida entre ambas corrientes y es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad de paso de los flujos, las diferencias de temperatura y la turbulencia. Es mayor también para una calidad del flujo mayor y para propiedades del fluido favorables.
 - Con gases, entre ~ 5 y 500 W/(m²K); con líquidos, entre ~ 50 y 5.000 W/(m²K). [More here](#).
- Un extremo (terminal) del intercambiador es 1 y el otro 2. Los flujos (de temperatura alta T_a y baja T_b) pueden ser en igual sentido (ambos de 1 a 2 o de 2 a 1, co-corriente) o a contracorriente (una corriente de 1 a 2 y la otra de 2 a 1), incluso pudieran ser cruzados, o una combinación en intercambiadores complejos.



- Por otro lado, considerando un balance energético para cualquiera de los dos flujos, particularizando para calor específico constante y sin cambio de fase:

$$\dot{Q}_{a \rightarrow b} = \underbrace{\dot{m}_a c_{p,a} \Delta T_a}_{\Delta \dot{H}_a} = \underbrace{\dot{m}_b c_{p,b} \Delta T_b}_{\Delta \dot{H}_b} \quad (10.12)$$

10.6.- Energía geotérmica.

- Empleo del terreno para obtener o inyectar el calor.
- **Obtención de calor:**
 - 1.De alta temperatura.** Se extrae calor en terrenos de zonas activas, produciendo vapor a unos 300 °C para primordialmente generar electricidad con ciclo Rankine.
 - 2.De media y baja temperatura.** Se usa el calor del terreno, $30\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$, a profundidades $> 400\text{ m}$. Se emplea como calor de proceso o para calefacción. Solo en zonas activas, generalmente volcánicas.
- **Obtención y/o inyección de calor, a temperatura muy próxima a la ambiente:**
 - 3.De muy baja temperatura, geotérmica somera,** profundidades $< 400\text{ m}$ y temperaturas $< 30\text{ °C}$. Usado típicamente para bombeo de calor del terreno y de las aguas en invierno, cuando la temperatura ambiente es menor, o como sumidero de calor del acondicionamiento ambiente, por ser la temperatura del terreno menor que la ambiente. Se usan pozos verticales u horizontales de $\sim 100\text{ m}$. En casi cualquier lugar.
 - Almacenamiento estacional.
 - Se basa en la reducida difusión del calor cuando la masa almacenada es muy grande y la difusividad térmica del terreno circundante es baja.
 - Calores residuales o calor solar se pueden almacenar en el terreno durante el verano y usarlo en invierno.
 - Durante el invierno se puede almacenar frío en el terreno (extrayendo calor) para su uso en verano.
- Si la temperatura no resulta adecuada al uso se emplea bomba de calor para adaptarla, con el consiguiente consumo de electricidad.

10.7.- Calor y frío solar

- La irradiancia solar puede ser convertida en calor a temperaturas moderadas, tanto para calefacción, como para acondicionamiento de ambiente interior y para procesos industriales.
 - **Calefacción:** existe el inconveniente de que cuando se necesita calefacción, la irradiancia es mínima, invierno, por lo que se necesita típicamente un área de apertura mayor que la superficie habitada, pues la carga media de calefacción ronda los 100-200 W/m² en latitudes medias ~productividad solar y hacia los polos ésta última es menor, mientras que hacia el ecuador, la necesidad de calefacción disminuye.
 - Calor industrial: agua caliente de limpieza, calor de proceso, etc.. Suele necesitarse calor también en invierno. Generalmente se opta por una sustitución parcial del sistema convencional.
 - **Aire acondicionado:** La sincronía del sol y la demanda de frío es favorable.
- Hay dos vías de actuación:
 - Usar colectores solares térmicos y eventualmente una bomba de calor de sorción $\eta = \eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{GA_a} \approx 0,4$ a 0,5.
 - Usar paneles PV y bomba de calor eléctrica $\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{GA_a} = \eta_{PV} COP \approx 0,15 \times (3 \text{ a } 4) \approx 0,45$ a 0,6
- Las instalaciones van desde calentadores de ACS para viviendas unifamiliares, pasando por instalaciones en hoteles, hospitales y otros edificios públicos, hasta instalaciones del orden de >350 kW_T.
- Acumulado mundial de 480 GW_T en 2019, según [Referencia](#).

10.8 Bibliografía:

- [1] Stein R. S., Powers J. The Energy Problem. ISBN 978-981-4340-31-1. Imperial College Press.
- [2] Crawley G. M. ed. The World Scientific Handbook of Energy. ISBN: 978-981-4343-51-0. 2013. World Scientific Publishing Co.
- [3] Beggs C. Energy - Management, Supply and Conservation (2nd Edition) 2009 ISBN:978-0-7506-8670-9 Electronic ISBN: 978-0-0809-4288-9 By:.. Distribuido por Knovel.
- [4] Herold K. E., Radermacher R. Klein S. A. Absorption Chillers and Heat Pumps. Ed. CRC Press, 1996.
- [6] RHC Platform. Strategic Research and Innovation Agenda for Renewable Heating & Cooling. European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. <http://www.rhc-platform.org/publications/>. 2013.
- [5] RHC Platform. Strategic Research Priorities for Geothermal Technology. European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. <http://www.rhc-platform.org/publications/>. 2012.

10.9.- Cuestiones de autoevaluación.

| | | |
|-------|--|----|
| 10.1 | La producción de agua caliente sanitaria resulta especialmente favorable de producir con energía solar | SI |
| 10.2 | La instalación de dispositivos de producción de ACS en edificios nuevos o rehabilitados es obligatoria en España | SI |
| 10.3 | Para producir ACS solar en España es necesario recurrir a captadores de tubos de vacío, por las bajas temperaturas en invierno | NO |
| 10.4 | El ACS se puede almacenar preparada, hasta su uso | SI |
| 10.5 | Si se radica en una zona donde la helada es posible, no se puede preparar el ACS haciéndola pasar por los captadores. | SI |
| 10.6 | Tomar calor de la atmósfera resulta posible para calefacción, por intermedio de una bomba de calor. | SI |
| 10.7 | Con una bomba de calor se puede lograr habitualmente un COP para calefacción de 3, o incluso superior | SI |
| 10.8 | Dada la temperatura alta de los gases de escape de los motores térmicos, es posible recuperar ese calor residual para aplicaciones de calefacción y calor de proceso | SI |
| 10.9 | La cogeneración conlleva la producción de electricidad que puede inyectarse en la red | SI |
| 10.10 | El calor de refrigeración de un motor alternativo de combustión interna, p. e. un Diésel, también puede usarse para calefacción. | SI |
| 10.11 | El calor de refrigeración de un motor alternativo de combustión interna, p. e. un Diésel, también puede usarse para suministrar a una máquina de absorción de simple efecto. | SI |
| 10.12 | El calor de refrigeración de un motor alternativo de combustión interna, p. e. un Diésel, también puede usarse para suministrar a una máquina de absorción de doble efecto. | NO |

10.9.- Cuestiones de autoevaluación.

| | | |
|-------|--|----|
| 10.13 | La energía geotérmica activa de media y alta temperatura puede usarse directamente como fuente de calor. | SI |
| 10.14 | El almacenamiento estacional en el terreno es útil en instalaciones de uno o algunos chalets unifamiliares. | NO |
| 10.15 | Obtener calor del terreno o de las aguas en invierno con bomba de calor para calefacción es especialmente útil en países fríos. | SI |
| 10.16 | Si se rechaza el calor residual del acondicionamiento de aire al terreno en verano, en invierno conviene tomarlo invirtiendo el funcionamiento de la bomba de calor para evitar la saturación térmica del terreno. | SI |
| 10.17 | El “radiador” de un coche refrigera el motor con un intercambiador agua-aire generalmente. Está dotado de aletas para favorecer la convección con el aire, forzada con un ventilador perpendicularmente a los tubos de agua. ¿Es a flujo cruzado? | SI |
| 10.18 | Al aumentar el área de transferencia en un intercambiador de calor, a resto de parámetros constantes (ceteris paribus) , aumenta la conductancia térmica. | SI |
| 10.19 | El tener que usar la diferencia logarítmica media de temperaturas para calcular la potencia calorífica transferida en un intercambiador de calor se debe a que una corriente se va calentando y otra enfriando progresivamente, por lo que aparecen no linealidades al ser la diferencia de temperaturas variables a lo largo del recorrido de intercambio | SI |
| 10.20 | La “carga”; es decir, en este caso la potencia, de una máquina de absorción se controla simplemente con las tres temperaturas de sus respectivos intercambios con el exterior. | SI |
| 10.21 | La potencia de un motor se puede controlar de dos maneras, con el régimen de giro y con la “carga”, denominada a veces “acelerador”. | SI |
| 10.22 | Un generador eléctrico movido por un motor, convencionales, ha de girar a régimen fijado por la frecuencia de la red a la que está conectado. | SI |

10.10.- Actividades (*ex cursus*)

Actividad 10.2: Busque en Internet fabricantes de máquinas de absorción de H₂O/LiBr. Sugerencias BROAD, CARRIER, HITACHI, LG, SANYO, SHUANGLIANG, THERMAX, TRANE, YAZAKI, Johnson Controls/YORK, Climatewell, Rotartica, SOLARNEXT, McQuay. Describa los tamaños (potencias nominales) disponibles, la fuente de calor que emplean (Llama directa, gases de escape, vapor, agua sobrecalentada o agua caliente), el *COP* según sean de simple efecto, doble efecto, triple efecto (Kawasaki Thermal Engineering) o efecto mitad (solamente teórico) y justifique la razón de ello. Indique la forma de evacuación del calor (condensación por aire o por agua).

Solución: Observando el catálogo de Schuangliang®: www.schaungliang.com todas operan con la disolución H₂O/LiBr donde el agua hace de vapor refrigerante. Por ello no pueden producir frío por debajo de 0 °C:

La versión aparentemente más avanzada es máquina de doble/simple efecto para hacer trigeneración. Aprovecha calor residual de gases calientes (≥ 250 °C y nominalmente 430 °C de entrada y 170 °C de salida) de motores o turbinas de gas, con doble efecto, por lo tanto cabe esperar un *COP* de hasta 1,3.

Simultáneamente consume calor del agua caliente de las camisas de refrigeración de motores alternativos de combustión interna (≥ 98 °C), con simple efecto, ofreciendo la posibilidad de apoyo con poscombustión. Produce nominalmente agua fría a 7 °C, retornando a 12 °C. Cabe esperar para este calor un *COP* de hasta 0,8.

El calor bombeado es evacuado al ambiente en el condensador y absorbedor de la máquina a una temperatura de salida nominal de 34 °C y retorno de 28 °C, por lo que en un clima cálido ha de disponer de torre de refrigeración húmeda, que haga bajar la temperatura del aire por evaporación de agua para facilitar la evacuación del calor, aunque con consumo de agua.

En el modo de calefacción, solo consume calor de gases calientes. El calor del agua caliente del motor se puede consumir directamente y con él produce agua caliente a 60 °C, retornando a 56 °C con un *COP* = 1, pues simplemente actúa de recuperador del calor de la refrigeración del motor.

Están disponibles con capacidades de 99 a 2.646 USRt que son toneladas cortas USA de Refrigeración (toneladas de hielo hielo/día) 1 USRt = 3,517 kW. Luego se ofrecen desde 348 kW hasta 9,3 MW de frío nom.

10.10.- Actividades (*ex cursus*)

Actividad 10.3: Busque en Internet fabricantes de máquinas de absorción de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Sugerencias: APINA/ARANER, COLIBRI-BV, ENTROPIE-SAS, ROBUR, THERMAX, VICOT, PINK, AOSOL, SOLARNEXT, CHILLII. Describa los tamaños (potencias nominales) disponibles, la fuente de calor que emplean (Llama directa, gases de escape, vapor, o agua sobrecalentada o caliente), el COP de refrigeración, el COP de calefacción y justifique la razón de ello. Indique la forma de evacuación del calor (condensación por aire o por agua). Use exclusivamente el espacio reservado en esta cara.

Solución: Consultando el catálogo de Robur® <http://www.robur.com/> se observa:

Ofrecen máquinas de absorción haciendo uso de la disolución $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, donde el NH_3 es el gas refrigerante, actuando el H_2O como disolvente. Solo pueden ser activadas por llama directa de combustible, por lo que la temperatura de consumo del calor es desconocida, pero alta. Como el NH_3 tiene un punto de congelación muy bajo, pueden producir frío bajo cero y pueden instalarse en el exterior sin riesgo de congelación.

El calor a enviar al ambiente actuando como máquina frigorífica, o el calor tomado del ambiente como máquina calorífica se realiza directamente intercambiando con el aire, sin necesidad de torre de refrigeración, con un ventilador integrado. Esto simplifica y abarata la instalación.

Pueden actuar como bombas de calor refrigeradoras con un $COP \approx 0,5$ a $0,65$ (basado en el PCI del combustible) o calefactoras, con un simple cambio de modo operativo, con un $COP \approx 1,5$ a $1,65$ ($0,5$ a $0,65+1$). El calor producido para climatización es a una temperatura baja, $40-60$ °C, por lo que es necesario disponer de suelo radiante o aerotermos de gran superficie de intercambio.

Esta empresa preconiza su uso simultáneamente aprovechando el frío producido para p. e. climatización y el calor evacuado por la máquina sirve para climatizar el agua de una piscina, con lo que el COP conjunto puede llegar a $2 \times (0,5 + 1,5) = 4$.

10.10.- Actividades (cont.) (*ex cursus*)

Actividad 10.4: Localice en Internet el consumo europeo de calor para procesos industriales (palabras de búsqueda: calor de proceso, process heat, residual heat, waste heat, heat valorization) y compárelos con otros consumos energéticos globales y valore el resultado. Considere la temperatura a la que se emplea ese calor. Cite el origen de sus datos. Use exclusivamente el espacio reservado en esta cara.

Solución: En el documento "Key Issues for Renewable Heat in Europe (K4RES-H) Solar Industrial Process Heat – WP3, Task 3.5 Contract EIE/04/204/S07.38607, EUROPEAN SOLAR THERMAL INDUSTRY FEDERATION, 28/06/2006" se afirma "the industrial sector has the biggest energy consumption in the OECD countries at approximately 30%." "In 2000, the energy demand in the EU-15 for industrial process heat up to 250 °C was estimated at about 300 TWh." "In the EU, 2/3 of these 30% consists of heat rather than electrical energy." "The major share of energy, which is needed in commercial and industrial companies for production, processes and for heating production halls, is below 250 °C". "About 50% of the industrial heat demand is located at temperatures up to 250 °C". Finalmente, "Solar heat for industrial processes has a great potential to curb demand for conventional energies and thus to lessen our dependence on imported fuels and to reduce CO₂ emissions."

En el documento "Potential for Solar Heat in Industrial Processes, C. Vannoni, R. Battisti, S. Drigo, IEA, Task 33/IV Potential for Solar Heat in Industrial Processes" se cita "The recent study "ECOHEATCOOL" reports that about 30% of the total industrial heat demand is required at temperatures below 100°C and 57% at temperatures below 400 °C"

Otras fuentes de información:

<http://www.rhc-platform.org/press/news/news-singleview/browse/2/article/solar-thermal-energy-expanding-into-industrial-processes/>

<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/02/kick-starting-solar-process-heat-in-europe>

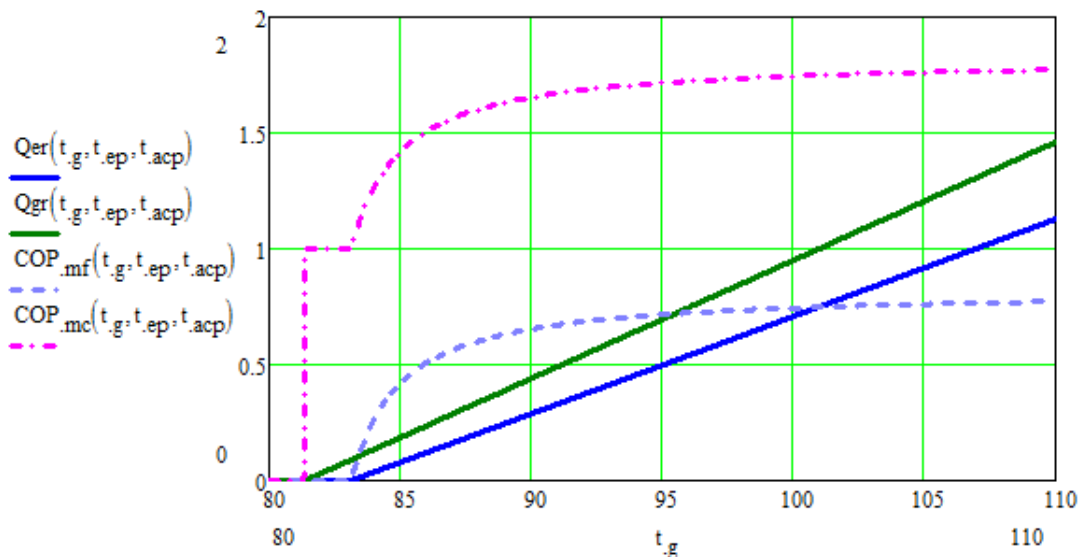
<http://www.euroheat.org/Heat-Roadmap-Europe-165.aspx>

10.10.- Actividades (cont.).

Actividad propuesta 10.5: A) Haciendo uso de las Ecs. (10.7) dibuje las gráficas del COP de la máquina de absorción, como máquina frigorífica y como máquina calorífica, en función de t_g . Particularice para temperatura media exterior a la máquina $t_e = 4\text{ °C}$ y evacuación seca al ambiente $t_{amb} = 30\text{ °C}$, con un salto térmico en la evacuación de 7 °C . B) Determine la temperatura media mínima de activación $t_{g,min}$ que hace $\dot{Q}_e > 0$ y $t_{g,nom}$ a la cual se alcanza la potencia nominal. C) Determine ambos COP máximos asintóticos. D) Descubra que por encima de un cierto valor de t_g no aumenta la eficiencia apreciablemente, aunque sí la potencia. E) ¿Qué tipo de captador solar resultaría adecuado para activar esta máquina?. F) Compare esta tendencia con la de dos máquinas de Carnot en serie: un motor térmico entre T_g y T_{ac} cuyo trabajo (exergía) mueve internamente una bomba de calor entre T_e y T_{ac} .

Solución: Se asumen iguales temperaturas, tanto para máquina frigorífica como calorífica, aunque esta última suele bombear hasta temperaturas más altas. A) Valores particularizados, $t_{ac,p} = t_{amb} + 7\text{ °C} = 37\text{ °C}$; $t_{e,p} = 4\text{ °C}$. La gráfica muestra las potencias relativas (\cdot) a la potencia nominal de refrigeración $\dot{Q}_{e,nom}$. B) A partir de $t_g = 81,5\text{ °C}$ se degrada el calor de generación hacia t_{amb} hasta que se alcanza $t_{g,min} = 83\text{ °C}$

, en que la máquina empieza a bombear. La potencia nominal de frío se alcanza para $t_{g,nom} = 107\text{ °C}$.



$$C) t_g = \infty \rightarrow COP_{mf,max} = \frac{0,042}{0,051} = 0,82$$

$$COP_{mc,max} = 0,82 + 1 = 1,82$$

D) Según el modelo, las potencias crecen linealmente sin límite (aunque la máquina se satura en un cierto punto) y los COP apenas crecen por encima de $t_g \approx 95\text{ °C}$.

E) Podrían valer colectores planos de alta eficiencia o de tubos de vacío.

F) Se desarrolla a continuación ...

10.10.- Actividades (cont.).

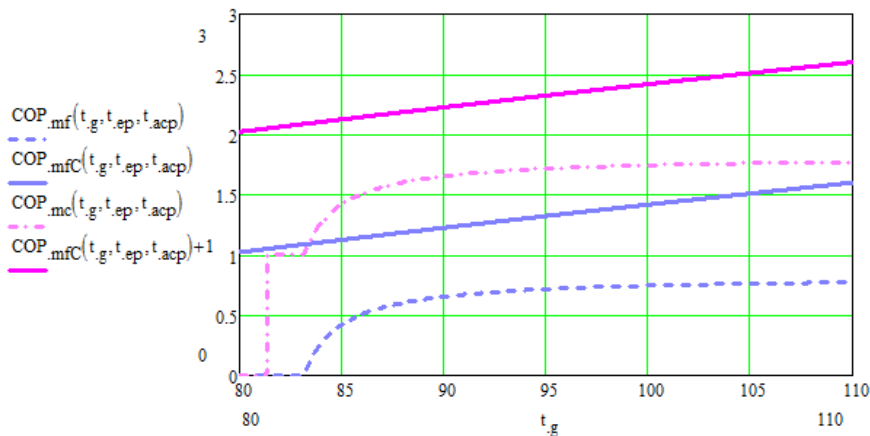
Actividad propuesta 10.5: (Cont.) F) Compare esta tendencia con la de dos máquinas de Carnot en serie: un motor térmico entre T_g y T_{amb} cuyo trabajo (exergía) mueve internamente una bomba de calor entre T_e y T_{amb} .

Solución: Al disponerse un motor térmico, de Carnot, entre t_g y t_{ac} y una bomba de calor, de Carnot, entre t_e y t_{ac} , movida por la potencia del motor W , el COP del conjunto es el producto de ambos rendimientos $COP = \eta_C COP_C$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Motor térmico de Carnot,} \\ \eta_C = \frac{W}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{Q}_g - \dot{Q}_{ac}}{\dot{Q}_g} \\ \Delta S = 0 \rightarrow \frac{\dot{Q}_g}{T_g} = \frac{\dot{Q}_{ac}}{T_{ac}} \end{array} \right\} \eta_C = \frac{T_g - T_{ac}}{T_g}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Bomba de Carnot} \\ COP_{mf,C} = \frac{\dot{Q}_e}{W} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_{ac} - \dot{Q}_e} \\ \Delta S = 0 \rightarrow \frac{\dot{Q}_e}{T_e} = \frac{\dot{Q}_{ac}}{T_{ac}} \end{array} \right\} COP_{mf,C} = \frac{T_e}{T_{ac} - T_e}$$

$$\rightarrow COP = \eta_C COP_{mf,C} = \frac{T_g - T_{ac}}{T_g} \frac{T_e}{T_{ac} - T_e} = \frac{t_g - t_{ac}}{T_g} \frac{T_e}{t_{ac} - t_e}$$



La figura muestra que el modelo de Carnot, sobreestima el COP_{mf} en casi un 100%. No predice la temperatura mínima de activación, ni predice el estancamiento del COP a t_g elevadas. Sin embargo, si se considera el 50% de lo predicho por Carnot, no está tan mal.