

Ciclos de Carnot y rendimiento frigorífico

Raúl Ortiz Pérez ¹

Resumen

Se analizan las características del tratamiento que hacen de los ciclos refrigerantes reversibles (CRR), los libros más usados por los alumnos de ingenieros que cursan Física. Se presenta un método de obtención de las fórmulas para la eficiencia de CRR que funcionan entre 2, 3 y 4 fuentes térmicas que se basa en la utilización de las leyes fundamentales de la Termodinámica y que por tanto puede discutirse con los futuros ingenieros desde que reciben la disciplina de Física.

Abstract

The characteristics of the treatment of the reversible refrigerating cycles (RRC) according to most books used by engineering students during their Physics courses, is analyzed. One method to obtain the formulas for the efficiency of RRC that work between 2, 3 and 4 thermic sources, which is based on the fundamental Thermodynamic laws and

so may be discussed with the future engineers when they receive the Physics discipline, is presented.

Introducción

Desde los albores del desarrollo de la tecnología industrial ha existido la preocupación de realizar la explotación de las maquinarias en la forma más eficiente posible desde el punto de vista energético; es decir, la obtención de una máxima cantidad del producto deseado a partir de un mínimo en el correspondiente consumo de energía.

En la actualidad, de acuerdo con los efectos de la crisis energética mundial, cobra aún más relevancia el estudio de los aspectos termodinámicos esenciales relaciones con los procesos que tienen lugar en los sistemas tecnológicos que consumen cantidades considerables de energía, a fin de lograr la explotación de estos en condiciones de máxima eficiencia energética.

¹ Departamento de Física, Universidad de Camagüey. Carretera de Circunvalación km 55, Camagüey 74650, Cuba.

Un ejemplo notable en este sentido viene dado por las llamadas instalaciones frigoríficas. Estas existen en gran número y diversidad de escalas (desde el pequeño refrigerador doméstico hasta las enormes enfriadores industriales) y resultan estar entre los mayores consumidores de energía en el contexto social.

Para lograr un trabajo energéticamente eficiente de dichos sistemas, es imprescindible contar con una actitud activa y competente ante esta problemática por parte de los profesionales vinculados con el diseño y la explotación de las citadas instalaciones.

La disciplina de la Física que reciben los estudiantes de ingenierías constituye la fuente primaria de conocimientos científicamente fundamentados; sobre las regularidades de aquellos procesos termodinámicos que posteriormente este tendrá que enfrentar; cuando ya como profesional tenga que dar respuestas a tareas como las anteriormente planteadas. Dentro de esta disciplina, especial importancia adquiere el estudio de los procesos que son el fundamento teórico del funcionamiento de las ya citadas instalaciones frigoríficas; a saber, los denominados ciclos refrigerantes reversibles (CRR).

Este trabajo se propone mostrar las principales deficiencias que existen en el manejo de dichos temas en la bibliografía típica que para estos fines usa el alumno universitario; así como exponer una forma de presentar estos aspectos que se basa en la utilización de las leyes fundamentales de la termodinámica y que por tanto puede ser utilizada desde los cursos de Física.

Los CRR en la bibliografía típica de la Física universitaria

Al hacer revisión de la forma en que aparecen tratados los aspectos relacionados

con los CRR en los diferentes materiales que son los de más común uso por el alumno de ingenierías que cursa la Física, se puso atención a tres elementos fundamentales.

- a) Definición de CRR y de su eficiencia COP (al menos para el caso de dos fuentes térmicas).
- b) Obtención de la expresión del COP en función de las temperaturas de las fuentes y análisis de la influencia de cada una de las temperaturas en dicha eficiencia.
- c) Generalización de lo planteado en los incisos a y b al caso de tres y cuatro fuentes térmicas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se encuentra que es posible clasificar la bibliografía consultada en tres grupos fundamentales:

- Libros de indudable calidad para el estudio de toda una diversidad de temas importantes dentro de la termodinámica (1, 2, 3, 4) y que, sin embargo, omiten por completo lo relacionado con los CRR en la forma citada en los incisos a, b y c.
- Libros que llegan hasta obtener la expresión del COP para el caso del CRR que trabaja entre dos fuentes térmicas (refrigerador de Carnot) (5, 6, 7, 8, 9), pero que no realizan ningún análisis ni con respecto a los valores posibles de esta eficiencia, ni de la influencia en ella de la temperatura de las diferentes fuentes térmicas. Cabe agregar que con iguales características se encuentran otros libros de reconocido prestigio y que pertenecen al fondo bibliográfico de asignaturas de mayor grado de especialización técnica (10, 11, 12).
- Libros que a las características apuntadas en el apartado 1.2, le agregan solo pequeñas frases tales como: "el COP puede ser mayor del 100%; pero sin un análisis detallado como se ha citado anteriormente (13, 14, 15).

Es importante notar que tanto en toda la bibliografía citada en los apartados anteriores como en otros buenos libros

que se consideran de especialización técnica (16, 17, 18); existe completa ausencia del análisis relacionado con la eficiencia de CRR que trabajan en presencia de tres y cuatro fuentes térmicas. Estos últimos casos (con 3 y 4 fuentes) son de gran importancia, pues contribuyen a formar la base teórica de máquinas refrigerantes que modernamente son diseñadas y construidas (19, 20) con el objetivo de obtener enfriamiento a partir de fuentes alternativas de energía y hacen uso de procesos de absorción y adsorción.

Como una forma posible de resolver las dificultades que presenta la bibliografía anteriormente citada, en los apartados siguientes se expone un tratamiento adecuado de los aspectos relacionados con la eficiencia de los CRR, que puede ser incluido tanto dentro de los cursos de la Física general para ingenierías como en cursos de mayor nivel de especialización.

Los CRR que funcionan entre dos fuentes térmicas

Definiendo inicialmente la eficiencia frigorífica o coeficiente de comportamiento para estas condiciones COP₂ como:

$$\text{COP}_2 = - \frac{Q_{\text{abs}}}{W_{\text{net}}} \quad (1)$$

y haciendo uso de la primera y segunda ley de la termodinámica se puede plantear que:

$$W_{\text{net}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{ced}} \quad (2)$$

$$\frac{Q_{\text{abs}}}{T_{\text{abs}}} = \frac{Q_{\text{ced}}}{T_{\text{ced}}} \quad (3)$$

de donde se obtiene la expresión para el COP₂ en función de las temperaturas:

$$\text{COP}_2 = \frac{T_{\text{abs}}}{T_{\text{ced}} - T_{\text{abs}}} \quad (4)$$

Es importante desde este momento discutirle al alumnado como esta eficiencia, a diferencia de lo obtenido para el caso del motor térmico de Carnot, puede tomar valores entre cero e infinito, sin violar con ello la ley de conservación de la energía.

Debido a que en la fórmula (4) se aprecia que la mayor influencia sobre el COP₂ la tiene T_{abs} y considerando además que en numerosos casos prácticos la T_{ced} representa a la temperatura del medio ambiente, la cual solo sufre pequeñas variaciones, conviene obtener los gráficos de la Figura 1, que muestran como varía el COP₂ en función de la T_{abs}, usando como parámetro la T_{ced}.

En todos los casos de la Figura 1 se toman valores de T_{abs} desde el 0 °C hasta (T_{ced}-2) ya que, como se observa, no hay diferencias apreciables en el COP₂ para T_{abs} inferiores a 273 k. Es importante destacar que, si bien siempre que una de estas dos temperaturas se mantenga fija, un aumento de la eficiencia COP₂ vendrá dado por una elevación de la T_{abs} o una disminución de T_{ced} (o sea disminuir la diferencia entre dichas temperaturas); algo distinto ocurre cuando lo que se conserva invariable es la diferencia entre las temperaturas, pues en ese caso según se observa muy fácilmente en los puntos extremos de las curvas de la Figura 1, el COP₂ experimenta un aumento del 3,3% al elevar la T_{ced} de 30 a 40 °C. Este último resultado es particularmente importante para

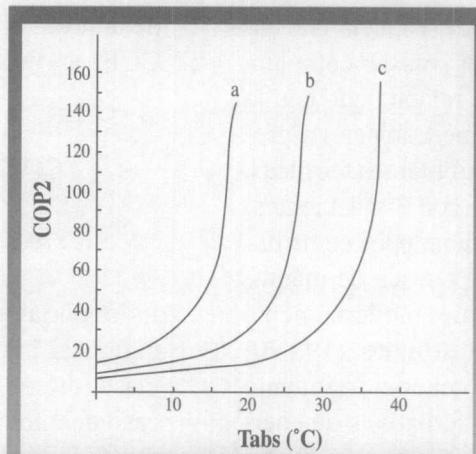


Figura 1

Eficiencia frigorífica del ciclo reversible que trabaja entre 2 fuentes térmicas. El parámetro es la temperatura superior del ciclo (T_{ced}); a: $T_{ced}=20$, b: $T_{ced}=30$ y c: $T_{ced}=40$ C

ciclos que operan en condiciones de las llamadas bombas de calor.

Los CRR que funcionan entre tres fuentes térmicas

Este tipo de ciclo se relaciona con máquinas de interés práctico como la de las instalaciones frigoríficas que trabajan consumiendo energía solo en forma de calor y usando el proceso de absorción de los vapores del refrigerante sobre cierto líquido. En estas condiciones, el sistema absorbe calor de una fuente de baja temperatura y cede calor a una temperatura intermedia, en virtud de la energía calorífica que recibe de la tercera fuente que posee la temperatura más alta.

Procediendo de forma análoga a lo realizado en el apartado 3, se pueden hacer los siguientes planteamientos:

$$COP3 = \frac{Q1}{Q3} \quad (5)$$

$$Q1 + Q3 = Q2 \quad (6)$$

$$\frac{Q1}{T1} = \frac{Q3}{T3} = \frac{Q2}{T2} \quad (7)$$

Operando a partir de las expresiones (5, 6 y 7), se obtiene la correspondiente eficiencia en función de las temperaturas de las fuentes:

$$COP3 = \frac{T1}{(T2-T1)} \cdot \frac{(T3-T2)}{T3} \quad (8)$$

La Figura 2 muestra la variación del COP3 en función de la temperatura $T3$ de la fuente de energía térmica, gracias a la cual trabaja cíclicamente una de estas máquinas y que en la práctica puede ser la radiación solar, una llama de biogás, etc. Como parámetro se maneja tanto la temperatura más baja $T1$, como la intermedia $T2$, siendo esta última en la

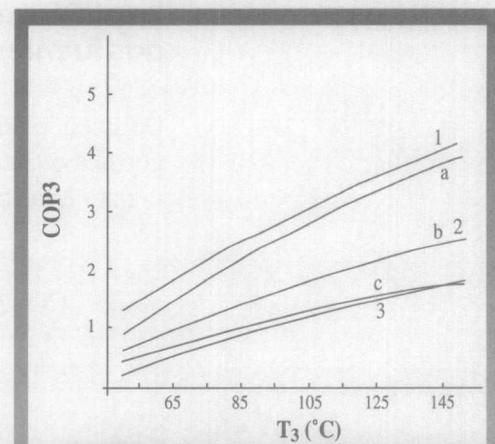


Figura 2

Eficiencia frigorífica del ciclo reversible que trabaja entre 3 fuentes térmicas. Son parámetros tanto la temperatura más baja del ciclo ($T1$) como la temperatura intermedia ($T2$); a: $T1=10$, b: $T1=0$ y c: $T1=10$ C, mientras que 1: $T2=20$, 2: $T2=30$, y 3: $T2=240$ C

mayoría de los casos prácticos la temperatura del aire atmosférico.

Se puede notar gráficamente que: siempre que dos cualquiera de las temperaturas se mantengan fijas, para aumentar la eficiencia es necesario aumentar ya sea T_1 o T_3 , o reducir T_2 .

Con relación al efecto relativo de las diferentes temperaturas también se puede apreciar que a una T_3 fija (por ejemplo $100\text{ }^\circ\text{C}$) un incremento de T_1 desde 0 hasta $10\text{ }^\circ\text{C}$ produce un aumento en la eficiencia de $56,5\%$; mientras que la disminución de T_2 desde 30 hasta $20\text{ }^\circ\text{C}$; eleva el COP_3 en un $72,4\%$, por lo cual se pone de manifiesto la gran sensibilidad de esta eficiencia a los valores de T_2 .

Por otro lado, vale notar que la Figura 3 se obtiene en condiciones semejantes a las válidas para la Figura 1; haciendo uso tanto de la analogía existente T_1 y T_{abs} , como entre T_2 y T_{ced} .

Resulta interesante como en la Figura 3, inversamente a lo que se obtiene en la Figura 1, al mantener fija la diferencia

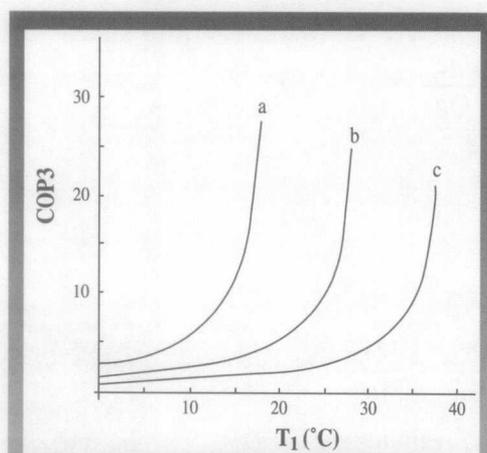


Figura 3
Eficiencia frigorífica del ciclo reversible que trabaja entre 3 fuentes térmicas. El parámetro es la temperatura intermedia (T_2); a: $T_2=20$, b: $T_2=30$ y c: $T_2=40\text{ }^\circ\text{C}$

de temperatura T_2-T_1 , la eficiencia disminuye al aumentar la T_2 . Esto es particularmente fácil de observar en los puntos extremos de las curvas donde para el caso de un ascenso en la T_2 desde 30 hasta $40\text{ }^\circ\text{C}$ la eficiencia disminuye en un 14% . Para una explicación relativamente sencilla de la influencia que ejercen las diferentes temperaturas sobre la eficiencia del CRR que opera entre 3 fuentes, es conveniente reconocer como la expresión de esta eficiencia, según (8) resulta ser el producto de dos eficiencias parciales: la eficiencia de un refrigerador que opera entre dos fuentes (primer corchete de la ecuación (8)) y la eficiencia de un motor térmico que también trabaja entre dos temperaturas (segundo corchete de la ecuación (8)).

A partir del análisis anterior, no es difícil entender la gran influencia que ejerce sobre el aumento del COP_3 una reducción del T_2 , ya que dicha disminución eleva la eficiencia del "refrigerador bifuente componente" (al reducir la diferencia de temperatura T_2-T_1); a la vez que eleva también la eficiencia del "motor bifuente componente" (al aumentar la diferencia de temperatura T_3-T_2).

También con ayuda de esta vía se explica la aparente contradicción entre la Figura 1 y la Figura 3. Ocurre que en la figura 3 la eficiencia del refrigerador bifuente componente con diferencia de temperaturas constante, realmente aumenta al incrementarse la temperatura superior (en este caso T_2), de forma semejante a lo que se ve en la Figura 1; sin embargo, como al ascender T_2 se disminuye simultáneamente la diferencia de temperaturas del motor bifuente componente y dicha disminución resulta mayor, es por ello que el efecto resultante es una disminución del COP_3 . Como ejemplo de lo anterior se tiene que para los puntos extremos de las curvas de la Figura 3 un aumento de T_2 desde 30 hasta 40° hace que el refrigerador

bifuernte aumente su eficiencia en un 3%, mientras que la eficiencia del motor bifuernte disminuye en un 17%, por lo que el efecto neto de disminución en COP3 es del 14%.

Los CRR que funcionan entre cuatro fuentes térmicas

Estos ciclos forman parte de la descripción teórica de ciertos sistemas que modernamente han sido muy investigados y que se les conoce como refrigeradores de adsorción. Estos sistemas trabajan alternando dos etapas llamadas de adsorción y de desorción. Durante la primera de estas se absorbe calor a baja temperatura y se cede calor a una temperatura llamada adsorción; mientras que en la segunda de dichas etapas, la energía gracias a la cual opera cíclicamente este dispositivo, es absorbida en forma de calor a la más alta temperatura del ciclo, llegándose además a liberar calor a una temperatura de condensación.

A partir de consideraciones análogas a las de los apartados 3 y 4, se pueden hacer los planteamientos siguientes:

$$\text{COP4} = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (9)$$

$$Q_e + Q_g = Q_c + Q_a \quad (10)$$

$$\frac{Q_g}{T_g} = \frac{Q_c}{T_c} \cdot \frac{Q_e}{T_e} = \frac{Q_a}{T_a} \quad (11)$$

Operando con las expresiones de la (9) a la (11) se obtiene la fórmula de la eficiencia para este caso en función de las temperaturas de las fuentes:

$$\text{COP4} = \frac{T_e}{(T_a - T_e)} \cdot \frac{(T_g - T_c)}{T_g} \quad (12)$$

La Figura 4 muestra la variación de esta eficiencia en función de la temperatura T_g de la fuente de alimentación de energía de estos aparatos, la que —como ya se citó— puede ser radiación solar, etc. Se usan como parámetros la temperatura de la fuente fría y la de adsorción, mientras que la de condensación se mantiene constante por ser esta en la mayoría de los casos prácticos, la correspondencia al aire atmosférico diurno.

Se puede observar que, manteniendo fijas las restantes temperaturas, el COP4 aumenta al elevar la temperatura más alta T_g y más baja T_e , así como al disminuir la temperatura intermedia T_a .

Es importante notar que también para el caso del CRR de 4 fuentes, es posible la interpretación de su eficiencia según fórmula (12) como el producto de dos eficiencias parciales: la de un refrigerador bifuernte (primer corchete en (12)) y la

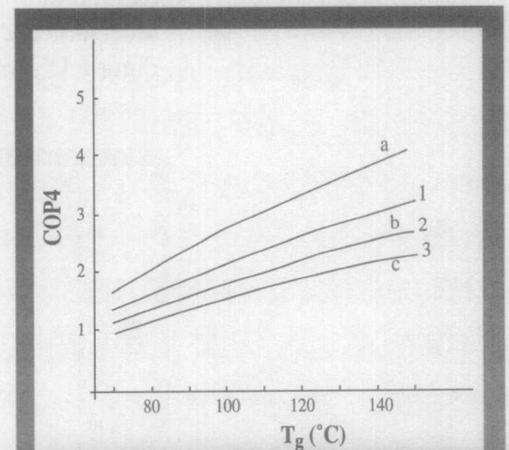


Figura 4

Eficiencia frigorífica del ciclo reversible que trabaja entre 4 fuentes térmicas. Son parámetros tanto la temperatura más baja del ciclo (T_e) como la temperatura de adsorción (T_a), Manteniéndose constante la temperatura de condensación ($T_c=30,C$); a: $T_e=10$ y $T_a=T_c$, b: $T_e=0$ y $T_a=T_c$, c: $T_e=10$ y $T_a=T_c-6$; 1: $T_a=T_c-5$, 2: $T_a=T_c$ y 3: $T_a=T_c+5$. En 1, 1 y 3 se toma $T_e=0 C$

de un motor bifuente (segundo corchete en (12)), con la diferencia respecto a lo visto en el apartado 4, de que la temperatura inferior del motor bifuente componente no es la misma que la temperatura superior del refrigerador bifuente componente.

Con la anteriormente citada interpretación del COP4, a través de eficiencias parciales, se puede dar sencilla explicación a la influencia que en la eficiencia resultante tiene la temperatura de cada fuente. En especial ha de notarse que en la Figura 4 se manifiesta que manteniendo fijas la temperatura más alta del ciclo y la de condensación, tanto una disminución en la temperatura de adsorción como un incremento en la temperatura mínima del ciclo, producen efectos de aumento en el COP4.

Aunque en la Figura 4 las variaciones tomadas en la T_a y en la T_e no son numéricamente iguales (ya que no son válidas temperaturas de adsorción superiores a la de condensación para los casos de temperaturas T_g bajas), realmente se cumple que ante variaciones de igual valor absoluto en dichas temperaturas, se obtienen incrementos del COP4 que son completamente similares. Como ejemplo de lo anterior, se tiene que: si $T_g = 100\text{ °C}$ y $T_c = 30\text{ °C}$, una disminución de la T_a desde 30 hasta 20 °C, una disminución de la T_e desde 30 hasta 20 °C eleva el COP4 en un 50% y un incremento de la T_e desde 0 hasta 10 °C aumenta la eficiencia en un 54%.

La diferencia de lo descrito en el párrafo anterior con respecto a lo que ocurría en el caso de una disminución de la T_2 para el caso de COP3, se explica por el hecho de que en el ciclo de 4 fuentes los ciclos bifuentes componentes son tales que la temperatura superior del refrigerador componente T_a no es la misma

que la temperatura inferior del motor componente T_c .

La Figura 5 muestra la acción que ejerce en el COP4 la temperatura de adsorción cuando ella está influida como sucede en varias aplicaciones prácticas, por la temperatura del aire atmosférico nocturno. Se nota que conforme más alta sea la T_e , es también mayor la conveniencia de operar estos sistemas con valores bajos de la T_a .

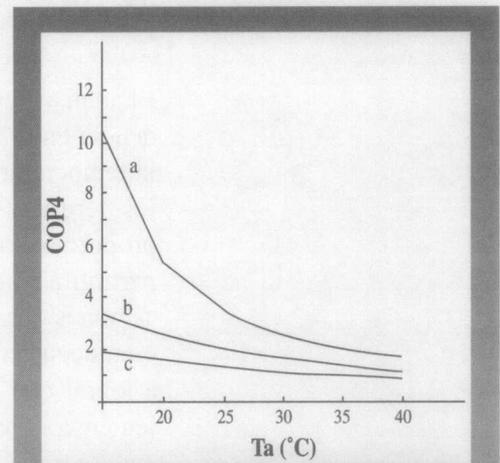


Figura 5

Eficiencia frigorífica del ciclo reversible que trabaja entre 4 fuentes térmicas. Se toman constantes la temperatura más alta del ciclo ($T_g = 100\text{ °C}$) y la de condensación ($T_c = 30\text{ °C}$). El parámetro es la temperatura más baja del ciclo (T_e); a: $T_e = 10$, b: $T_e = 0$ y c: $T_e = 10\text{ °C}$.

Conclusiones

La clasificación realizada ilustra como en una buena cantidad de libros de prestigio que usan los alumnos de ingenierías, existen insuficiencias importantes en lo referente al manejo de las principales características de los ciclos refrigerantes reversibles. En particular, se revela que aun en libros de superior grado de especialización técnica se omite completamente lo

relacionado con los CRR que operan 3 y 4 fuentes térmicas, siendo estos últimos de gran importancia para la comprensión de los principios de funcionamiento de los modernos sistemas de enfriamiento a base de procesos de absorción y adsorción.

El método mostrado para la obtención de las fórmulas de las diferentes eficiencias, por ser sencillo y basarse en las leyes fundamentales de la termodinámica puede ser discutido con los futuros ingenieros desde que estos cursan la disciplina de la Física.

El análisis realizado acerca de la dependencia entre la eficiencia de los CRR y la temperatura de cada una de sus fuentes térmicas aporta conclusiones que proporcionan el fundamento teórico que permitirá al futuro profesional realizar acciones durante el diseño o la explotación de sistemas refrigerantes, dirigidas a lograr que dichas instalaciones trabajen en condiciones de alta eficiencia, lo cual se traduce en una apreciable economía de los recursos energéticos que son hoy día tan valiosos para cualquier país.

Nomenclatura

CRR: ciclo refrigerante reversible
COP#: eficiencia frigorífica del CRR con número # de fuentes

- a) Para el CRR con 2 fuentes:
T_{abs}: temperatura absoluta inferior del ciclo
T_{ced}: temperatura absoluta superior del ciclo
Q_{abs}: calor absorbido de la fuente de temperatura inferior
Q_{ced}: calor cedido a la fuente de temperatura superior
W_{ne}: trabajo neto asociado al ciclo completo
- b) Para el CRR con 3 fuentes:
T₁: temperatura absoluta más baja del ciclo

- T₃: temperatura absoluta alta del ciclo
T₂: temperatura absoluta intermedia del ciclo
Q₁: calor absorbido de la fuente a temperatura T₁
Q₃: calor absorbido de la fuente a temperatura T₃
Q₂: calor cedido a la fuente a temperatura T₂

c) Para el CRR con 4 fuentes:

- T_e: temperatura absoluta más baja del ciclo
T_g: temperatura absoluta más alta del ciclo
T_a: temperatura absoluta de adsorción
T_c: temperatura absoluta de condensación
Q_e: calor absorbido de la fuente a temperatura T_e
Q_g: calor absorbido de la fuente a temperatura T_g
Q_a: calor cedido la fuente a temperatura T_a
Q_c: calor cedido la fuente a temperatura T_c

Bibliografía

- Alonso, M. And Finn, E.J. *Fundamental University Physics*, Addison-Wesley, EE. UU. 1980.
- Landau, L. et al. *Curso de Física general (mecánica y física molecular)*, 2^{da}. Edi., Mir., Moscú 1979.
- Frish S. y Tomoreva, A. *Curso de Física general T-1*, Mir, Moscú, 1973.
- Kikoin, A.K. y Kikoin, I.K. *Física molecular*, 2^{da}. Ed., Mir, Moscú, 1979.
- Halliday, D., Resnick, R. Et. Al., *Fundamentals of Physics*, 2nd. Ed., John Wiley, U.S.A., 1981.
- Sears, F.W. y Zemansky, M.W. *Física general*, 10 ma. reimp. Ciencia y Técnica, La Habana, 1969.
- Saveliev, I.V. *Curso de Física general T-1*, Mir, Moscú, 1984.
- Ferrat, A. et al. *Mecánica y física molecular*, Pueblo y Educación, La Habana, 1988.

- Dpto. de Física, Universidad Habana, *Introducción a la Física molecular y termodinámica*, Universidad Habana, 1972
- Kirillin, V.A. et al. *Termodinámica técnica*, Mir, Moscú, 1986
- Koshkin, N.N. *Máquinas frigoríficas*, Mir, Moscú, 1981.
- Sushkov, V. *Termodinámica técnica*, Mir, Moscú, 1971.
- Arfken, G.B. et al. *University Physics*, Acad. Press., EE. UU., 1984.
- Sears, F.W. *Termodinámica*, Reverté, Madrid, 1974.
- Yavorski B.M. y Pinski, A.A. *Fundamentos de Física T-1*, Mir, Moscú, 1983.
- Keenan, J.H. *Thermodynamics*, Edit. Revolucionaria; La Habana, 1966.
- Baskakov, A.P. *Termotecnica*, Mir, Moscú, 1985.
- Jones J.B. and Hawkins, G.A. *Engineering thermodynamics*, Edit. Revolucionaria, La Habana, 1981.
- Mathur, G.D. *Heating Piping Air Conditioning*, Vol. 61, N° 11, pp. 103-108, 1989.
- Pons M. And Guillemot. *J.J. of Solar Energy Engineering*, vol. 108, pp. 332-337, 1986.