

---

## CONSIDERACIONES DIDÁCTICAS SOBRE UNA MÁQUINA TÉRMICA ESTÁTICA

Gago, Luis A.; Stark, Natalia S.; Mongelli, Marcelo.

Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Pampa.  
Lgago2001@yahoo.com.ar.

### RESUMEN

El recurso que posibilita este trabajo es una "caja de eficiencia térmica", cuya operación está basada en los efectos Peltier y Seebeck sobre un módulo semiconductor. Se presenta aquí un conjunto de experiencias destinadas a fortalecer la noción de máquina térmica y se indaga sobre sus posibilidades didácticas y sobre la conveniencia de su utilización.

La información que se obtiene permite determinar el rendimiento real de una máquina térmica y compararlo con el rendimiento ideal de Carnot. El módulo termoeléctrico se puede hacer funcionar, también, como bomba de calor o máquina frigorífica. Constituyendo, así mismo, una oportunidad para integrar principios fundamentales en termodinámica clásica.

Mediante un estudio detallado se determinan cuales son las pérdidas de calor producidas y se evalúan. Se pueden analizar conceptos relacionados a termoelectricidad, transferencia de calor, entropía, exergía. Representando, así mismo, una instancia donde se trabaja en la medición de parámetros eléctricos en CC, en la medición de temperaturas, y en la incertidumbre de mediciones.

Finalmente, se observa que el dispositivo consigue despertar el interés de los estudiantes, y favorece diversos procesos de enseñanza aprendizaje. Por todas esas razones, se concluye en destacar las posibilidades didácticas de este recurso y se intenta compartir su conocimiento.

Palabras clave: máquinas térmicas, efecto Peltier, didáctica, laboratorio.

### INTRODUCCIÓN

Se observa una tendencia dominante a nivel mundial en cuanto a basar en competencias la formación y el aprendizaje [1]. Este nuevo enfoque de la formación profesional constituye una oportunidad para dar respuesta a los desafíos emergentes de escenarios sociales y educativos cada vez más complejos y demandantes con la enseñanza superior. Una disminución de las

---

---

tares rutinarias y un aumento de las destrezas de alto nivel intelectual, demandarán al futuro profesional una comprensión clara y conocimientos firmes, de modo que pueda comprender incluso los problemas más complejos, formularlos e interpretar sus resultados [5].

Desde muy diversos ámbitos se señala que los planes de estudio deben privilegiar la formación antes que la información, y se asume que la enseñanza debe estar más centrada en el estudiante, en el acompañamiento tutorial, en el fomento de competencias. En ese sentido, el aprendizaje activo [2] y la enseñanza para la comprensión [3], aparecen como modelos a tener en cuenta en el momento de planificar la enseñanza.

En nuestro ámbito, mediante técnicas de investigación acción [4], se desarrolló con sentido crítico una investigación sobre nuestras fortalezas y debilidades. Se mostró, en consecuencia, que la formación propuesta a los estudiantes en cursos precedentes, presenta deficiencias en competencias prácticas [1]. Competencias, por otra parte, valoradas por los procesos de acreditación de las carreras de ingeniería, en el Accede, o en el Abet\* (un referente internacional). A partir de esos resultados, al diseñar los nuevos planes de enseñanza para la materia, se ha procurado introducir estrategias que contribuyan a una formación en ese sentido.

Este trabajo resume una de esas propuestas: se recurre al uso de dispositivos de laboratorio para complementar el estudio de las máquinas térmicas, y se analiza en consecuencia si los cambios introducidos producen las mejoras esperadas.

Se comentan aquí las experiencias realizadas en los cursos 2008 y 2009, con una máquina térmica estática y se analizan alternativas de trabajo que pueden enriquecer su implementación en próximos cursos.

El grupo de tareas que posibilitó su aplicación corresponde a estudiantes de tercer año de una carrera de ingeniería. Destacando que, según el plan de estudios vigente, los contenidos de una física del calor, se introducen a través de una Química General y este curso de Termodinámica.

## MÁQUINA TÉRMICA

En el estudio que aquí se presenta, se utiliza un “Módulo Pasco de Eficiencia Térmica” [6]. El módulo permite, en principio, desarrollar las siguientes experiencias:

- Máquina Térmica y Diferencia de Temperatura.

---

\* ABET: Accreditation Board for Engineering and Technology. Es un consejo de acreditación reconocido por la Secretaría de Educación de los Estados Unidos de Norteamérica como la institución que evalúa y acredita programas de ingeniería, computación y tecnología, en la que la IEEE tiene una gran participación.

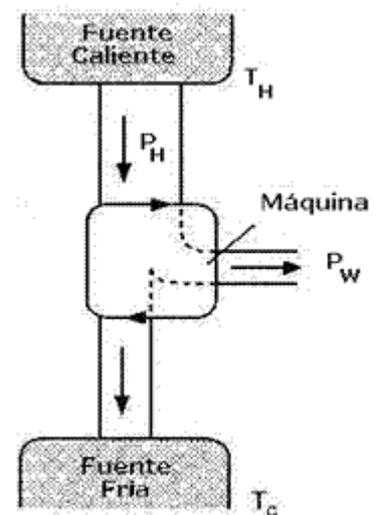
---

- Rendimiento de una Máquina Térmica (Estudio detallado).
- Eficiencia de una Bomba de Calor.
- Máquina Térmica – Carga para un óptimo desempeño.
- Termoelectricidad. Efectos Seebeck y Peltier.
- Conductividad Térmica.

Sin embargo, como se indica más adelante, las prácticas originalmente previstas, pueden ser relacionadas con otras actividades, enriqueciendo así las posibilidades didácticas del módulo.

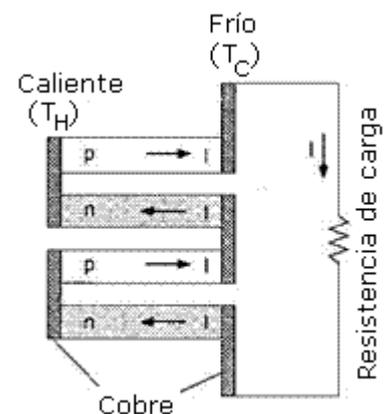
Una máquina térmica está compuesta por dos fuentes y un fluido intermediario que, operando cíclicamente, recibe calor de la fuente caliente, transforma una fracción en trabajo y el resto lo deposita en la fuente fría. [5]

En el módulo, la fuente caliente se integra por una resistencia alimentada mediante una fuente de tensión CC; la fuente fría se forma mediante un baño de agua helada, circulada través del dispositivo con una bomba interna. Un módulo semiconductor representa el funcionamiento de la máquina.



Máquina Térmica

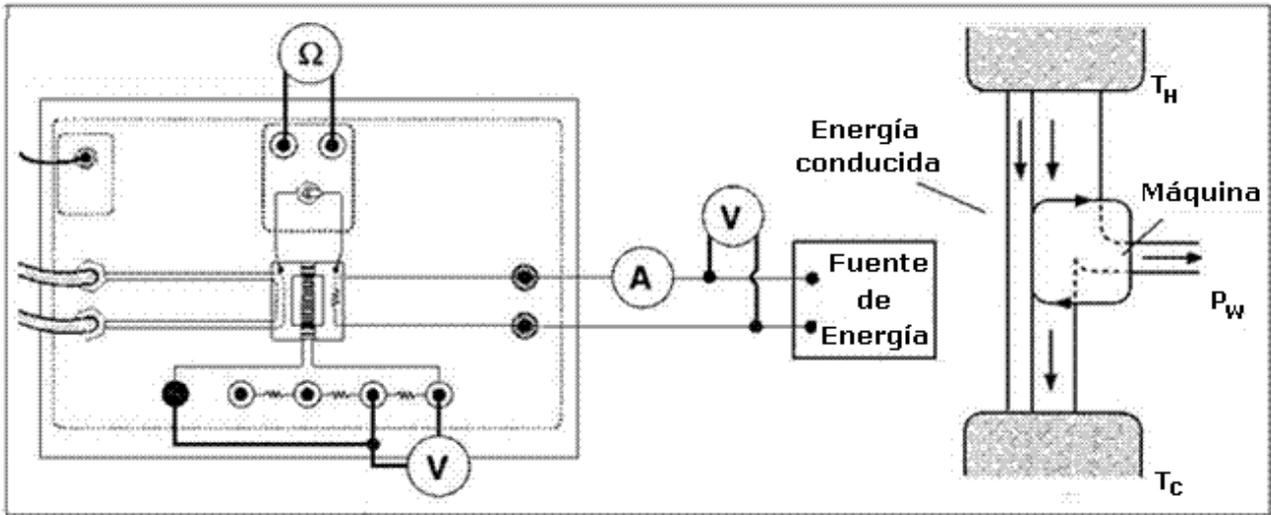
Un flujo de calor (representado por  $P_H$ ), es provisto sobre el módulo por la fuente caliente, donde a partir del efecto Peltier se realiza un trabajo eléctrico (representado, en términos de potencia, por  $P_W$ ) sobre una resistencia de carga ( $R$ ), simulando de este modo el trabajo producido. La temperatura de la fuente caliente ( $T_H$ ) y la temperatura de la fuente fría ( $T_C$ ) se determinan midiendo alternativamente la resistencia de sendos termistores, ubicados del lado caliente y frío; luego se expresan en unidades de temperatura mediante una tabla de conversión provista por el fabricante.



Arreglo de Termopares

Identificados los componentes y el principio de funcionamiento, se procede al conexonado del equipo para operar como Máquina Térmica.

Se registran las diferentes medidas, y se cargan en tablas. Como ya se expresara, los cálculos se realizan en términos de potencias.



Máquina Térmica con una Carga

Se reproducen las mediciones y cálculos de un grupo de trabajo, para una resistencia de carga (R) de 2 ohm.

Prueba	$T_H$ (kΩ)	$T_C$ (kΩ)	$T_H$ (°C)	$T_C$ (°C)	$V_H$	$I_H$	$V_W$
1	10,8	279,2	80,000	4,303	11	2,12	0,960
2	26,7	264,0	55,727	5,371	9	1,73	0,661
3	51,8	205,0	39,666	10,277	7	1,34	0,396
4	81,6	172,0	29,412	13,764	5	0,98	0,214
5	145,9	200,0	17,100	10,763	3	0,59	0,086

Tabla 1.1 Datos para Máquina Térmica

Prueba	$P_H$	$P_W$	$T_H$ (K)	$T_C$ (K)	$\Delta T$ (K)	$\eta_{real}$	$\eta_{Carnot}$
1	23,32	0,4608	353,000	277,303	75,697	0,0198	0,2144
2	15,57	0,2185	328,727	278,371	50,356	0,0140	0,1532
3	9,38	0,0784	312,666	283,277	29,389	0,0084	0,0940
4	4,90	0,0229	302,412	286,764	15,648	0,0047	0,0517
5	1,77	0,0037	290,100	283,763	6,337	0,0021	0,0218

Tabla 1.2 Valores calculados

Donde el flujo de calor aportado por la fuente caliente, se determina por:

$$P_H = I_H V_H \quad (1)$$

El trabajo producido por la máquina térmica se representa por:

---

$$P_W = V^2/R \quad (2)$$

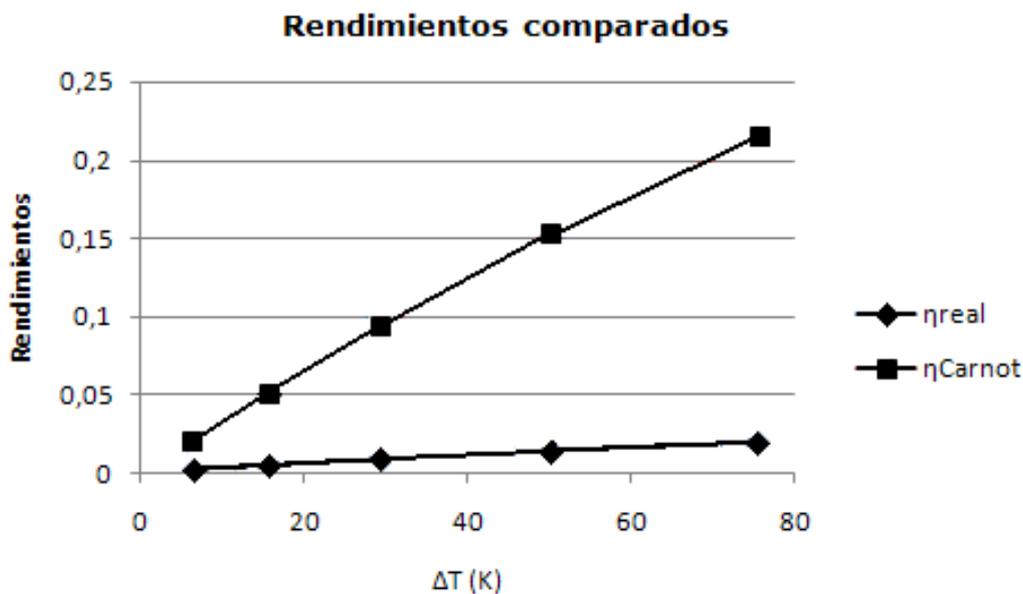
El rendimiento térmico de la máquina:

$$\eta_{\text{real}} = P_W/P_H \quad (3)$$

El máximo rendimiento posible para una máquina que opere entre esas fuentes de calor:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_C/T_H \quad (4)$$

Esta información permite determinar el rendimiento térmico real de la máquina, el cual puede ser comparado con el rendimiento de Carnot expresado en función de la temperatura de las fuentes. Este análisis sensitivo [7], permite observar cómo el grupo de alumnos comienza a descubrir, no sin asombro, la diferencia considerable entre ambos rendimientos, cuestión que tal vez antes no se habían planteado y hasta cuestionan sobre la confiabilidad de sus mediciones y de los cálculos realizados.



Rendimientos expresados según diferencias de temperaturas

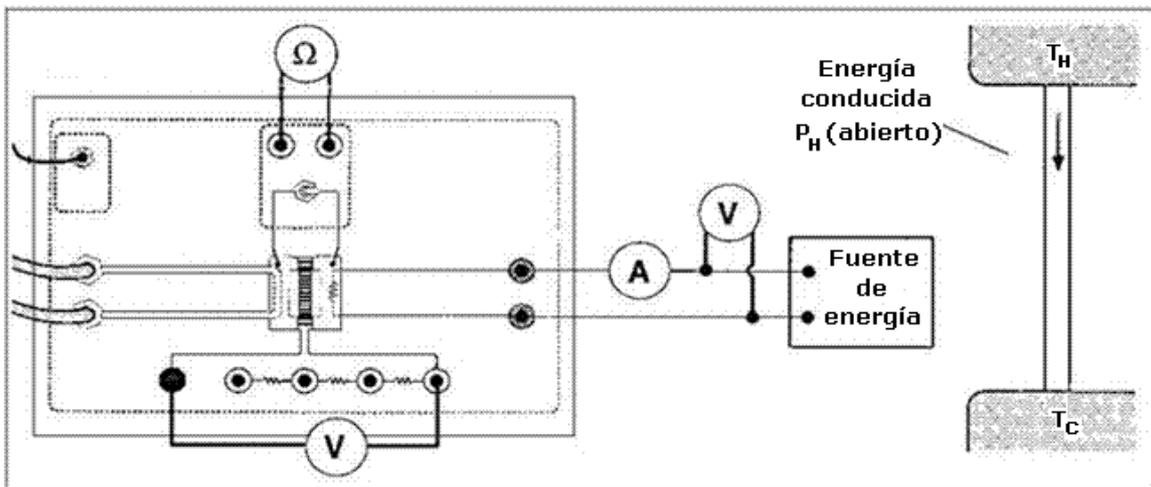
Las experiencias desarrolladas muestran que la caja de eficiencia térmica no es ajena al interés de los estudiantes y se convierte prontamente en un tópico generativo de nuevos conocimientos [3]. Por lo que, a efectos de "abrir la experiencia" y acentuar el análisis, el profesor y eventualmente los alumnos, pueden proponer una serie de cuestiones adicionales. Por ejemplo: los "diagramas" de flujos de energía deberían poder "superponerse" con los componentes "físicos" del sistema de modo que el estudiante identifique en los

---

circuitos eléctricos la máquina, los flujos de energía, la fuente caliente y la fuente fría, así como los instrumentos de medición propiamente dichos.

### ESTUDIO DETALLADO

Las diferentes pérdidas de energía que ocurren en la máquina térmica pueden ser identificadas y evaluadas mediante un estudio detallado. Para tal fin, se acciona el dispositivo, una vez más, como máquina térmica y luego se lo hace funcionar sin carga, permitiendo el paso espontáneo del calor de la fuente caliente a la fuente fría.



Dispositivo operando sin carga

Las medidas y cálculos correspondientes se agrupan en tablas:

Modo	$T_H$ (k $\Omega$ )	$T_C$ (k $\Omega$ )	$T_H$ ( $^{\circ}$ C)	$T_C$ ( $^{\circ}$ C)	$V_H$	$I_H$	$V_W$	$V_S$
Máquina	24,5	290	57,9	3,5	10,0	2,02	0,89	
Abierto	24,5	292	57,9	3,3	8,99	1,81		1,49

Tabla 2.1 Datos

Resistencia interna =  $r = 1,35$

Modo	$T_H$ (k $\Omega$ )	$T_C$ (k $\Omega$ )	$P_H$	$P_W$	$I_W$
Máquina	330,9	276,5	20,2	0,40	0,45
Abierto	330,9	276,3	16,3		

Tabla 2.2 Valores calculados

	Real	Ajustado	Máximo (Carnot)	% Diferencia
Rendimiento	0,0196	0,171	0,164	-0,042

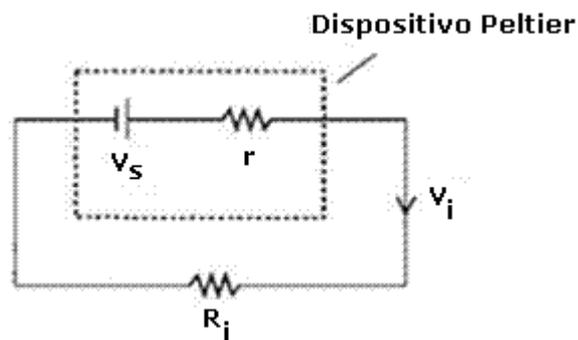
Tabla 2.3 Resultados

El voltaje Seebeck se determina a partir de la operación sin carga. Planteando la ecuación de lazo correspondiente se puede calcular la resistencia interna del dispositivo según:

$$r = \left( \frac{V_P - V_W}{V_W} \right) R \quad (5)$$

El rendimiento ajustado se calcula mediante:

$$\eta = \frac{P_W + I_W^2 r}{P_H - P_{H(\text{abierto})}} \quad (6)$$



Procedimiento para hallar la resistencia interna (r)

Esta expresión es la razón entre la potencia que entregaría la máquina si no existieran pérdidas por efecto Joule, y la potencia útil obtenida de la fuente caliente al descontar las pérdidas por radiación y conducción a través del dispositivo.

Los alumnos tienen la oportunidad de comprobar que el rendimiento ajustado empareja los valores del rendimiento teórico.

El flujo de entropía en cada fuente se puede evaluar a partir de:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta Q / \Delta t}{T} = \frac{P}{T} \quad (7)$$

y verificar luego el principio de Clausius de incremento de la entropía [5].

Como se comenta en párrafos anteriores, la práctica muestra que es posible abrir la experiencia y otorgarle nuevos alcances.

Aunque no forma parte de las cuestiones asociadas a las experiencias previstas por el fabricante, pueden ser aquí planteadas cuestiones relacionadas a flujo de entropía y entropía generada, reforzando el análisis de esos conceptos. Se observa también que es posible expresar los intercambios de energía, así como

las pérdidas ocurridas en la máquina, mediante el concepto de energía utilizable en forma de trabajo o exergía, se puede estimar un rendimiento exergético y elaborar diagramas de Sankey o de Grassman [8]. Diagramas que ayudan a comprender los intercambios de energías que tienen lugar durante la operación de la máquina.

El rendimiento exergético puede ser cuantificado mediante la relación siguiente:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Potencia producida}}{\text{Potencia consumida}} \quad (8)$$

Tras lo cual, el grupo de alumnos infiere que el cálculo se puede precisar de la siguiente manera:

$$\eta_{Ex} = \frac{P_W}{P_H - P_{H(\text{abierto})} - I_W^2 \cdot r} \quad (9)$$

Se propone además que un diagrama de exergías puede ser el siguiente, en el cual se ha considerado el criterio sostenido por Rieckert. [9]

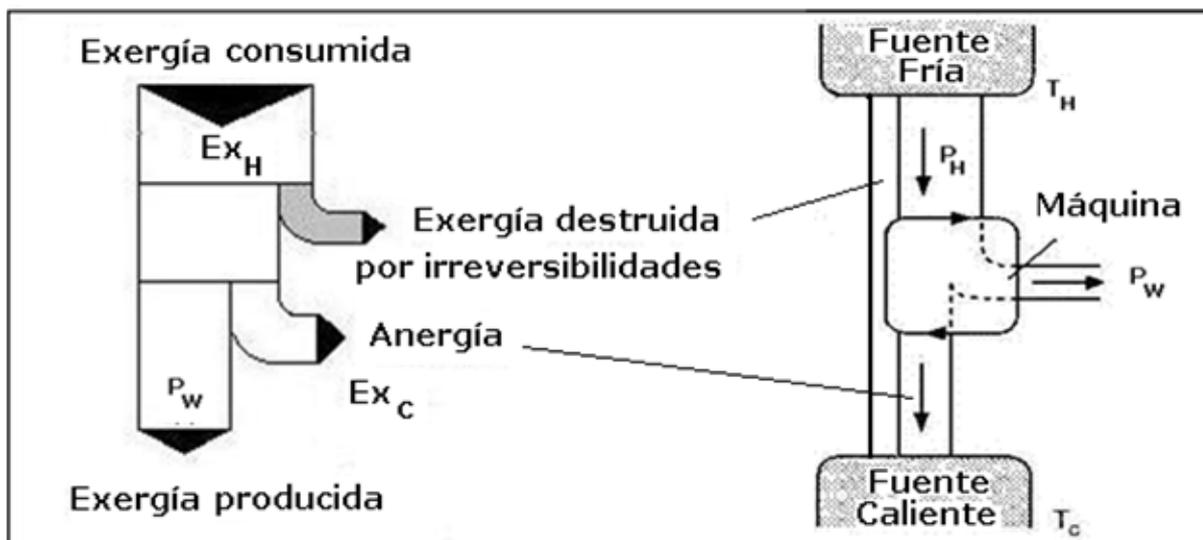


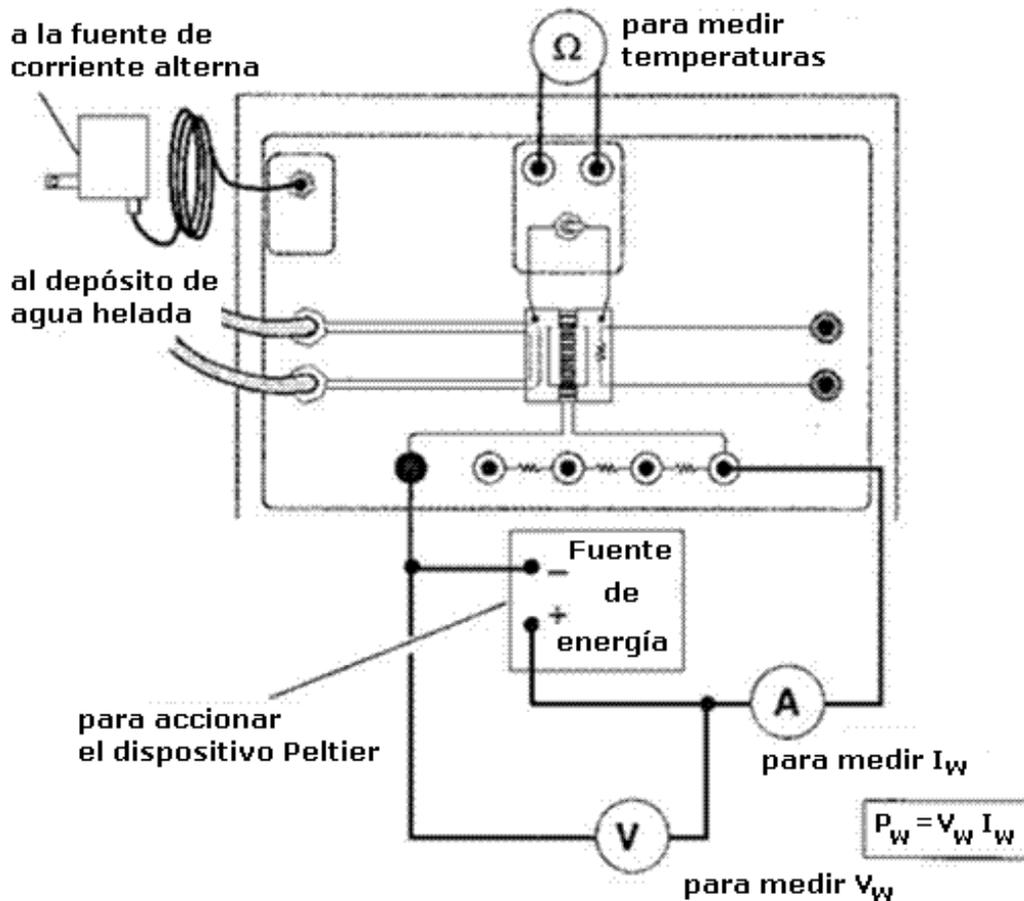
Diagrama de Sankey para una máquina térmica

## BOMBA DE CALOR

Es posible operar una máquina térmica con los flujos invertidos, es decir que, al recibir un trabajo tome energía de la fuente fría y la lleve a la fuente caliente. Esto no contradice el Segundo Principio de la Termodinámica ya que, al pensarlo según Clausius, el proceso no es espontáneo. Luego, según se sitúe el beneficio de la máquina, en el aporte de energía a la fuente caliente, o en la

energía que se le retira a la fuente fría, se estará en presencia desde el punto de vista termodinámico, de una Bomba de Calor o de una Máquina Frigorífica.

Mediante la configuración mostrada en la próxima figura, los alumnos tienen la posibilidad de operar el dispositivo como una bomba de calor (o como una máquina frigorífica).



Modo Bomba de Calor

Nuevamente, se realizan las mediciones y cálculos correspondientes y se registran en tabla, permitiendo determinar la eficiencia de la bomba de calor.

$T_H$ ( $k\Omega$ )	$T_C$ ( $k\Omega$ )	$T_H$ (K)	$T_C$ (K)	$V_W$	$I_W$	$P_W$	$e_{real}$	$e_{m\acute{a}x.}$	$e_{ajust.}$	Dif. %
24,7	306	330,9	275,5	3,64	1,63	5,93	1,75	4,97	4,48	9,9

Tabla 3.1. Bomba de Calor: Datos y Resultados

---

Donde la eficiencia de la bomba se determina por:

$$e = \frac{P_C}{P_W} = \frac{P_{H(abierto)} - P_W}{P_W} \quad (10)$$

La eficiencia máxima teórica:

$$e_{m\acute{a}x} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (11)$$

La eficiencia ajustada:

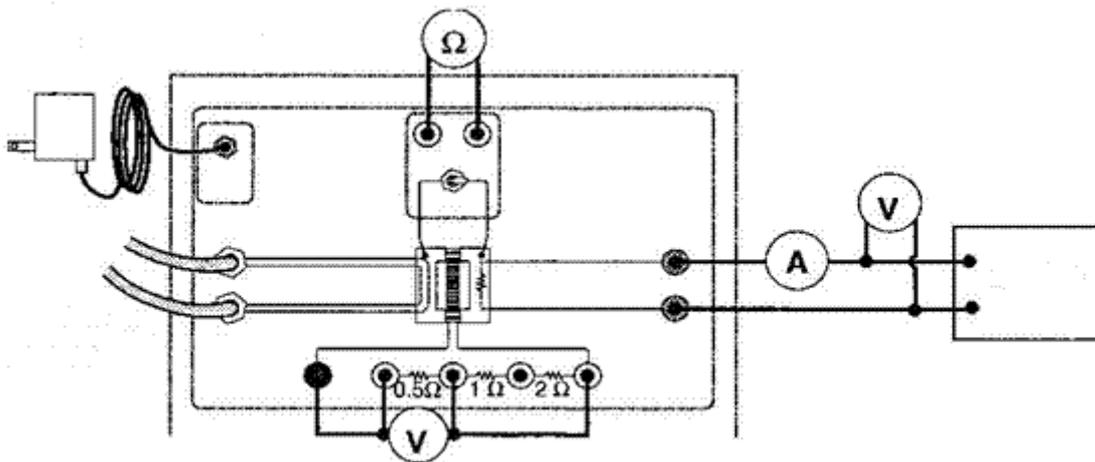
$$e_{ajust} = \frac{P_{H(abierto)} - P_W}{P_W - I_W^2 \cdot r} \quad (12)$$

El corrimiento en la eficiencia:

$$Dif. \% = \frac{e_{m\acute{a}x} - e_{ajust}}{e_{m\acute{a}x}} \cdot 100 \quad (13)$$

### CARGA PARA UN ÓPTIMO DESEMPEÑO

Con este experimento se determina el valor de la resistencia de carga que maximiza la salida de potencia de la máquina térmica.



Conexión de la resistencia de carga de 0,5  $\Omega$

La potencia entregada a la resistencia de carga (R) es  $P=I^2R$ . La cantidad de corriente que fluye por la resistencia de carga varía según la carga es modificada.  $V_s=I(r+R)$  donde  $V_s$  es el voltaje Seebeck y  $r$  es la resistencia interna del dispositivo Peltier.

---

---

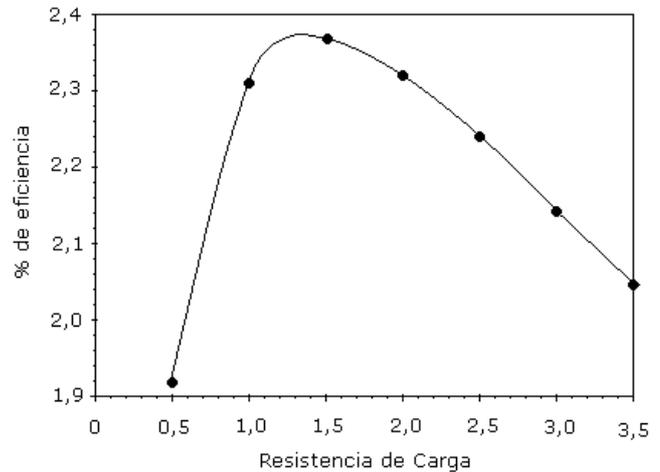
Entonces la potencia puede ser expresada en términos del voltaje Seebeck, la resistencia interna, y la resistencia de carga:

$$P = \left( \frac{V_S}{r + R} \right)^2 R \quad (14)$$

Asumiendo que el voltaje Seebeck permanece constante si las temperaturas de los depósitos calientes y fríos son constantes, la potencia puede ser maximizada respecto a la resistencia de carga tomando la derivada e igualándola a cero:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{V_S^2 (r - R)}{(r + R)^3} = 0 \quad (15)$$

El estudiante puede deducir entonces que cuando la resistencia de carga es igual a la resistencia interna del dispositivo Peltier, la potencia entregada a la carga es un máximo.



Carga para un óptimo desempeño

## CONCLUSIÓN

Diversas razones pueden conducir a procesos de instrucción, que no trasciendan más allá de la tiza y el pizarrón como todo recurso utilizado en su metodología de enseñanza. En muchos casos, eso no desmerece su excelencia. Pero, desde nuestro enfoque de la realidad se considera que hay temas muy relevantes en la física del calor que merecen otras alternativas de trabajo. Aquí se menciona la posibilidad de complementar la práctica docente, con una de esas alternativas.

No se indica cuanto mejoraron los alumnos desde lo cognitivo, el enfoque es otro, se hace referencia en cambio a las posibilidades que el dispositivo ofrece al planificar el tratamiento del tema, y en consecuencia producir los cambios pertinentes. Que dichos cambios ocurren y son favorables, se evidencia en la observación directa, en el análisis de los informes presentados. Hay pautas que los indican: el grado de compromiso de los estudiantes, el nivel de participación aún sin obligación de asistencia, las competencias prácticas que se demuestran al hacer del laboratorio un lugar habitual de trabajo, las propuestas defendidas, la estima generada, las críticas solicitadas a los estudiantes.

---

---

Las experiencias que se mencionan, como otras que no se describen con el objeto de centrar el análisis sólo en la máquina térmica, muestran que si se desea trabajar en ese sentido, el módulo referido posee una gran versatilidad. Si se considera que es posible integrar principios y conceptos físicos, relacionar nuevos conceptos con los ya existentes en la estructura cognitiva del estudiante [10], establecer tópicos generativos en una enseñanza para la comprensión, y contribuir a la formación en competencias prácticas, se tiene que destacar el valor didáctico que posee este recurso. Resulta fácil de operar, seguro en cuanto al manejo con los estudiantes, fácilmente trasladable, inclusive al propio salón de clase.

El módulo, aunque difiere de las máquinas térmicas y frigoríficas más conocidas (de vapor, de explosión, turbinas, heladeras de compresor) ilustra igualmente los principios termodinámicos, y atrae el interés de los estudiantes. El resto es trabajo del docente, quien tiene la oportunidad de elaborar diferentes estrategias didácticas que rompan con rígidas estructuras de enseñanza y favorezcan el trabajo colaborativo, la discusión de ideas, la integración de conocimientos, la validación de resultados, la comunicación de las observaciones, y otras competencias que trascienden al conocimiento de la termodinámica de las máquinas térmicas y resultan necesarias para el ejercicio mismo de la profesión.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Posada Álvarez, (2001), *Formación Superior Basada en Competencias, Interdisciplinariedad y Trabajo Autónomo del Estudiante*, OEI- Revista Iberoamericana de Educación.
  - [2] Hüber. (2000), *Aprendizaje Activo en Contextos Desarrollados*, U. Barcelona.
  - [3] Blythe, T. (2002). *La Enseñanza para la Comprensión*. Paidós.
  - [4] Latorre, (1996), *Bases Metodológicas de la Investigación Educativa*. GR92 Barcelona.
  - [5] Morán/Shapiro (2005). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Reverté
  - [6] Pasco (1991). *Instruction Manual and Experiment Guide for the Pasco Scientific Model TD-8564 Thermal Efficiency Apparatus*. [www.pasco.com](http://www.pasco.com)
  - [7] Software CYCLEPAD – K Forbus - Northwestern University
  - [8] Ribelles/Pradas/Greus, (1990). *Termodinámica - Análisis Exergético* – Reverté
  - [9] Rotstein/Fornari, (1984) – *Termodinámica de Procesos Industriales/Exergía y Creación de Entropía* – Edigem.
  - [10] Ausubel-Novak-Hanesian (1983). *Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo*. Trillas.
-