

## Irreversibilidad y ciclos de potencia

G. Aragón, A. Canales y A. León

PDPA, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco  
Av. San Pablo #180. Col. Reynosa, Azcapotzalco, 02800, México, D.F., Mexico  
e-mail: gag@correo.azc.uam.mx.

Recibido el 4 de junio de 1999; aceptado el 1 de marzo de 2000

Durante la enseñanza de la termodinámica para ingenieros, con base en una metodología de diseño curricular, se analizó cómo y por qué funcionan los motores de combustión interna. Se presenta el concepto de irreversibilidad para analizar los ciclos termodinámicos de potencia y se expresan algunas irreversibilidades mediante las eficiencias de los procesos de compresión y expansión. En particular, se analiza el motor Otto y se establece que tanto las temperaturas como las presiones finales, alcanzadas por las adiabatas irreversibles, son mayores que las alcanzadas por las adiabatas reversibles. A partir de estos resultados se determina una cota inferior para el producto de las eficiencias de los procesos de compresión y expansión, en el ciclo Otto. También se obtiene expresiones para la eficiencia y el trabajo irreversibles.

*Descriptores:* Docencia; irreversibilidad y ciclos de potencia

In teaching thermodynamics for engineers, on a basis of a curricular design methodology, we analyze the how and why internal combustion engines perform. We introduce the concept irreversibility to analyse the themodynamic cycles of power, then we consider some irreversibilities by mean of the compresion and expansion processes efficiency. In particular, we analyze the Otto engine and we establish that both, the temperatures as well as the final pressures, reached by the irreversible adiabatics, are higher than those reached by the reversible adiabatics. With these results, we determine a inferior bound for the product of the compresion and expansion efficiencies in the Otto cycle. We also obtain expressions for irreversible work and irreversible efficiency.

*Keywords:* Teaching; irreversibility and power cycles

PACS: 01.40.G; 44.60; 44.90

### 1. Introducción

En la UAM Azcapotzalco hemos aplicado una metodología de diseño curricular para la enseñanza de la termodinámica para ingenieros [3]. Esta metodología consiste, en general, en la presentación de los conceptos fundamentales con base en sus facetas cognoscitivas: *historicidad, algoritmicidad, teoricidad, heurísticidad, practicidad y relación con la planta productiva*. Un concepto fundamental, por ejemplo el modelo de gas ideal, se puede desdoblar de acuerdo con una o más de estas facetas y su síntesis es la que permea la presentación de este concepto.

Por consiguiente, si estamos interesados en enfatizar la historicidad del concepto su presentación se efectúa a través de su surgimiento histórico: leyes de Boyle, Gay-Lussac, Charles, máquina de Carnot, ecuación de gases ideales, primera y segunda ley. Si ahora se prefiere enfatizar su practicidad se mostrarían los experimentos fundamentales: Bertholet, Boyle, Gay-Lussac, Charles, Joule . . . En cambio, si lo que importa es la teoricidad, la presentación es otra: deducción de la ecuación de gases ideales, teoremas de Carnot, primera ley para un proceso adiabático, segunda ley, entropía del universo . . . o bien los axiomas de Caratheodory.

La algoritmicidad y la heurísticidad caracterizan las interpretaciones y cálculos que pretendemos se realicen: algoritmos para calcular las variables de estado, calor, trabajo y eficiencia en ciclos termodinámicos compuestos por los procesos fundamentales, sin necesariamente incluir la primera

ley [4]. La heurística aparece cuando se interpreta o se realizan cálculos para ciclos arbitrarios, con la primera y segunda ley, y se incluyen demostraciones. En cuanto a su relación con la planta productiva, podemos citar la conexión de los conceptos con algún sector productivo importante: industria automotriz o eléctrica.

La aplicación de una o más de estas facetas —con su determinada ponderación— imprime al currículum características novedosas. La aplicación sobre una asignatura particular da pie a desarrollos curriculares distintos y puede contribuir a mejorar la enseñanza. Por ejemplo, el currículum de la enseñanza técnica media superior podría realizarse con base en tres de estas facetas [3]: algoritmicidad, practicidad y relación con la planta productiva.

Cuando aplicamos esta metodología al curso *Termodinámica Aplicada para Ingeniería*, de la UAM-Azcapotzalco [4], obtuvimos como resultado un desarrollo curricular con cierta ponderación de cada una de las facetas anteriores. En forma breve describimos lo obtenido.

Al considerar la relación entre los conceptos y la planta productiva desembocamos en la industria automotriz; es decir, desarrollar las máquinas de combustión interna con base en *cómo y por qué funcionan*. La explicación de cómo funcionan se hizo de acuerdo con las operaciones que ejecuta uno de los cilindros-pistón que constituyen una máquina. A partir de aquí se realiza la abstracción a ciclos termodinámicos ideales: Otto y Diesel. Luego se considera su funcionamiento con un alto porcentaje de aire respecto al combustible, se

discute los estados de equilibrio, variables de estado, procesos cuasiestáticos, reversibilidad (del modo como Carnot la planteó), las características macroscópicas y, sobre todo, la modelación de los procesos.

Al desarrollar la explicación de porqué funcionan las máquinas de combustión interna se estudian los ciclos ideales, por lo cual presentamos el nacimiento de la termodinámica mediante su practicidad-historicidad: experimento original de Boyle, bomba de vacío y compresor, leyes de Charles y Gay-Lussac y escala Kelvin. En la modelación consideramos el comportamiento de gas ideal:  $pV = mRT$ . Se desarrolla su deducción teórica con ayuda de procesos arbitrarios, para luego destacar tres de los procesos fundamentales de la termodinámica. El cuarto proceso fundamental aparece con la idea de calor, la cual se introduce en forma intuitiva al postular la ecuación de Newton-Black. El concepto de trabajo se desarrolla con base en la definición intuitiva de Poncelet (vencer una resistencia que se opone).

Mediante la algoritmidad [3] se pueden llevar a cabo los cálculos de las variables en cada uno de los estados, así como determinar la magnitud del calor, trabajo y eficiencia de los ciclos. Por ejemplo, se resuelve el ciclo Otto y se encuentra su eficiencia ideal:

$$\eta = 1 - \varepsilon^{1-\gamma},$$

donde  $\varepsilon$  es la relación de compresión.

Cabe mencionar que en este punto no se ha mencionado que el calor sea una forma de energía. Sin embargo, comienza a vislumbrarse que en un ciclo existe una conversión-transformación entre calor y trabajo. Es hasta el experimento de Joule que el calor adopta su justo lugar.

Los cálculos de energía en procesos arbitrarios se realizan con la heurística-teoricidad. Es aquí donde ambas facetas juegan un papel fundamental para comprender la primera y la segunda ley. La segunda ley se introduce con base en la máquina de Carnot reversible y el postulado de Clausius. La entropía se presenta como variable de estado con base en la teoricidad: el teorema de Carnot y calores reducidos. También, la reversibilidad e irreversibilidad se desarrollan con base en la teoricidad.

Hasta este momento ya se cuenta con un cuerpo mínimo de conocimientos de termodinámica, empleando el modelo de gas ideal, y se pueden hacer cálculos de energía y entropía para procesos reversibles arbitrarios. Conviene observar el desarrollo curricular realizado con base en las facetas cognitivas: la representación de máquinas como ciclos termodinámicos normalmente se presenta al final de los textos de termodinámica [5].

Conviene destacar aquí la posibilidad de efectuar cálculos de energía y entropía para procesos irreversibles arbitrarios, a través del concepto de eficiencia de un proceso de compresión y expansión [4] (en forma similar a como se emplea en la eficiencia de turbinas y compresores). Esta idea permite presentar, para finalizar, tres aplicaciones de la entropía, las cuales le imprimen significado físico a dicho concepto [4].

Las expansiones y compresiones adiabáticas irreversibles son los procesos que aparecen más frecuentemente en los modelos de las aplicaciones industriales. En los ciclos ideales de motores de combustión interna, y en otras máquinas, es usual considerar la carrera del pistón dentro del cilindro como una expansión o compresión adiabática reversible. Con el objeto de considerar algunas irreversibilidades en dichas máquinas, resulta conveniente tomar en cuenta la eficiencia de los procesos adiabáticos. En este trabajo abordaremos sobre esta idea.

En las siguientes secciones presentaremos algunos resultados de nuestra práctica educativa, obtenidos al considerar la eficiencia de los procesos adiabáticos en la enseñanza de la termodinámica. En particular, se describe lo ocurrido en la enseñanza-aprendizaje cuando se abordó el ciclo Otto. La experiencia que obtuvimos nos condujo a encontrar cotas inferiores para las eficiencias de los procesos de expansión y compresión. Al final presentamos fórmulas para el trabajo y la eficiencia irreversibles.

## 2. Reversibilidad e irreversibilidad

La primera ley de la termodinámica es una herramienta de cálculo valiosa y versátil. No obstante, existen fenómenos de conversión de la energía que no pueden explicarse solamente con la primera ley. Mediante la primera ley podemos definir la energía almacenada, con base en la relación entre las energías calor y trabajo; sin embargo, esta ley no permite predecir en qué grado hay una conversión de energía y tampoco indica si es posible tal proceso de conversión de energía. La experiencia muestra que al menos un tipo deseable de conversión de energía (calor a trabajo) no puede realizarse completamente. También, la ejecución de ciertos procesos que no violarían la primera ley es imposible en la realidad.

En el motor de gasolina, la energía almacenada en el combustible y el aire se envía al motor. La energía sale de la máquina como trabajo, transferido mediante el eje de transmisión, y como calor a través de la energía almacenada en los gases de escape. Puesto que el rendimiento económico suele enmarcar el funcionamiento de la máquina, el trabajo de salida debe ser el máximo posible para una cantidad determinada de energía alimentada al motor. Por consiguiente, es necesario que el calor y la energía que salen en los gases de escape se reduzca al mínimo. De acuerdo con la primera ley estas pérdidas de energía podrían reducirse a cero; entonces el trabajo de salida sería igual a la energía de entrada. Pero hasta ahora han fracasado todos los intentos para obtener tal comportamiento del motor. Incluso con los avances tecnológicos logrados hasta la fecha, no se ha logrado una conversión completa de la energía del combustible en trabajo.

También en una planta de potencia de vapor existe una conversión limitada de energía. Incluso las mejores plantas [7] requieren de una energía de entrada de 300 kJ para producir solamente 90 kJ; así, por cada 100 kJ de trabajo producido se liberan 235 kJ al medio ambiente en alguna forma de energía distinta del trabajo.

En conclusión, el calor no puede convertirse en su totalidad en trabajo. La segunda ley nos permite determinar en qué grado puede realizarse una conversión de energía y si esta conversión es posible. Entre las aplicaciones de la segunda ley se encuentran la determinación de las *máximas eficiencias de máquinas de calor*; los *máximos coeficientes de realización de refrigeradores* y si un proceso en particular es posible o no.

Un proceso es reversible si, después de que ha sucedido, tanto el sistema como el entorno pueden, por cualquier medio, regresar a sus estados originales. Cualquier otro proceso se denomina *irreversible*. Para determinar si un proceso es reversible se requiere aplicar la segunda ley. Aunque también se pueden definir los procesos reversibles antes de considerar la segunda ley, cuando los concebimos como modelos idealizados de los procesos reales.

En los procesos de expansión y compresión, por ejemplo, se puede definir reversibilidad con base en la eficiencia del proceso [6]: es reversible si tiene eficiencia 100% e irreversible si es menor a 100% y mayor que cero. Entonces es posible efectuar cálculos de energía en los procesos, de acuerdo a su eficiencia y mediante la primera ley, sin necesariamente haber enunciado la segunda ley. Este desarrollo curricular propone la necesidad de la segunda ley para que aparezca en forma natural.

Entre los efectos irreversibles se encuentra la fricción, transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperaturas y las reacciones químicas. Todos los procesos reales son irreversibles, pues los reversibles nunca ocurren o les toma un tiempo infinitamente grande. No obstante, los procesos reversibles resultan importantes porque definen el trabajo máximo para dispositivos que producen trabajo, y el mínimo para los que absorben trabajo. También resultan útiles porque sirven como normas o cotas de comparación, pues en muchas ocasiones pueden considerarse como casos límites de los procesos reales. Dado que los procesos reales son difíciles de analizar completamente, se tiene que realizar su análisis o diseño con base en procesos reversibles. Posteriormente se ajustan los resultados para aplicarlos a procesos reales.

Los procesos reversibles se emplean en la misma forma en que se utilizan las masas puntuales, las poleas sin fricción, cuerdas sin peso y vigas homogéneas: *como idealizaciones para simplificar el análisis de sistemas y procesos reales*. Aquí conviene destacar lo realizado por I. Newton cuando estudió el movimiento de un cuerpo en una superficie rugosa. Inicialmente él asumió que este movimiento se realizaba en una superficie lisa, despreciando la fuerza de fricción. Con este modelo ideal estableció sus leyes fundamentales, para después —y esa fue su genialidad— incluir a la fricción como una fuerza que se opone al movimiento. En consecuencia, podemos estudiar los procesos reversibles-ideales y después los irreversibles-‘reales’. En el caso de expansiones y compresiones se puede hacer mediante la eficiencia del proceso.

Un proceso irreversible puede involucrar la transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperatura entre

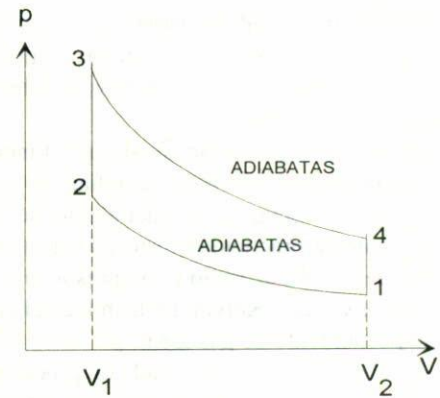


FIGURA 1. Ciclo Otto reversible.

el sistema y su entorno. Durante un proceso irreversible, cuando el sistema puede comportarse como si el calor fuera transferido reversiblemente a través de una diferencia infinitesimal de temperatura, se dice que este proceso es internamente irreversible pero externamente reversible. Son estos procesos los que consideraremos a continuación.

### 3. Adiabatas irreversibles en el ciclo Otto

Consideremos ahora el ciclo Otto reversible como se muestra en la Fig. 1:

Los procesos 1-2 y 3-4 corresponden a adiabatas reversibles y los otros dos procesos son isocóricos. La primera ley nos dice que el trabajo neto del ciclo es

$$W_{\text{neto}}^{\text{rev}} = Q_A^{\text{rev}} - Q_B^{\text{rev}},$$

donde  $Q_A^{\text{rev}}$  y  $Q_B^{\text{rev}}$  son las transferencias de calor en los procesos 2-3 y 4-1, respectivamente; se considera a  $Q_B^{\text{rev}}$  con valor absoluto. Denotamos los trabajos reversibles por:  ${}_1W_2^{\text{rev}}$  y  ${}_3W_4^{\text{rev}}$  y los irreversibles por:  ${}_1W_2^{\text{irr}}$  y  ${}_3W_4^{\text{irr}}$ . Al considerar las adiabatas irreversibles las eficiencias de la expansión y de compresión pueden definirse como

$$\eta_E = \frac{{}_3W_4^{\text{irr}}}{{}_3W_4^{\text{rev}}} \quad \text{y} \quad \eta_C = \frac{{}_1W_2^{\text{rev}}}{{}_1W_2^{\text{irr}}}.$$

Claramente  $\eta_C$  y  $\eta_E \in [0, 1]$ . Si existen irreversibilidades en los procesos, entonces  $\eta_C$  y  $\eta_E \in [0, 1)$ . Ahora, con estas eficiencias es fácil mostrar que:

- Las temperaturas finales alcanzadas por las adiabatas irreversibles son mayores que las correspondientes a las adiabatas reversibles.

En efecto, supongamos  $\eta_C < 1$ , entonces  $|{}_1W_2^{\text{rev}}| < |{}_1W_2^{\text{irr}}|$ . Por primera ley:  ${}_1W_2^{\text{rev}} = -mc_v(T_2 - T_1)$  y  ${}_1W_2^{\text{irr}} = -mc_v(T_2^{\text{irr}} - T_1)$  —supondremos siempre que  $c_v$  es constante y el mismo en todo el ciclo—, entonces,  $T_2^{\text{irr}} > T_2$ . En el caso de la expansión se procede en forma análoga.

También, las *presiones finales en la compresión y expansión de las adiabatas irreversibles son mayores que las correspondientes adiabatas reversibles*.

En efecto, como  $V_2$  es el mismo en ambas adiabatas podemos aplicar  $pV/T = \text{cte}$ :

$$p_2^{\text{irr}} = \frac{T_2^{\text{irr}} V_1}{T_1 V_2} p_1 > \frac{T_2 V_1}{T_1 V_2} p_1 = p_2,$$

$$p_4^{\text{irr}} = \frac{T_4^{\text{irr}} V_1}{T_3 V_2} p_3 > \frac{T_4 V_1}{T_3 V_2} p_3 = p_4.$$

Si conocemos las eficiencias y las temperaturas finales de las adiabatas reversibles, podemos calcular las temperaturas finales correspondientes a las adiabatas irreversibles:

$$T_2^{\text{irr}} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_C},$$

$$T_4^{\text{irr}} = T_3 + \eta_E(T_4 - T_3).$$

Observemos que las transferencias de calor se calculan con base en

$$Q_A^{\text{rev}} = m c_v (T_3 - T_2) \quad \text{y} \quad Q_B^{\text{rev}} = m c_v (T_4 - T_1),$$

y que al modificarse las temperaturas finales en las adiabatas irreversibles resulta que:  $Q_A^{\text{irr}} = m c_v (T_3 - T_2^{\text{irr}}) < Q_A^{\text{rev}}$  y que:  $Q_B^{\text{irr}} = m c_v (T_4^{\text{irr}} - T_1) > Q_B^{\text{rev}}$ . Es decir, en estas circunstancias de compresión y expansión irreversibles, se requiere menor energía como combustible y se rechaza mayor energía cuando se equilibra con el entorno. Ahora, por la primera ley se satisface:  $W_{\text{neto}}^{\text{irr}} = Q_A^{\text{irr}} - Q_B^{\text{irr}}$ . Además  $W_{\text{neto}}^{\text{irr}} \leq W_{\text{neto}}^{\text{rev}}$ , y las eficiencias de los ciclos correspondientes son

$$\eta_{\text{irr}} = \frac{W_{\text{neto}}^{\text{irr}}}{Q_A^{\text{irr}}} = 1 - \frac{Q_B^{\text{irr}}}{Q_A^{\text{irr}}} \leq \eta_{\text{rev}}.$$

Para esta última desigualdad basta ver que

$$\frac{Q_B^{\text{irr}}}{Q_A^{\text{irr}}} \geq \frac{Q_B^{\text{rev}}}{Q_A^{\text{rev}}},$$

lo cual se cumple, ya que  $\eta_E \leq 1, 1/\eta_C \geq 1$  y además

$$\frac{T_4^{\text{irr}} - T_1}{T_3 - T_2^{\text{irr}}} \geq \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$$

Con las expresiones anteriores es posible calcular los flujos de energía y la eficiencia para ciclos Otto con adiabatas irreversibles, sólo basta proporcionar los datos de las eficiencias de los procesos de expansión y compresión. En la Ref. 4 se realizan ejemplos numéricos para distintos valores arbitrarios de eficiencias en el intervalo  $[0, 1]$  y se aplican estos resultados a procesos de expansión y compresión arbitrarios.

Cuando nos propusimos extender la aplicación al modelado de ciclos nos percatamos que estas eficiencias no podrían ser tan arbitrarias. Consideremos el problema, para un ciclo Otto, con el siguiente enunciado:

- Un ciclo Otto funciona con aire y relación de compresión 9.5. Al inicio de la compresión el aire está a 100 kPa, 300 K. La presión máxima alcanzada en el

ciclo es de 4 MPa. Los procesos de expansión y compresión adiabáticos son irreversibles, con eficiencias 70% y 75%, respectivamente. Calcular la eficiencia del ciclo irreversible y compararla con la correspondiente al ciclo reversible.

Las temperaturas en cada uno de los estados son

$$T_1 = 300 \text{ K}, \quad T_2 = 738.262 \text{ K},$$

$$T_3 = 1236.157 \text{ K}, \quad T_4 = 513.296 \text{ K},$$

$$T_2^{\text{irr}} = 884.349 \text{ K} \quad \text{y} \quad T_4^{\text{irr}} = 738.259 \text{ K}.$$

Para un kg de masa obtenemos

$$Q_A^{\text{rev}} = 376.087 \text{ kJ}, \quad Q_B^{\text{rev}} = -152.867 \text{ kJ},$$

$${}_1W_2^{\text{rev}} = -314.014 \text{ kJ}, \quad {}_3W_4^{\text{rev}} = 537.276 \text{ kJ},$$

$${}_1W_2^{\text{irr}} = -418.68 \text{ kJ}, \quad {}_3W_4^{\text{irr}} = 376.092 \text{ kJ}$$

$$W_{\text{neto}}^{\text{rev}} = 223.26 \text{ kJ} \quad \text{y} \quad W_{\text{neto}}^{\text{irr}} = -42.593 \text{ kJ}.$$

Este último resultado es un absurdo y nos muestra que, en los ciclos, las eficiencias de expansión y compresión no pueden ser arbitrarias en  $[0, 1]$ . Sin embargo, en procesos adiabáticos aislados si puede ocurrir tal arbitrariedad (v. gr. si el pistón no se mueve, digamos por existir fugas, la eficiencia de expansión sería cero).

En la práctica educativa esto se puede remediar al modificar los datos. Una forma es proponer otras eficiencias:  $\eta_E = 90\%, \eta_C = 85\%$ . Con este cambio obtenemos

$$Q_A^{\text{irr}} = 320.673 \text{ kJ}, \quad Q_B^{\text{irr}} = 206.554 \text{ kJ},$$

$${}_1W_2^{\text{irr}} = -369.428 \text{ kJ}, \quad {}_3W_4^{\text{irr}} = 483.548 \text{ kJ}$$

y  $W_{\text{neto}}^{\text{irr}} = 114.120 \text{ kJ};$

con las correspondientes eficiencias:

$$\eta_{\text{irr}} = 35.587\% \quad \text{y} \quad \eta_{\text{rev}} = 59.364\%.$$

Para tener un control sobre las eficiencias  $\eta_E$  y  $\eta_C$  hay que acotarlas; esta tarea es justo lo que haremos a continuación.

Para los primeros datos en el problema anterior, se encontró que no se satisface  $W_{\text{neto}}^{\text{irr}} \geq 0$ . Esta desigualdad nos proporciona la siguiente cota inferior:

$$\eta_E \eta_C \geq \frac{1}{1 - \eta} \frac{T_1}{T_3} = \varepsilon^{\gamma-1} \frac{T_1}{T_3} \quad (1)$$

en donde  $\eta = 1 - \varepsilon^{1-\gamma}$ , es la eficiencia del ciclo Otto reversible. En efecto, es fácil ver que

$$T_2^{\text{irr}} = T_1 \left[ 1 + \frac{\eta}{\eta_C(1 - \eta)} \right] \quad (2a)$$

$$T_4^{\text{irr}} = T_3 [1 - \eta_E \eta] \quad (2b)$$

y como se debe satisfacer:

$$Q_A^{\text{irr}} \geq Q_B^{\text{irr}},$$

entonces

$$T_3 - T_2^{\text{irr}} \geq T_4^{\text{irr}} - T_1.$$

Al sustituir las expresiones anteriores y simplificar se obtiene la desigualdad.

Para los valores numéricos del problema anterior tenemos la siguiente desigualdad:  $\eta_E \eta_C \geq 0.5844$ , que no se satisface cuando  $\eta_E = 70\%$  y  $\eta_C = 75\%$ , y sí se satisface para  $\eta_E = 90\%$  y  $\eta_C = 85\%$ .

Para un motor de gasolina típico, los parámetros que aparecen en la desigualdad (1) se pueden consultar en la Ref. 8; para una relación de compresión  $\varepsilon = 8$ ,  $T_1 = 333$  K,  $T_3 = 2795$  K, y tomando  $\gamma = 1.4$ , la desigualdad queda

$$\eta_E \eta_C \geq 0.273715.$$

Es claro que con estos parámetros, para la relación de compresión dada, se tiene un margen más amplio de eficiencias de expansión y compresión. En algunos problemas de aplicación para el ciclo reversible, propuestos tradicionalmente en el proceso educativo, se tiene:  $T_1 \approx 300$  K,  $T_3 \approx 2000$  K,  $\varepsilon = 8$  y  $\gamma = 1.4$ ; la desigualdad queda

$$\eta_E \eta_C \geq 0.344609.$$

Entonces, para evitar absurdos en el proceso educativo basta considerar la desigualdad (1) cuando se resuelvan problemas que involucran el ciclo Otto con irreversibilidades provenientes de  $\eta_E$  y  $\eta_C$ .

Para  $\eta_E$  y  $\eta_C$  dadas, y que satisfacen la desigualdad (1), podemos encontrar el trabajo irreversible. Al aplicar las Ecs. (2) para las temperaturas encontramos fácilmente, para un kg, que

$$W_{\text{neto}}^{\text{irr}} = \eta c_v T_3 \left[ \eta_E - \frac{1}{\eta_C(1-\eta)} \frac{T_1}{T_3} \right], \quad (3)$$

y claramente para que  $W_{\text{neto}}^{\text{irr}} \geq 0$  debe satisfacerse la desigualdad (1).

Para calcular la eficiencia irreversible  $\eta_{\text{irr}}$  del ciclo hemos aplicado:

$$\eta_{\text{irr}} = \frac{W_{\text{neto}}^{\text{irr}}}{Q_A^{\text{irr}}}$$

que al considerar (2) puede escribirse como

$$\eta_{\text{irr}} = \eta \left\{ \frac{\eta_E - \frac{T_1}{T_3} \frac{1}{\eta_C(1-\eta)}}{1 - \frac{T_1}{T_3} \left[ 1 + \frac{\eta}{\eta_C(1-\eta)} \right]} \right\}, \quad (4)$$

y cuando  $\eta_E = 1$  y  $\eta_C = 1$  se obtiene  $\eta_{\text{irr}} = \eta$ . La fracción entre paréntesis siempre es menor que 1 y mayor o igual a cero, por la desigualdad (1) y porque  $T_3 > T_2^{\text{irr}}$ .

## 4. Conclusiones

En la UAM Azcapotzalco, la enseñanza de la termodinámica para ingenieros se ha llevado a cabo con base en un diseño curricular específico. La metodología que hemos aplicado consiste en la presentación de los conceptos fundamentales con base en sus facetas cognoscitivas. En particular, hemos encontrado pertinente destacar la relación entre los conceptos y la planta productiva, lo cual nos condujo a considerar la industria automotriz y su vínculo con las máquinas de combustión interna.

En el proceso educativo encontramos muy provechoso considerar algunas irreversibilidades en las máquinas de combustión interna. Por ello, cuando se abordó el ciclo Otto se tomó en cuenta la eficiencia de los procesos adiabáticos. La experiencia que obtuvimos nos condujo a encontrar cotas inferiores para las eficiencias de los procesos de expansión y compresión, como se expresa en (1).

La importancia de considerar las irreversibilidades discutidas en este trabajo es doble. En el proceso educativo permite que los alumnos se aproximen con mayor fidelidad a las eficiencias de motores reales, lo cual por sí mismo puede mejorar la enseñanza. En cuanto a la investigación, se ha definido una línea distinta a desarrollar para el estudio de los ciclos de potencia. Por medio de esta línea se puede estimar cotas superiores para las eficiencias y trabajo máximos irreversibles.

Conviene señalar que en los resultados encontrados, (3) y (4), se procedió a expresarlos con el menor número de variables posible. También se procuró facilitar su cálculo o medición experimental, lo cual pensamos desarrollar en el futuro. Consideramos que será de gran interés aplicar y confrontar los conceptos de irreversibilidad aquí discutidos con los resultados que propociona la termodinámica de tiempos finitos. Por ejemplo, para el ciclo Otto se puede consultar las Refs. 1 y 2.

Finalmente, se pueden encontrar expresiones similares a (2), (3) y (4) para otros ciclos de potencia, como son el Diesel, Brayton y Carnot. Esperamos que este trabajo contribuya para dicha tarea.

## Agradecimientos

Agradecemos en especial a Fernando ángulo Brown por sus atinados comentarios y sugerencias para la realización de este trabajo. Este trabajo fue financiado por el Programa de Desarrollo Profesional en Automatización, programa resultado del convenio existente entre la UAM-Azcapotzalco y Parker Haniffin, México.

1. F. Angulo Brown, J. Fernández Betanzos, and C.A. Díaz Pico, *Eur. J. Phys* **15** (1994) 38.
2. F. Angulo Brown, J.A. Rocha, and T.D. Navarrete, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28** (1995) 1.
3. G. Aragón G. and A. Canales P., Reporte de Investigación No. 202 (CBI-UAM-A)(1988), *Revista Reencuentro con . . .*, serie cuadernos **6**, UAM-X, (1992) 51
4. G. Aragón G., A. Canales P., and A. León G., *Curso Básico de Termodinámica de Gases Ideales*, Manuscrito PDPA, UAM-A (1997) 150.
5. K. Rolle C, *Termodinámica*, (Interamericana, México, 1984).
6. C.E. Wales, *Programmed Thermodynamics*. Vols I y II, (Mac Graw Hill, New York, 1970).
7. A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics* (Wiley, New York, 1988).
8. M. Mozurkewich and R.S. Berry, *J. Appl. Phys.* **53** (1982) 34.