



*II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010*

La enseñanza del uso racional de la energía desde el punto de vista termodinámico

Maria Isabel Sosa

**GECCU, Área Departamental Mecánica – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata
Calles 48 y 116 B1900TAG La Plata - Argentina
Tel/Fax: +54-221 423 6692 - E-mail: misosa@ing.edu.ar**

RESUMEN

En el presente trabajo se comenta la experiencia en la enseñanza del Uso Racional de la Energía URE en la asignatura Termodinámica B en las carreras de Ingeniería Industrial e Ingeniería Electricista. Esta actividad curricular está ubicada en el 2º año, lo cual implica que el estudiante posee escasos conocimientos previos en temas energéticos. Se introducen los principios, haciendo hincapié en el enfoque del uso racional de recursos primarios.

El análisis de un sistema térmico según el Primer Principio o Ley de Conservación de la Energía está basado en la eficiencia térmica de las componentes del sistema térmico y en reducir las pérdidas de energía. Toda mejora propuesta consiste fundamentalmente en buscar y solucionar pérdidas de energía producidas por deficiencias, como ser aislaciones térmicas, pérdidas de condensado, purgas no justificables, equipos inadecuados, etc.

Por otro lado, un análisis basado en el Segundo Principio no toma en consideración la cantidad sino la calidad de la energía. Apunta a evitar pérdidas de calidad de la energía, producidas espontáneamente en procesos irreversibles. Toda optimización según esta Ley implica analizar la exergía destruida, “energía disponible desaprovechada” no convertida en trabajo útil.

En el desarrollo de la asignatura se desarrollan conceptos de integración de procesos, como por ejemplo ciclo combinado, ciclo simple de cogeneración, ciclo combinado con cogeneración. La integración de los procesos de conversión impacta en el ahorro de recursos con vistas a reducir irreversibilidades, o sea la destrucción exergética. La matriz energética de nuestro País muestra una elevada dependencia de los combustibles fósiles, con una participación del 92% dentro del panorama de los recursos energéticos primarios. La explicación de estos conceptos y el análisis desde el punto de vista del URE resulta de vital importancia en la formación del futuro ingeniero. Se presentan ejemplos de aplicación y se discuten resultados.

Palabras Claves: Uso racional de la energía, exergía, experiencia didáctica.

1. INTRODUCCIÓN

La Carrera de Ingeniería Industrial se inicia en el año 1998 en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, Universidad Nacional de la Plata. En el programa original de la Carrera, se incluye la asignatura TERMODINÁMICA Y MÁQUINAS TÉRMICAS, con una carga horaria de 10 (diez) horas semanales. El dictado de la misma comienza en 1999 para alumnos de cambio de carrera con contenidos que resumían los de Termodinámica Técnica, Máquinas Térmicas I y II de la carrera convencional de Ingeniería Mecánica. La evidente desconexión de los temas con los requerimientos de la Carrera de Ingeniería Industrial produjo la disconformidad de los estudiantes quienes peticionaron el dictado exclusivo, aceptado por las autoridades de la Facultad y siendo designada en el año 2000 como Profesor Titular inicié mis actividades docentes en la cátedra. Originalmente la materia estaba ubicada en el segundo semestre del tercer año de la carrera, y en el 2000 recibí la primera promoción de alumnos inscriptos en la carrera de Ingeniería Industrial.

Posteriormente con cambios del Plan de estudios de la carrera de Ingeniería Industrial, la asignatura es denominada TERMODINÁMICA B y ubicada en cuarto semestre del segundo año, para quedar actualmente en el tercer semestre del segundo año con una carga horaria reducida a solo 6 (seis) horas. En el año 2002 se incorpora la asignatura TERMODINÁMICA B al nuevo plan de estudios de la carrera de Ingeniería Electricista, recibiendo los primeros alumnos de esta orientación en el año 2003.

Con el objetivo de adaptar los contenidos a las necesidades de la carrera se propuso un programa que incluyera las unidades y sistemas térmicos relevantes en Plantas Industriales y su optimización, tanto en su diseño como de su operación. Si bien el tiempo disponible es reducido con relación al que se dispone en otras carreras se ha tratado de introducir el tratamiento del Uso Racional de la Energía URE en los sistemas térmicos. Cabe señalar que en la carrera de Ingeniería Industrial, esta asignatura es la única donde se desarrollan los conceptos térmicos de la generación energética. Actualmente con la reducción de cuatro horas respecto del proyecto original y la reubicación de la asignatura resulta dificultoso cumplir con las metas planteadas, pero a pesar de ello se trata de dar un enfoque del URE.

2. TERMODINÁMICA B

Esta asignatura, que se dicta en la UNLP para alumnos de las carreras de Ingeniería Industrial e Ingeniería Electricista, incluye los temas usuales de cursos de Termodinámica y conceptos de Máquinas Térmicas. Son objetivos de la asignatura que el estudiante

adquiera conocimientos básicos y fundamentales de:

- los Principios de la Termodinámica
- la conversión de recursos primarios a vectores energéticos utilizables
- las características operativas de unidades térmicas

que aplique estos conocimientos en el análisis de:

- sistemas térmicos de plantas industriales
- la adecuada selección de las unidades según criterios técnicos y económicos
- ahorro en recursos energéticos según el Primer y Segundo Principio de la Termodinámica
- generación y utilización del vapor en sistemas industriales

2.1. Contenidos sintéticos de la asignatura

Los contenidos se hallan divididos en cuatro unidades, cuyos contenidos sintéticos se detallan a continuación:

1. *Fundamentos de la Termodinámica*

Conceptos fundamentales. Primer Principio: Balance entálpico. Segundo Principio: Balance entrópico y exergético. Ciclos de potencia de vapor y de gas. Ciclos combinados. Cogeneración. Ciclos de refrigeración. Bombas de calor. Mezclas de gas-vapor. Procesos de acondicionamiento

2. *Recursos energéticos y su conversión a formas utilizables*

Procesos de conversión. Generación de energía térmica. Combustibles: Combustión y contaminación. Generación de vapor: Calderas convencionales y de recuperación. Utilización del vapor en sistemas industriales. Eficiencia térmica. Repotenciación. Motores de combustión interna

3. *Características operativas y selección tecnoeconómica de unidades térmicas*

Comportamiento de unidades térmicas. Selección de unidades según criterios técnicos. Ahorro de recursos según el Primer y Segundo Principio de la Termodinámica

4. *Nuevas Perspectivas en la generación energética*

Perspectivas. Potencias instaladas. Análisis comparativo de generación energética

La primera *Fundamentos de la Termodinámica* introduce los conceptos básicos y las tres restantes que se relacionan con las unidades térmicas y la generación energética, se desarrollan en forma integrada con la primera. Se analizan en particular la utilización del vapor en plantas industriales y los recursos según principios del URE desde el punto de vista energético y exergético. En la última se discuten temas relacionados con la energía basada en el hidrógeno, la cogeneración con celdas de combustibles y la generación eólica, geotérmica y solar. En forma sucinta se presenta un análisis comparativo de la generación energética en el país, información sobre potencias instaladas y de costos de generación.

2.2 Actividad curricular

La actividad curricular se compone de trabajos prácticos realizados en el laboratorio, seminarios de discusión de problemas propuestos y visitas a plantas industriales. Como practica de laboratorio se determina la performance de un ciclo Rankine equipo didactico con el cual cuenta la institucion. Las visitas se realizan al *Complejo Industrial La Plata CILP (ex Refinería)*, plantas industriales localizadas en el Polo Industrial Ensenada.

- *Complejo Industrial La Plata CILP (Refinería) DOLE - División Operación y Distribución de Lubricantes*
- *Visita a Planta y al Sector Talleres de mantenimiento*

3. SITUACIÓN ENERGÉTICA Y URE

Los vectores energéticos se obtienen de los recursos generalmente de origen fósil a través de procesos de conversión. Estos, en especial los convencionales, son generalmente poco eficientes y producen efectos indeseables al medio ambiente. El progreso tecnológico de nuestra sociedad ha conducido a consumos de energía crecientes, en especial de energía eléctrica, la cual acciona desde pequeños artefactos hogareños, las comunicaciones, los transportes, hasta complejas y pesadas maquinarias industriales. Sus consecuencias son visibles en la reducción o agotamiento de reservas de recursos no renovables, la contaminación, las alteraciones de los ecosistemas, entre otros.

Se considera importante dentro del desarrollo de la asignatura en cuestión destacar efectos medioambientales de los procesos de conversión y en especial de la combustión, hacer hincapié en las emisiones de gases de efecto invernadero, analizar brevemente la posibilidad de generar certificaciones de reducciones de emisiones por MDL, impulsado por el Protocolo de Kyoto [1]. Si bien no es posible dada la duración de la asignatura ahondar en este tema, el alumno debe contar con la información y analizar las formas de mejorar/optimizar los sistemas térmicos

El sistema mundial energético esta en creciente evolución. Unas décadas atrás el panorama era radicalmente distinto al actual. Las fuentes renovables de energía, incluidas la solar, eólica y los biocombustibles se han incorporado a la energía convencional, térmica, hidráulica y nuclear, y constituyen una parte importante de la matriz energética. La sociedad mundial no ha encontrado aun los mecanismos adecuados para manejar la contaminación ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero GEI, [1]. Ha logrado y se ha propuesto metas establecidas por el Protocolo de Kyoto para la reducción de los GEIs. A nivel mundial se observa un aumento significativo en la demanda energética vinculada al desarrollo demográfico y económico. Las reservas de petróleo y gas están en angustiante disminución y en un futuro cercano no podremos hacer frente al crecimiento de la demanda si no se toman las medidas pertinentes. A la energía nuclear y a derivada de combustibles fósiles convencionales debe integrarse otras fuentes de energía. Dentro de este marco las renovables jugaran un rol importante, si bien el uso de más energía se traduce en una mayor emisión de dióxido de carbono y por consecuencia afectando el cambio climático. Existe una diferencia marcada entre la situación en los países del Primer Mundo y los países en vías de desarrollo. Se han introducido nuevas tecnologías en lo que respecta a reducción del consumo energético en conglomerados, edificios, luminarias, artefactos eléctricos, electrodomésticos y transporte vehicular. En nuestro País el desarrollo no sigue las pautas mundiales pero poco a poco busca vías de cambio. No obstante se observa a nivel general una tendencia de la incorporación de medidas del Uso racional en todos los ámbitos.

De acuerdo a lo expuesto, se considera importante que el alumno de grado conozca la situación energética del país, en cuanto a la generación, centralizada y descentralizada, el uso/demanda de combustibles y las perspectivas de generación que se discuten en los países industrializados para este siglo y las perspectivas que se planean en Argentina para la próxima década. Asimismo debe tener información acerca del análisis de los sistemas de potencia no sólo desde el punto de vista del rendimiento térmico, sino también exergético.

4. USO RACIONAL DE LA ENERGÍA Y CONTENIDOS DE TERMODINÁMICA

El Uso Racional de la Energía URE reconoce dos niveles de problemas, que implican dos de los principios de la Termodinámica:

Considerando el *Primer Principio*, Principio de Conservación de la Energía, el análisis se basa en la cantidad de energía y en la eficiencia energética, sea a través del rendimiento térmico o del coeficiente de operación, para minimizar las pérdidas y reducir consumos superfluos, debidas a deficiencias en los elementos del sistema como aislaciones ineficientes, purgas, no justificables, condensado, quemadores sucios, válvulas con malos cerramientos, fallas en trampas de vapor, instrumentación de control en mal estado o incorrectamente operados, equipos inadecuados o sobredimensionados, etc.

El *Segundo Principio*, Principio de Factibilidad Termodinámica, analiza la calidad de la energía, apunta a evitar pérdidas que se producen espontáneamente en la mayoría de los procesos reales, conocidos como

irreversibles. Un estudio exergético de un dado sistema arroja valores del trabajo útil y de la exergía destruida en el proceso, para optimizar el sistema. Este concepto aplicable en todos los procesos energéticos, enfoca entre otras cosas la atención en el ingreso de energía a través de un flujo de combustible y la transferencia energética al exterior.

El *Programa de Uso Racional de la Energía* (PURE), impulsado por el Gobierno, se encuadra dentro de la primera tipificación; entiende el URE sólo a través de la disminución del consumo energético y no fomenta su calidad. La utilización de energías renovables debiera estar contemplada en todo programa de uso racional, así como un estudio exergético que valore la calidad del sistema.

.El uso racional de los recursos primarios en los procesos de conversión, [2] y de la utilización de las formas secundarias, o sea la producción del efecto deseado con el mínimo consumo de recursos y afectación del medio ambiente, se impone como un primer concepto cuya necesidad de aplicación resulta imperiosa, y que debería evolucionar aún más en la medida en que los factores mencionados lleguen a una criticidad próxima al límite de lo aceptable, requiriéndose un enorme esfuerzo en el desarrollo de tecnologías de sustitución y otras, si se desean mantener para las futuras generaciones, los estilos de vida que hoy se conocen como modernos. Paralelamente será necesario cuestionar la vigencia de tecnologías, conceptos, y regulaciones, de tal forma de apoyar la materialización de los cambios que se requieran.

5. ENFOQUE DEL CURSO

El enfoque del curso tiende a prestar menor atención al rendimiento térmico de las unidades y/o instalaciones que a un enfoque exergético o medioambiental. Generalmente la generación de calor se relaciona directamente con el uso de calderas convencionales que operan con gas natural, fuel oil o gas oil. Dentro de las posibilidades se propone incluir ejemplos de generadores de vapor operando con residuos agrícolas y/o biomasa, entre otros. El estudiante debe tener información sobre la utilización de recursos renovables, analizando ventajas, desventajas y costos, así como analizar el sistema desde el punto de vista de los riesgos contaminantes que acarean los productos de la combustión de hidrocarburos y la emisión de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global del planeta.

Los actuales estudiantes serán protagonistas en el futuro de acciones en el campo profesional y en muchos casos deberán ser participes de decisiones acerca de optimizaciones de sistemas industriales desde el punto de vista energético. Si bien no se espera que los mismos dada en su trabajo profesional, debe prestarse especial atención en el análisis de procesos que recuperan calor.

Como actividad curricular de la asignatura se propone el análisis de un sistema complejo, proponiendo el sistema térmico adecuado como se indica a continuación.

EJEMPLO 1:

Se dispone de una turbina de gas TG Siemens V64.3 con las características dadas en la tabla siguiente. Se desea diseñar un ciclo de potencia combinado CC de gas-vapor. Se supone que el compresor con rendimiento isentrópico del 90%, toma aire del exterior a 27° C. La TV opera entre 8 MPa y 50 kPa, utilizando una caldera de recuperación de calor para generar el vapor por medio de los gases de escape de la TG. Si propone hacer una repotenciación a ciclo combinado. Proponer el ciclo de vapor adecuado e indicar las ventajas y desventajas desde el punto de vista del URE.

Nombre de la TG	V64.3A
Fabricante	Siemens
Potencia ISO	67.400 kW
Caudal de combustible	13.945,2 Kg/h
Consumo específico	10.516 kJ/kWh
Precio aproximado (año 2003)	15.900.000 U\$S
Precio específico	236 U\$S/kW
Relación de compresión	15,8
Caudal de gases	185,3 Kg/seg
Rendimiento isentrópico	86 %
Caudal de gases	190,96 kg/s
Velocidad de la turbina	3000/3600 rpm
Temperatura de entrada de gas	1000 °C
Temperatura de salida de gases	590 °C
Peso aproximado	110.000 kg
Dimensiones aproximadas	11x4x4,8 m

Hacer un esquema de la instalación. a) Se solicita analizar el ciclo CC según el Primer y Segundo Principio de la Termodinámica. b) Proponer una mejora para el ciclo de potencia

EJEMPLO 2:

Utilizando la turbina TG anterior se desea utilizar la salida de los gases para generar vapor sobrecalentado VSC a 8 MPa y 400° C Haga un esquema del sistema y proponga la TV adecuada.

6. LA COGENERACIÓN Y EL URE

Otro tema que es tratado en más detalle es el de la cogeneración, o sea la generación de los vectores energéticos (electricidad, calor y/o frío) a partir del mismo recurso primario, [3-5]. La matriz energética de nuestro País muestra una elevada dependencia de los combustibles fósiles, con una participación del 92% dentro del panorama de los recursos energéticos primarios.

La aplicación de la cogeneración permite ahorros energéticos que pueden llegar a un 30- 40% dependiendo del tamaño de la instalación, [4]. Utilizar un sistema de cogeneración, de tipo multipropósito, implica la disminución de emisiones de dióxido de carbono respecto de dos sistemas monopropósito. Esta mitigación de emisiones lleva a disminuir el efecto invernadero. Instalar un sistema de cogeneración implica un costo elevado de inversión, el que puede ser ayudado por la certificación de reducción de emisiones CER, de acuerdo al Mecanismo de Desarrollo Limpio MDL impulsado por Naciones Unidas, [1].

En las carreras mencionadas en este trabajo, el enfoque que se realiza en la enseñanza de ciclos de potencia incluye:

- Ciclos de vapor (Rankine simple, regenerativo, con sobrecalentamiento y recalentamiento)
- Ciclos de gas (motores de dos y cuatro tiempos, Brayton simple, regenerativo y modificaciones)

Este enfoque no incluye la tendencia actual del uso de hidrógeno en la generación energética. Sin quitar estos contenidos se trata de incluir sistemas térmicos a hidrógeno. La tendencia actual en los países desarrollados es incorporar sistemas con celdas de combustible a la generación energética, tanto centralizada como descentralizada y la utilización de hidrógeno en el transporte vehicular. La ventaja de estos sistemas radica en el proceso de combustión. Los hidrocarburos producen óxidos de carbono al

combustionarlos con aire en unidades tales como calderas, cámaras de combustión, etc. Al utilizar hidrógeno el producto es vapor de agua, sustancia no contaminante del medio ambiente. Esta temática debería ampliarse con la utilización de celdas de combustible en sistemas híbridos, así como en motores de combustión a hidrógeno.

En la Figura 1 se indica el mejoramiento de la eficiencia térmica de un sistema de turbina de gas TG moderna (30-40%) con el de una celda de combustible de alta temperatura (40-60%) y de un sistema de ciclo combinado con TG y celda de combustible, alcanzando eficiencias del 85%.

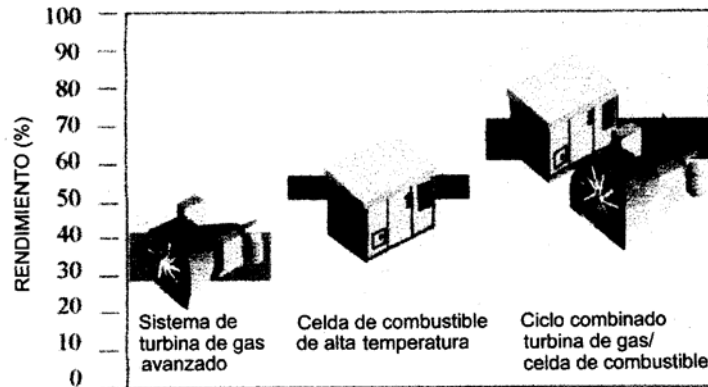


Figura 1- Rendimientos térmicos de sistemas con turbina de gas, celda de combustible y ciclo combinado con celdas de combustible.

En los países desarrollados se prevé una transición importante a sistemas a hidrógeno y a energías renovables para mediados de este siglo, como indica la Figura 2.

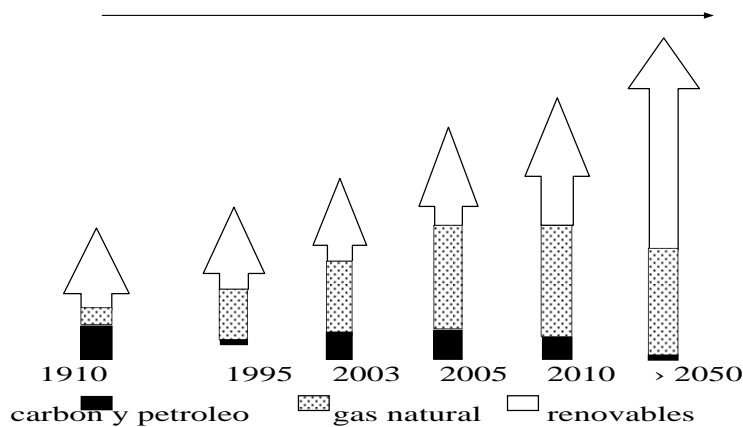


Figura 2- Evolución prevista de la implementación de tecnologías de hidrógeno con disminución de la producción de dióxido de carbono.

La Ley N° 26123, incentiva la aplicación de tecnologías que permitan utilizar hidrógeno [7]. No obstante, nuestro país se halla muy retrasado en este tipo de aplicaciones, pero se considera que en la formación de grado deben incluirse estos conceptos.

La selección de unidades térmicas debe tomar en cuenta el uso racional de recursos primarios y el enfoque exergético. Se proponen ejemplos con la incorporación de la energía eólica o solar para generación energética combinada a ciclos de refrigeración con sistemas de absorción binaria, como el amoniaco-agua,

o como los planteados Levenspiel en su libro *Fundamentos de la Termodinámica* [6], donde presenta ejemplos de aplicación con inclusión de energías renovables, como el de una planta de potencia compacta para utilizar desechos agrícolas al analizar ciclos de vapor o el caso de una estación de potencia mini-OTEC (conversión de energía térmica del océano) para el estudio de ciclos termodinámicos. Otro ejemplo sugerido es el de una bomba de calor que utiliza la diferencia térmica entre el agua del fondo de un lago y el ambiente para calefactar una vivienda.

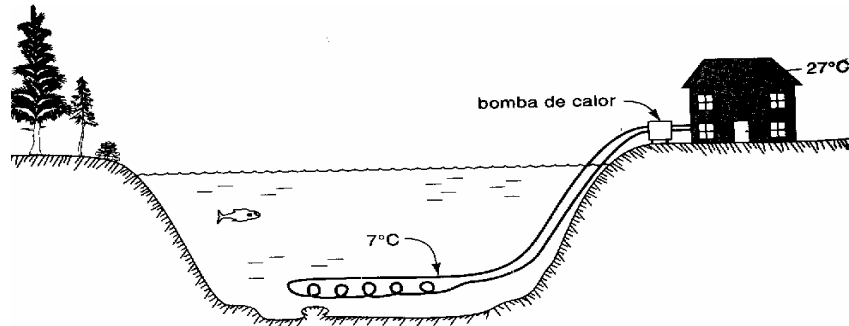


Figura 3- Bomba de calor

La enseñanza de Termodinámica debe incluir ejemplos como estos, pues ayudan al estudiante a comprender los fundamentos y sobre todo a incursionar e interesarse por la problemática ambiental.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se comenta la experiencia en la enseñanza del Uso Racional de la Energía URE en la asignatura Termodinámica B en las carreras de Ingeniería Industrial e Ingeniería Electricista.

En el desarrollo de la asignatura se desarrollan conceptos de integración de procesos, como por ejemplo ciclo combinado, ciclo simple de cogeneración, ciclo combinado con cogeneración. La integración de los procesos de conversión impacta en el ahorro de recursos con vistas a reducir irreversibilidades, o sea la destrucción exergética. La explicación de estos conceptos y el análisis desde el punto de vista del URE resulta de vital importancia en la formación del futuro ingeniero.

En el presente trabajo hace hincapié en el Uso Racional de la Energía URE que reconoce dos niveles de problemas según los principios termodinámicos. La matriz energética de nuestro País muestra una elevada dependencia de los combustibles fósiles, con una participación del 92% dentro del panorama de los recursos energéticos primarios. La explicación de estos conceptos y el análisis desde el punto de vista del URE resulta de vital importancia en la formación del futuro ingeniero. Se presentan ejemplos de aplicación y se discuten resultados.

Se presentan las metodologías de enseñanza de la asignatura Termodinámica que se dicta en la UNLP, donde se considera importante la inclusión de la temática ambiental y el URE. Se presentan ejemplos de aplicación en la enseñanza de grado.

8. REFERENCIAS

[1] A. Fushimi y M. I. Sosa, *Proyecto BIRF TF51287/AR, Actividades Habilitantes para la Segunda Comunicación Nacional de Argentina a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.*

Estudio sobre Mitigación de Emisiones a través de Medidas de Eficiencia Energética, Cogeneración en el sector industrial', La Plata, 2005.

[2] M. I. Sosa, *I CAIM 2008, PRIMER CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA La Cogeneración y el efecto invernadero*, FoDAMI, octubre, Bahía Blanca, 2008.

[3] M. I. Sosa y A. Fushimi, *AVERMA, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente A. La Cogeneración en el Contexto de las Tecnologías de Conversión Energética del Futuro*, **Vol. 4**, Nº II, pp. 07.01/.06, ASADIT- Argentina, 2000.

[4] M. I. Sosa y A. Fushimi, *6º Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de la Energía Eléctrica, La Utilización Racional de los Combustibles, una Responsabilidad no valorada debidamente en nuestro País*, Mar del Plata, Argentina, Noviembre, Artículo A-102, 2007.

[5] M. I. Sosa, A. Fushimi, R. Pedernera, A. Adradas y M.S. Rodriguez, *Proceedings of 19th International Congress of Mechanical Engineering, Cogeneration and Clean Development Mechanism*, **Vol. 1**, Brasilia, Brasil, Paper COBEM2007-2277, 2007.

[6] O. Levenspiel, *Fundamentos de la Termodinámica*, Latinoamericana Prentice Hall Co., 1º edición, Méjico, 1997.

[7] M. I. Sosa, A. Boucíguez y R. Lozano, *AVERMA, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Inclusión de temas relacionados a energías alternativas en la asignatura Termodinámica para la enseñanza de grado*, **Vol. 4**, Nº II, pp. 07.01/.06, ASADIT- Argentina, 2009.

Agradecimientos

La autora agradece al Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata UNLP por el apoyo financiero aportado para la participación en este evento.