

PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS DEL URE EN SISTEMAS TÉRMICOS

María Isabel Sosa, Alberto Fushimi
 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
 Avda 1 esq. Calle 47 (1900) La Plata, BA
 Teléfono: 54 221 470 7176
 misosa@volta.ing.unlp.edu.ar, afushimi@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo los autores presentan en forma simple, los conceptos que derivan del análisis de sistemas térmicos según el Segundo Principio de la Termodinámica, como aporte a una mayor participación de profesionales y técnicos en aspectos del Uso Racional de la Energía, URE.

Un sistema térmico debe ser analizado no solo según el Principio de Conservación de la Energía, sino también según el Segundo Principio, tomando en cuenta consideraciones exergéticas. En nuestro País, la comprensión y adecuada aplicación del concepto exergético está muy lejos de alcanzar un nivel razonable de aplicación real. La inclusión del Segundo Principio permite la valoración cualitativa de las magnitudes de la energía en un sistema térmico, respecto a los alrededores con el que interactúa y permite ahorros sustanciales de recursos primarios.

El actual panorama de utilización de combustibles fósiles, su disponibilidad previsible en un futuro próximo, y nivel de deterioro del medio ambiente revela una tendencia incompatible con los conceptos de sustentabilidad que la racionalidad muestra como necesaria.

Palabras Clave: Segundo Principio de la Termodinámica. Exergía. Uso Racional de la Energía. Recursos energéticos. Procesos de conversión.

INTRODUCCIÓN

La matriz energética de nuestro País muestra una elevada dependencia de los combustibles fósiles. En efecto, según datos de la Secretaría de Energía, S de E, la participación de los diferentes recursos energéticos primarios en el total para el año 2000, se indica en la Figura 1, siendo del 92% para los combustibles fósiles, petróleo y gas natural.

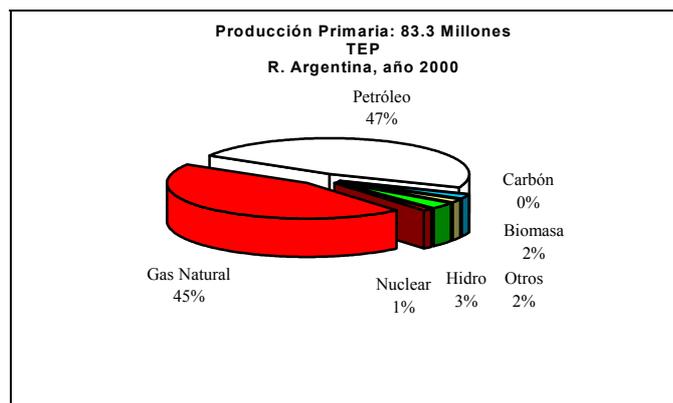


Figura 1: Producción de recursos energéticos primarios en Argentina, (S de E), año 2000

Las dos aplicaciones energéticas de los combustibles son s, la obtención de trabajo mecánico (electricidad en la mayoría de los casos) y del vector calórico. Ambos resultan procesos separadamente ineficientes; el primero desde el punto de vista entrópico y el segundo desde el punto de vista exergético.

Shonder y Mc Lain (1995) hacen notar que durante 1992 en los Estados Unidos se utilizaron 30900 PJ de energía primaria para la conversión termoeléctrica, siendo las pérdidas de 20300 PJ, o sea de un 66%. Asimismo indican que una recuperación intensiva de esta energía mediante la cogeneración provocaría un impacto significativo en el consumo global de energía del País y en la emisión de contaminantes al medio ambiente. Aparte de lo impactante que resultan estas cifras, es un ejemplo que muestra claramente el enorme espacio disponible para reducir el consumo de combustibles fósiles mediante el Uso

Racional de la Energía, URE, si se lograra alcanzar el interés de la Comunidad y de las generaciones futuras en armonía con los individuales, y se pudiera realizar una acción integrada en la producción y uso de la energía acorde a la racionalidad derivada de las leyes físicas.

En este trabajo los autores intentan presentar en forma conceptualmente simple, los conceptos que derivan del análisis de sistemas térmicos según el Segundo Principio de la Termodinámica, como aporte a una mayor participación de profesionales y técnicos en aspectos del Uso Racional de la Energía.

PRIMER Y SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA EN SISTEMAS TÉRMICOS

El Uso Racional de la Energía reconoce dos niveles de problemas, asociados respectivamente a cada uno de los principios de la Termodinámica:

- 1) Un análisis según el Primer Principio de la Termodinámica 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. El denominado “housekeeping”, o “captura de BTU’s”, consiste pues en buscar y solucionar las pérdidas de energía que se producen por deficiencias en los elementos de un sistema, como ser aislaciones térmicas deficientes, pérdidas de condensado, purgas no justificables, trampas de vapor deficientes, quemadores descalibrados, instrumentación de control en mal estado, válvulas que no cierran correctamente, equipos inadecuados, etc.
- 2) Un análisis según el Segundo Principio de la Termodinámica Principio toma en consideración la calidad de la energía. Apunta a evitar las pérdidas de calidad de la energía, producidas espontáneamente en los procesos denominados “irreversibles”. Consideremos un sistema térmico que presenta desequilibrio de alguna naturaleza con los alrededores con los que interactúan. El sistema tendrá un vector energético, un contenido entálpico, pero según el Segundo Principio, solo una parte de esta energía, la exergía, puede transformarse en trabajo mecánico. El resto es “anergía”, energía que no puede transformarse en trabajo. Para sistemas circulantes será pues:

$$\text{Exergía} + \text{Anergía} = \text{Entalpía}$$

La exergía de un sistema térmico se define respecto de un estado de referencia, los alrededores, o sea el sistema con el que el sistema térmico interactúan (Bejan et al., 1996) y se la define como la cantidad máxima teórica de trabajo obtenible cuando el sistema térmico interactúa con los alrededores hasta alcanzar el equilibrio con éste. La energía que no puede ser transformada en trabajo es anergía. Esta “degradación de la energía” tiende a producirse espontáneamente y finaliza cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio con los alrededores, o sea el sistema está sin capacidad de producción de trabajo; toda la entalpía que contiene es anergía. Se comprende pues que el buen uso de un recurso energético (URE) implica no sólo minimizar las pérdidas cuantitativas inútiles de energía del sistema, (Primer Principio), sino minimizar también en lo posible la degradación de la energía.

Por ejemplo, para el vapor de agua producido en caldera convencional o generador de vapor ideal con rendimiento entálpico del 100%, los valores calculados para algunos parámetros típicos se muestran en la Tabla 1, considerando como estado de referencia, (alrededores), líquido saturado a 40°C.

Tabla 1: Entalpía, exergía, anergía e eficiencia en la obtención de vapor de agua en un generador de vapor con rendimiento térmico del 100%

Presión	Temperatura	Entalpía	Exergía	Anergía	Exergía / Entalpía	Anergía / Entalpía
Bar (a)	°C	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	%	%
10	179.9	2608.8	726.8	1882.0	27.9	72.1
20	300.0	2856.4	916.7	1939.7	32.1	67.9
30	420.0	3108.5	1099.8	2008.7	35.4	64.6
42	480.0	3228.4	1214.5	2013.9	37.6	62.4
50	490.0	3242.0	1246.7	1995.3	38.5	61.5
64	500.0	3249.3	1285.0	1964.3	39.5	60.5
105	525.0	3264.8	1361.4	1903.4	41.7	58.3

En la última columna se muestran los porcentajes de anergía del vapor con relación al calor ingresado como recurso primario, entalpía, evidenciando la enorme degradación que produce el generador de vapor. En una caldera ideal se produce vapor saturado de 10 bar con una eficiencia exérgica del 27.9%, o sea degrada el 72.1%. En cambio si se tratara de una caldera industrial con rendimiento térmico del 80%, la eficiencia exérgica disminuye al 22.3% degradando el 77.7% de la energía del recurso en la conversión. Esta degradación se debe a irreversibilidades del proceso de combustión, fricción de las corrientes de los fluidos y en especial a la enorme diferencia de temperaturas entre los fluidos (gases de combustión y el agua) en la transferencia térmica en la caldera.

Los bajos valores de exergía del vapor con relación a la entalpía que debe transferirse para alcanzar el estado de referencia deseado hacen que la cantidad de trabajo que el vapor puede producir al expandirse en una turbina sea muy reducido con relación a la entalpía de la corriente de escape. También explican las razones por las que un ciclo de generación convencional a vapor de gran tamaño a nivel mundial, con parámetros de 310 bar de presión, temperaturas de 620/566/358°C, doble recalentamiento y 9 etapas de precalentamiento regenerativo, (Retzlaff y Ruegger, 1996), alcanza eficiencias netas de generación que no exceden significativamente el 40 a 45% de eficiencia eléctrica neta, siendo valores de entre 30 y 40% típicos en centrales a vapor de nuestro País.

Bajo estas consideraciones, vemos una diferencia sustancial desde el punto de vista termodinámico entre la turbina de gas TG y la de vapor TV, máquinas similares desde el punto de vista mecánico. La turbina de gas opera con los gases generados por combustión, mientras que la turbina de vapor recibe vapor generado en una caldera, donde los gases de combustión transfieren su energía al sistema agua-vapor la energía. Debido a un elevado nivel de irreversibilidad, el vapor pierde una parte sustancial de la exergía de los gases de combustión en este proceso. La caldera convencional es uno de los equipos de mayor irracionalidad termodinámica. Si se compara los valores indicados en la Tabla 1 de la exergía del vapor obtenido con la cantidad de energía en términos de entalpía insumida, los resultados son decepcionantes. Esto pone de manifiesto la irracionalidad de utilizar una energía con elevado nivel de exergía o desequilibrio respecto a los alrededores para suplir una demanda de baja exergía, desperdiciando el excedente.

En la Figura 2 se indican los rendimientos y los rangos de temperatura en que operan las turbinas de gas, antiguas y modernas, las de vapor, las de contrapresión y una caldera industrial destinada a la producción de un vector de uso calórico.

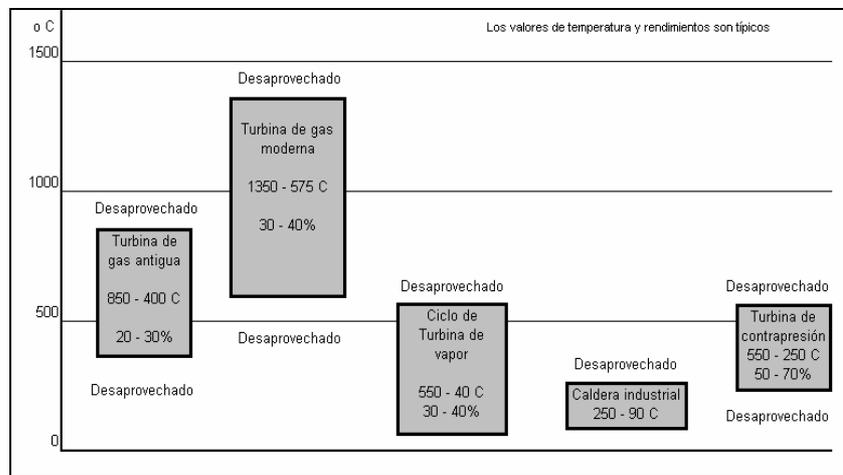


Figura 2: Rendimiento térmico y rangos de temperatura de las turbinas de gas, de vapor y de una caldera industrial típica

Como se observa en la Figura 2, la tecnología de la turbina de gas ha evolucionado considerablemente desde las de primera generación, con temperaturas máximas del orden de 800°C, a las actuales operando cerca de 1400°C y con temperaturas de escape que han aumentado de valores menores a 400°C a valores superiores a 600°C. Se han incrementado también las relaciones de compresión de 5 a 8 a valores de entre 20 y 30 y mayores. Las turbinas de vapor han conservado sus características y prestaciones. Finalmente se observan los bajos valores de temperatura del vapor industrial, típicamente dentro de los 250°C. Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Considerando que por razones de resistencia de los materiales actualmente disponibles, y la tecnología del enfriamiento de los mismos, la temperatura máxima a la que puede comenzarse su utilización es del orden de 1400°C, valor alcanzado solo por algunas turbinas modernas. Si las mismas operan en ciclo abierto, los rangos de temperatura por encima y por debajo del rectángulo no son aprovechados y se pierden como irreversibilidades de diversa naturaleza. Se interpretan como la desaparición espontánea e inútil del desequilibrio o capacidad para generarlo, que el recurso primario poseía al ingresar al sistema.
- El nivel de desaprovechamiento por encima de la temperatura del vapor producido por la caldera industrial, es llamativamente elevado, ratificando la típica ineficiencia que el análisis le asigna, (Tabla 1), contrariamente al concepto generalizado de que la caldera es una unidad térmica eficiente, como lo es si se lo analiza desde el punto de vista puramente entálpico. Pero ha destruido la mayor parte del desequilibrio que el combustible aporta al sistema con relación a los alrededores con los que el mismo interactúa.
- La turbina de vapor es por si misma una unidad eficiente, pero el vapor que recibe es un vector fuertemente degradado por la caldera que lo produce.
- Se observa también que es posible integrar los procesos que cumplen las turbinas de gas, de vapor, y también con el vector calórico que fuera necesario suministrar.

INTEGRACIÓN DE PROCESOS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL DESEQUILIBRIO DISPONIBLE

Una forma de reducir la destrucción exergética es mediante la integración de procesos que utilicen en cascada el desequilibrio total disponible, de tal forma de maximizar la suma de los efectos útiles obtenidos, como por ejemplo:

- Constituir un ciclo combinado, colocando en cascada la turbina de gas y por debajo de esta la caldera de vapor que alimente una turbina de vapor
- Constituir un ciclo simple de cogeneración, en caso que se requiera vapor como vector calórico, intercalando una turbina de gas por encima y reemplazando parte de la degradación de una caldera convencional
- Por último, también es posible instalar una turbina de gas, por debajo de esta una caldera de recuperación que genere vapor a una presión y temperatura mayor que la necesaria para el vector calórico, utilizando este diferencial una turbina de contrapresión de parámetros adecuados. (ciclo combinado con cogeneración)

Estos son tres casos integrados de dos o más unidades térmicas, siendo evidente que son superiores en cuanto al aprovechamiento integral de la energía del combustible aportado al sistema. Por ello, serían los procesos cuya aplicación resulta más conveniente para la sociedad desde el punto de vista del buen uso de los recursos primarios que la misma posee o que debe procurar en el mercado internacional, para la producción de los vectores energéticos que el sistema demande.

El impacto de la integración de los procesos de conversión en el ahorro de recursos con vistas a reducir las irreversibilidades, la destrucción de exergía, es sustancial, pudiendo formularse diferentes esquemas conceptuales, en cada uno de ellos es posible seleccionar las unidades que mejor se adecuen a la aplicación específica. Sin embargo, la implementación de estos sistemas integrados tiene dificultades prácticas, por un lado derivadas de la escasa transportabilidad del calor y de los montos de inversión requeridos. Por otro lado, mientras siga siendo barata la energía, los usuarios de energía están más interesados en su disponibilidad y uso que en la eficiencia con que se producen los vectores secundarios demandados. Pero es fácil comprender que se trata de un comportamiento poco responsable, y que resulta conveniente solo para quienes tienen intereses en mantener sus actuales negocios sin cambios, aun frente a la evidencia de una inexorable necesidad de evolución en un futuro no lejano, y cuyo costo de ignorarlo por parte de los funcionarios responsables, recaerá como siempre ocurre, sobre los usuarios.

Tabla 2: Participación de la cogeneración en Europa frente a la generación global

Holanda	40%	Alemania	14%
Dinamarca	40%	Portugal	12%
Finlandia	34%	Hungría	12%
Austria	23%	Italia	11%
Checoslovaquia	19%	Polonia	11%
Promedio Europa		9%	

Los porcentajes de participación de la cogeneración con relación a la generación eléctrica total en los Países Europeos (Flanagan, 1999) se indican en la Tabla 2, siendo del 40% en Escandinavia, mientras que el promedio en Europa es del 9%. Los países de la Unión Europea han fijado como objetivo duplicar la cifra promedio, llevándola al 18% para el año 2010, con inversiones anuales de unos 3000 millones de Euros. En nuestro País, la correspondiente cifra de participación no llega al 3%, siendo prácticamente nula la preocupación de los funcionarios y del público en general por esta falta de reacción ante lo previsible. Contrariamente a una conducción que tienda hacia la integración de los procesos de obtención de los vectores energéticos demandados, en la forma en que el conocimiento científico lo indica, sus correspondientes mercados (electricidad y combustible) han sido establecidos en forma independiente con el costo de la no-integración que recae sobre la Sociedad. Ante la eminente finalización de la era de los combustibles fósiles abundantes y baratos, el Uso Racional de la Energía es la acción inmediata. Mas que definir su práctica como racional, resulta más apropiado definir como irracional el no hacerlo siempre que exista la posibilidad. Los Países de la Unión Europea evidencian haber comprendido adecuadamente este concepto. No podemos decir lo mismo en el caso nuestro.

CICLOS INTEGRADOS COMPARADOS CON CICLO SIMPLE

Consideremos una planta industrial con demandas de ambos vectores energéticos, 40 MW en la forma de trabajo mecánico o electricidad y 48 MW de calor. Un ciclo simple para la demanda energética sería el indicado en la Figura 3, donde la entrada es de 100 MW y la turbina de gas TG genera 40 MW, con una destrucción exérgica del 60%.

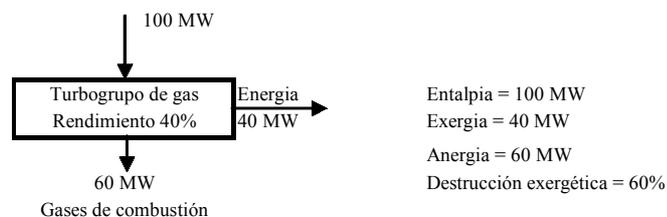


Figura 3: Ciclo simple con TG (demanda energética)

Según el Segundo Principio no se puede superar los 40 MW, dado que el rendimiento de la TG es del 40%. Una forma de sistema integrado sería pensar en utilizar la exergía disponible en los gases de combustión (60 MW) en la obtención de trabajo mecánico extra mediante la adopción de un ciclo combinado, como indica la Figura 4.

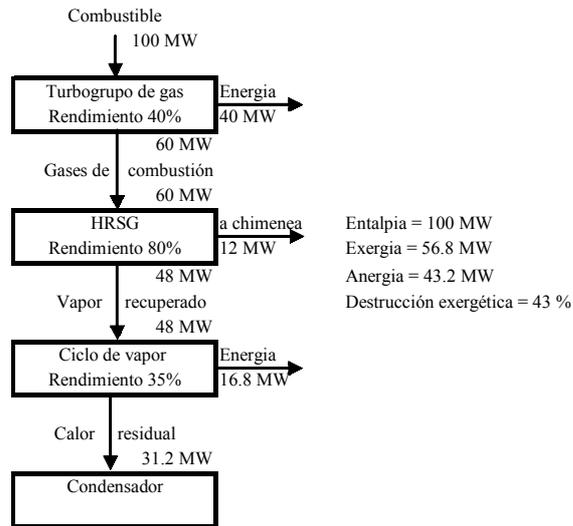


Figura 4: Ciclo combinado (demanda energética)

La eficiencia eléctrica alcanzada es del 56.8 %, un 40% superior al caso del ciclo simple. La destrucción exergética ha disminuido del 60% al 43%, indicando un mejor uso del recurso primario. El problema que se plantea entonces es la utilización de este trabajo adicional generado (16.8 MW).

Para la demanda calórica suponemos una caldera industrial de 80% de rendimiento dada por la Figura 5, donde para el calor requerido 48 MW, se requiere una entrada de 60 MW.

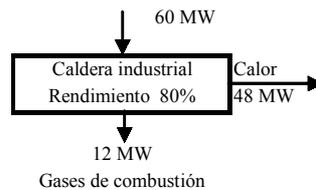


Figura 5: Generación convencional (demanda calórica)

Si la Planta demanda ambos vectores podría pensarse en un ciclo de cogeneración para una misma turbina de gas (Figura 6).

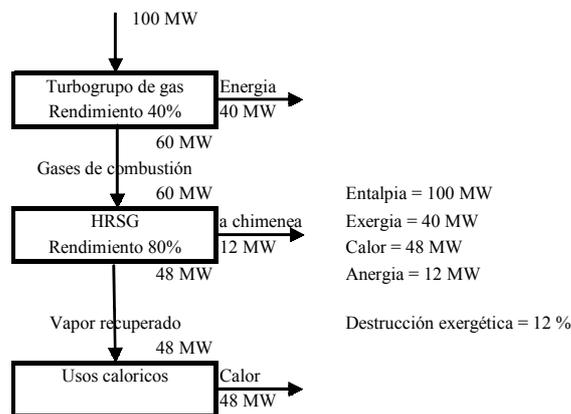


Figura 6: Ciclo de cogeneración (demanda calórica y eléctrica)

En el caso de cogeneración, el sistema permite la utilización de la entalpia del vapor, fuertemente “anergético”, y que en la medida en que sus parámetros son bajos respecto a los de los gases de escape de la turbina de gas, es posible intercalar una turbina de contrapresión que transforma la exergía en exceso al correspondiente al vector calórico en trabajo mecánico útil con una eficiencia teórica del 100%, con lo que el ciclo de cogeneración pasa de un sistema simple con turbina de gas, a ser un ciclo combinado con cogeneración, sistema de una muy elevada eficiencia exergética, aunque también de elevado costo.

En la Tabla 3 se comparan las características de un sistema monopropósito formado por un ciclo simple y una caldera convencional con los de sistemas integrados, ya sea ciclo combinado o cogeneración. Es destacable el hecho de que el ciclo combinado alcanza eficiencias eléctricas netas del orden del 60%, 56.8% en el caso presentado, superando con amplitud los valores máximos logrados en ciclos convencionales.

Tabla 2: Comparación entre un ciclo combinado y de cogeneración, partiendo de una misma TG y HRSG

Sistema Ciclo	monopropósito		integrado	
	simple	caldera	combinado	cogeneración
	MW	MW	MW	MW
Entrada de combustible	100	60	100	100
Electricidad generada	40	0	56.8	40
Calor útil generado	0	48	0	48
Pérdidas por chimenea	60	0	12	12
Pérdidas condensador	0	0	31.2	0
Total de pérdidas	60	12	43.2	12
Entalpía entrada		160	100	100
Ahorro de recursos		0	16.8 %	60 %
Exergía		55 %	56.8%	88%
Anergía		45%	43.2 %	12 %

En el caso del ciclo simple de cogeneración, se obtienen 40 MW de electricidad y 48 MW de calor utilizable para un ingreso de energía como poder calorífico inferior (PCI) de 100 MW, lo cual conduce a una eficiencia cuantitativa del 82%. Si los vectores obtenidos se produjeran con sistemas no integrados convencionales del 40% para la electricidad y 80% para el vector calórico, las cantidades de recursos primarios necesarios serían de 100 MW para la electricidad, y 60 MW para el calor, o sea 160 MW.

El ahorro de recursos es de 60 MW, o en términos relativos (porcentuales), del 34.43%, lo que da una justificación a los conceptos dados por Shonder y Mc Lain (1995), mencionados más arriba.

CONCLUSIONES

Las consideraciones sobre el Uso Racional de la Energía a través del Primer Principio de la Termodinámica conducen solamente a conclusiones incompletas e inadecuadas.

El concepto de “consumo” de energía es impropio, dado que se trata de una magnitud conservatriz expresada por el Primer principio de la Termodinámica. La asociación con algo que “desaparece” sugiere una mayor adecuación a la exergía, o sea a las formas de desequilibrio del sistema respecto a los alrededores.

La inclusión del Segundo Principio permite la valoración cualitativa de las magnitudes de la energía en un sistema térmico, respecto a los alrededores con el que interactúa.

La integración de procesos en amplios intervalos en que se desperdician los desequilibrios por irreversibilidades evitables, ha producido como resultados prácticos un incremento notable de la eficiencia energética, en términos de ahorro de recursos primarios.

REFERENCIAS

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M. (1996), *Thermal Design and Optimization*, Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc. N.Y., USA.
- Flanagan, R. (1999), *Reporte del 6th Annual Conference "Cogeneration in Europe"*, Praga, Checoslovaquia, World Cogeneration, Vol. 11 Nr 3.
- Retzlaff, K.M. and Ruegger, W.A. (1996), *Steam Turbines for Ultra-super-critical Power Plants*, G.E. Power Systems, Schenectady, N.J. Publicación GER 3945.
- Shonder, J.A. and Mc.Lain, H. A. (1995), *Energy savings Potential for Cogeneration in the United States*, Oak Ridge National Laboratory, USA.

ABSTRACT: In this work the authors try to present in a simple form the concepts that derive of the thermal systems analysis according to the Second Principle of Thermodynamics, as a contribution to a larger participation of engineers and technicians in aspects of the rational use of the energy, RUE.

A thermal system must be analyzed not only according to the Energy Conservation Principle, but also according to the Second Principle, taking into account exergetic considerations. In our Country, the understanding and appropriate application of the exergetic concept is very far from reaching a reasonable level of real application. The inclusion of the Second Principle allows the qualitative valuation of energy magnitudes in a thermal system, regarding the surroundings with the one the system interacts and it allows substantial primary resources. savings.

The current panorama of use of fossil fuels, their foregone readiness in a near future, and level of deterioration of the environment reveals an incompatible tendency with sustainability concepts that the rationality shows as necessary.