

## INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LOS CICLOS DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA A VAPOR

A. Fushimi<sup>(1)</sup>, L. Zárate<sup>(2)</sup>, G. Diaz de Quintana<sup>(3)</sup>, M. Moreda<sup>(3)</sup>, J. P. Fernandez<sup>(2)</sup>, M. Hall<sup>(3)</sup>  
 Tyccsalp. Calle 45 N° 531 T III 5° D, La Plata, PBA, Tel/Fax: 0221 489 3285. E-mail: tyccsalp@gmail.com  
 Tyccsa, Depto. Ingeniería. M.Arbel 3700, 9 de Abril, Pdo E.Echeverría, PBA. Argentina.

**RESUMEN:** La demanda de energía crece en base a los deseos de mayor producción de bienes y servicios, o de mayor confort de los habitantes. La solución que se ha adoptado en nuestro País son la reducción de la demanda (PURE/ PUREE), o el aumento de la oferta (Energía Plus), sin la debida consideración de la eficiencia energética, o sea la obtención de los efectos energéticos con el mínimo consumo de recursos y afectación del medio ambiente. Acorde a los paradigmas actuales, Europa y otros Países Desarrollados han logrado reducir sus consumos a través de los “negajoules”, o ahorros de recursos por eficiencia energética en una magnitud tal que hoy es el principal contribuyente de sus matrices energéticas. No ha sucedido lo mismo aquí, sino que la intensidad energética ha aumentado en los últimos 50 años evidenciando el enorme potencial que existe por el concepto “ahorro de recursos por eficiencia”, y la necesidad de su práctica. Los ciclos de vapor convencionales a condensación son ineficientes, pero pueden ser eficientizados mediante el concepto de integración de procesos “por encima” (ciclo combinado), o “por debajo” (cogeneración), del ciclo, los que se tratan específicamente en otros trabajos de los autores.

Palabras clave: Ciclos de vapor, Rankine, Cogeneración, Conservación de recursos, Eficiencia energética.

### INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial y los deseos de un mejor nivel de vida de sus individuos presionan sobre las demandas de energía que se requieren para ello haciendo cada vez mas difícil y nocivo poder continuar recurriendo a recursos tradicionales no renovables con el consiguiente impacto ambiental negativo y sus consecuencias.

En este contexto se hace imprescindible maximizar la eficiencia energética en todos los niveles, y el desarrollo de las formas renovables de suministro que nos permitan disponer de los efectos energéticos necesarios en forma sustentable, aun a largo plazo. Esta transformación es indispensable y requiere un esfuerzo sustancial que debería ser comenzado lo antes posible, antes que se comiencen a manifestar las consecuencias de las inacciones en términos de fallas de oferta de suministro por ser esta insuficiente con relación a la creciente demanda. La falla de nuestra Sociedad en cuanto a las preocupaciones y acciones que nos permitan disponer de los efectos energéticos necesarios en forma sustentable se pone de manifiesto en forma dramática al comparar nuestras variaciones de las intensidades energéticas que pueden ser calculadas a partir de los datos de los balances energéticos anuales publicados por la Secretaría de Energía de la Nación, con los publicados por la Unión Europea en el Action Plan on Energy Efficiency de 2006 y otros documentos.

En la Fig. 1 se muestra el crecimiento de la demanda de energía de nuestro País en términos de recursos energéticos utilizados y consumo de energía final, en miles de toneladas equivalentes de petróleo (kTEPs), en el período 1960 – 2005, según los datos de los balances energéticos publicados anualmente. Se indican las correspondientes líneas de tendencia y las ecuaciones de regresión lineal.

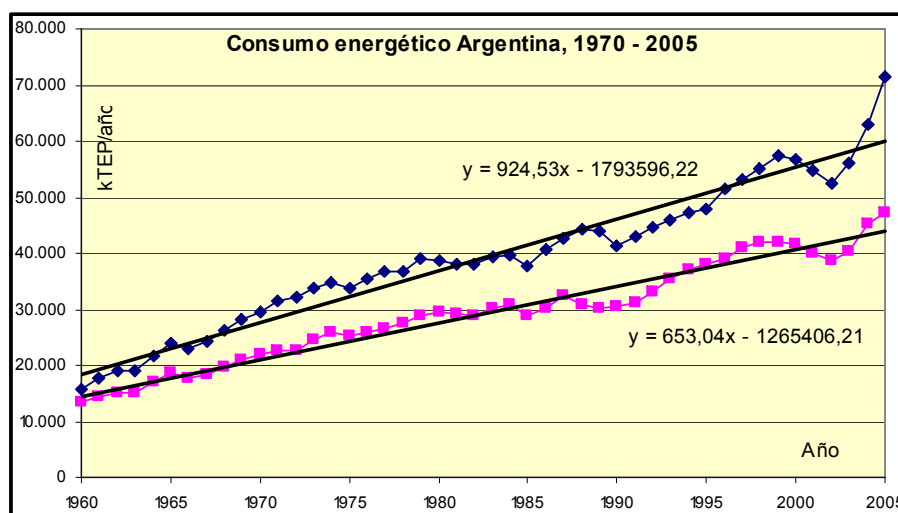


Figura 1: Consumo de recursos (curva superior) y final de energía (curva inferior) en el período de 1960 a 2005

<sup>1</sup> Profesor de la Maestría en Gestión de la Energía (UNLA-CNEA)

<sup>2</sup> Profesionales Dto. Ingeniería TyCsa.

<sup>3</sup> Profesionales Tyccsalp

Si se toman los valores extremos de las líneas de tendencia del período 1960 a 2005, se llega a que el consumo final de energía al final del período fue 3,02 veces la inicial, y que el coeficiente para la oferta interna de recursos fue de 3,25. Si en lugar de los valores de tendencia en el período se consideran los valores puntuales de los años 1960 y 2005, los coeficientes resultan de 3,53 y 4,52 respectivamente. El salto registrado puede verse claramente en la Fig. 1 en el que se aprecia en los últimos años el incremento del consumo final y en forma más abrupta de la oferta interna de recursos lo que indicaría una menor eficiencia de los procesos de conversión.

Afortunadamente, estos efectos contrarios al cuidado de la eficiencia energética en términos de recursos primarios fósiles que aportan el 90% de la matriz energética actual, se han producido por el gran crecimiento de la actividad económica y general, aunque esto no debería ser un justificativo para ignorar la necesidad de sustentabilidad que nos asegure un futuro deseable.

Lamentablemente no se cuenta con información precisa de las existencias de recursos fósiles ni el grado de inconveniencia de su utilización que nos permita determinar con exactitud cual será el aporte de estos recursos para cubrir nuestras crecientes necesidades de energía en el futuro, pero conceptualmente es posible asegurar que el inventario se reducirá por el consumo, y con ello la calidad de los recursos disponibles, los costos serán crecientes, y de no mediar una adecuada acción a tiempo, se desembocará en una crisis traumática que es necesario evitar.

Tratar de reducir la demanda de los efectos que produce la utilización de energía (aumentando la productividad, o mejorando la calidad de vida de las personas) es una actitud retrógrada que se debería limitar a evitar los despilfarros. Pero responder a esta situación mediante un aumento de la oferta basada en recursos fósiles es contrario a la sustentabilidad. Resulta evidente pues que la mejor forma de tratar esta situación es mejorando la eficiencia del logro de los efectos energéticos deseados con el mínimo consumo de recursos y afectación del medio ambiente, o sea el Uso Racional de la Energía, incluyendo en este concepto la búsqueda de los recursos y procesos que permitan la obtención de los efectos energéticos en la práctica real en forma sustentable, o al menos más sustentable que con las prácticas corrientes.

## EL USO RACIONAL DE LA ENERGÍA EN NUESTRO PAÍS Y EN EUROPA

Pensar en recurrir al Uso Racional de la Energía o a la Eficiencia Energética carecería de sentido si no existiera un margen en el que éste pueda ser practicado por los actores de la Sociedad en general, y del sector energético en particular. Si bien no es posible cuantificar esta magnitud en términos absolutos y en forma rigurosa, es ilustrativo comparar lo que ha ocurrido en nuestro País con lo que otros Países han logrado.

A los efectos de utilizar la información a la que hemos podido acceder, hemos definido la variación del consumo de energía en un período, como la relación entre sus valores al final y al inicio del periodo de años considerado, ya sea en términos de valores anuales publicados, o de tendencia si el período es de varios años. De la misma forma hemos definido la variación del producto bruto interno (PBI)

Período 1960 - 1969		(PBI en MM \$MN base 1960; Energía en kTEP)		
		Oferta interna	Consumo final	PBI
Año	1960	16,184	13.477	983.855
Año	1969	27.566	20.557	1.413.313
Δ		1,70	1,53	1,44
<b>Δ / APBI</b>		<b>1,19</b>	<b>1,06</b>	
Período 1970 - 1979		(PBI en Australes, base 1970; Energía en kTEP)		
		Oferta interna	Consumo final	PBI
Año	1970	30.244	21.904	8.893
Año	1979	38.477	28.327	11.014
Δ		1,27	1,29	1,24
<b>Δ / APBI</b>		<b>1,04</b>	<b>1,03</b>	
Período 1980 - 1992		(PBI en k\$, base 1980; Energía en kTEP)		
		Oferta interna	Consumo final	PBI
Año	1980	37.640	28.991	9.719.791
Año	1992	44.227	31.829	10.091.547
Δ		1,18	1,10	1,04
<b>Δ / APBI</b>		<b>1,06</b>	<b>1,13</b>	
Período 1993 - 2005		(PBI en MM \$, base 1993; Energía en kTEP)		
		Oferta interna	Consumo final	PBI
Año	1993	45.851	36.637	252.378
Año	2005	63.861	44.514	272.856
Δ		1,39	1,21	1,08
<b>Δ / APBI</b>		<b>1,29</b>	<b>1,12</b>	

Tabla 1: Valores de la relación entre la variación de la oferta interna de recursos y consumo final de energía, y la variación del PBI en valores constantes, de los períodos 1960 a 2005

El cociente entre el consumo energético y el PBI en un mismo lapso de tiempo se denomina "Intensidad energética de la economía" en el lapso considerado. La relación entre las variaciones del consumo energético y del PBI sería una forma de expresar la elasticidad de la Intensidad Energética, y su valor estaría indicando si el consumo energético ha variado más o

menos que lo que ha variado el PBI en el período. Un valor igual a 1 indicaría que ambas relaciones han variado proporcionalmente, no se ha mejorado ni empeorado la eficiencia energética. Esta situación es conocida como “business as usual”. Si el valor fuera menor que 1, el aumento del consumo energético es menor que el aumento del PBI con lo que se habría mejorado la eficiencia energética en el período. Y viceversa, pudiendo aplicarse al consumo final de energía, o al consumo de recursos. Se tratan de magnitudes indicativas, relativas y no rigurosas.

Los datos procesados para nuestro País fueron obtenidos de los balances energéticos anuales que publica la Secretaría de Energía, en los que los valores de PBI se dan en moneda constante del año inicial de períodos de varios años, por lo que se han considerado los valores inicial y final de esos períodos calculados por las ecuaciones de regresión lineal de las tendencias de cada período. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1

Como se observa, los valores tanto los referidos a oferta interna de recursos como a consumo final de energía son mayores que 1, lo que indica que la tendencia del aumento de consumo ha sido mayor a la tendencia del aumento del PBI en todo el período de 1960 a 2005.

La Fig. 2 es una reproducción del gráfico de la publicación Action Plan for Energy Efficiency 2005 – 2020, en el que se informan los consumos de recursos energéticos por tipos, de la Unión Europea en el período 1971 a 2005. Obsérvese que el estrato superior de color verde, no es un consumo de recursos sino el ahorro que han logrado por acciones de eficiencia energética en el período. Lo denominan “negajoules”, o sea consumos negativos, y lo presentan como un recurso energético que en el año 2005 resulta ser el de mayor gravitación en el consumo total. La línea superior de este estrato indica pues en ordenadas, el consumo hipotético al que habrían incurrido si hubieran mantenido una paridad entre consumo de energía y PBI, o sea mantenido constante la intensidad energética del año inicial del período (business as usual). El consumo real está representado por la línea inferior del estrato de negajoules.

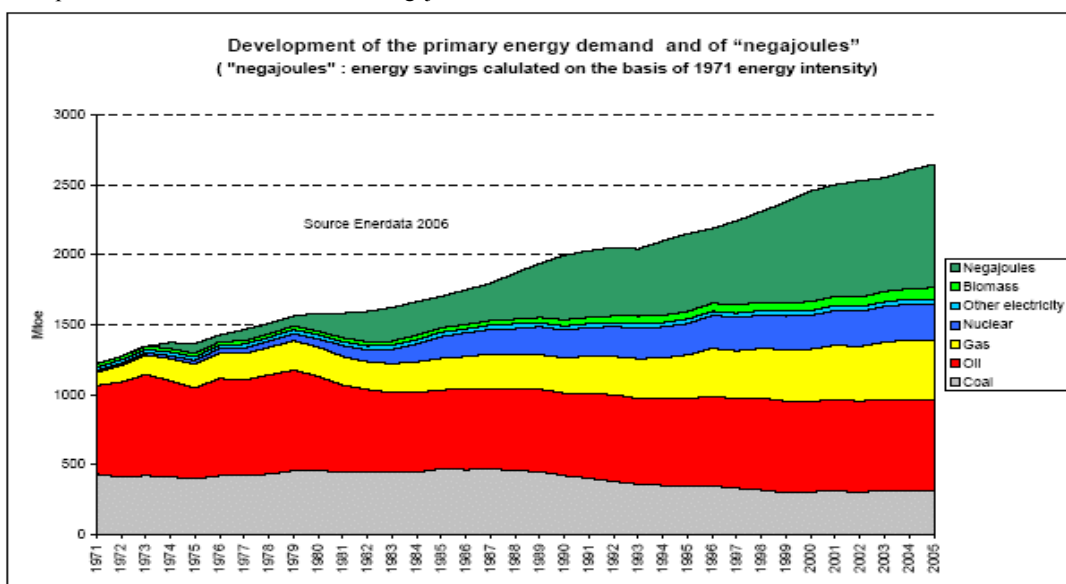


Figura 2: consumo de recursos energéticos de la Unión Europea, acorde a la publicación del Action Plan for Energy Efficiency de 2006.

Denominando:

CRi = consumo de recursos al comienzo del período = 1250 MM.TEPs

CRf = consumo real de recursos al final del período = 1750 MM.TEPs

CR3 = consumo de recursos al final del período a intensidad energética constante = 2700 MM.TEPs

y los mismos subíndices para el PBI,

Mtoe = MMTEPs.

El crecimiento del PBI se puede determinar observando que para la línea superior del estrato de negajoules en el que la intensidad energética se mantiene constante es:

(1)

Y utilizando la metodología de procesamiento de datos adoptado para el caso de nuestro País, resultará para

O sea al final del período en PBI fue 2.16 veces el PBI del período inicial.

La relación de consumos de recursos energéticos se determina como la relación de sus valores inicial y final del período,

o sea:

(3)

y la relación entre ellas es:

(4)

El valor de este indicador muestra claramente no solo que los Países de la Unión Europea han logrado en promedio eficientizar su consumo de recursos energéticos significativamente en el período desde la década de las crisis petroleras mundiales hasta el año 2005, sino también que en nuestro País no ha existido tal logro. Por el contrario, ha habido una tendencia persistente hacia el aumento de consumo de recursos por unidad de PBI. Ésto, según se observa en la Fig. 1 se ha agudizado en los últimos años, lo que es atribuible parcialmente a la pérdida de eficiencia de la generación termoelectrónica por el necesario despacho de unidades mucho menos eficientes que los ciclos combinados con que nuestro sistema cuenta.

Pero la preocupación que ocasiona tomar conciencia de nuestra indolencia en materia de eficiencia energética comparada a los logros europeos, se ve reforzada por la enunciación del Action Plan 2005 – 2020 de la Unión Europea del objetivo de reducir su consumo de recursos energéticos de tal forma que en el año 2020 se haya logrado una reducción anual del 20% respecto a 2005, sin que exista algún programa similar en nuestro medio. Al respecto cabe aclarar que tanto el programa PURE/PUREE como el Energía Plus son medidas que no objetamos por considerarlas positivas, pero que apuntan a la reducción de la demanda o al aumento de la oferta en el mercado. Consideramos aconsejable incluir más específicamente las acciones hacia la eficiencia energética como condición necesaria para la sustentabilidad tanto a corto como a largo plazo.

Una mejora de la eficiencia energética reducirá el consumo de recursos primarios para los mismos efectos energéticos que goce nuestra Sociedad, aliviando la presión sobre la reducción de la demanda o el aumento de la oferta. En esta última acción se transita hacia la insustentabilidad si se la practica con sistemas ineficientes. Se debe tener claro que los efectos energéticos, en lo posible, no deben constituir la variable de ajuste. Ellos determinan los recursos que se requieren en función de la eficiencia de los procesos energéticos intermedios y finales. Es evidente pues que es la mencionada eficiencia la que constituye el objetivo racional de optimización, y que no se debe perder de vista, aún en las coyunturas.

## POSIBILIDADES DE URE

Los valores de las intensidades energéticas de la economía dependen de la eficiencia energética, pero también de otros factores. Los factores generales que constituyen la fuerza impulsora (el “driving force”) del consumo energético serían razonablemente constantes: el deseo de una mayor actividad económica que permita un mayor nivel de confort de la población, mientras que los específicos como ser el clima, la abundancia de recursos, la cultura e idiosincrasia de la población, el tipo de actividad económica predominante en el País, etc, son propios de cada caso y pueden variar notablemente de un caso a otro.

La elasticidad de la intensidad económica, es un indicador más adecuado para evaluar la evolución de la eficiencia energética por cuanto se trata de una comparación referida a un país definido y en períodos de tiempo distintos, en los que se espera que las condiciones no hayan variado sustancialmente.

En la toma de la decisión de emprender una acción que propenda al URE, existen factores del tipo cultural, económico, legal y regulatorio, institucional, comercial, sectorial, financiero, etc, y de la posibilidad de que existan acciones a ser emprendidas. Estas posibilidades existen en nuestro País con mucho más abundancia que en Europa que ya ha comenzado desde mas de 50 años atrás, y obtenido los resultados ya comentados.

La Tabla 2, extraída del Action Plan, es el resumen del potencial total de ahorro energético en los sectores de utilización final en Europa, y fue tomado como base para establecer el objetivo general del 20% de ahorro de recursos energéticos respecto al consumo del año 2005, con plazo al año 2020.

**Figure2: Estimates for full energy saving potential in the end-use sectors (Source: European Commission EU-25 baseline Scenario and Wuppertal Institute 2005)**

Sector	Energy consumption (Mtoe) 2005	Energy Consumption (Mtoe) 2020 (Business as usual)	Energy Saving Potential 2020 (Mtoe)	Full Energy Saving Potential 2020 (%)
Households (residential)	280	338	91	27%
Commercial buildings (Tertiary)	157	211	63	30%
Transport	332	405	105	26%
Manufacturing Industry	297	382	95	25%

Tabla 2: Estimaciones del potencial total de ahorro energético en los sectores de utilización final en Europa.

En la Tabla 3 se presentan los valores estimados de posibilidades de ahorro de recursos energéticos en la Unión Europea, dados como ejemplos en el Green Paper on Energy Efficiency. Como se aprecia, el rubro Producción de Electricidad y Cogeneración y el Transporte son los que ofrecen el mayor potencial de ahorro.

Concepto	Ahorro, en millones de TEP
Producción de electricidad y cogeneración	70
Ampliación de la directiva de los edificios	30
Diseño ecológico	30
Transporte	45

Tabla 3: Estimaciones del potencial total de ahorro energético en los sectores de utilización final en Europa.

En la Fig. 3 se reproducen las variaciones de la demanda energética, PBI, e intensidad energética para la Unión Europea (EU 25, históricas, y proyectadas hasta el año 2030 en el que se observa que la demanda energética aumenta mucho menos que el PBI, lo que produce una reducción notable de la intensidad energética, con una tasa promedio anual del 1,6%.

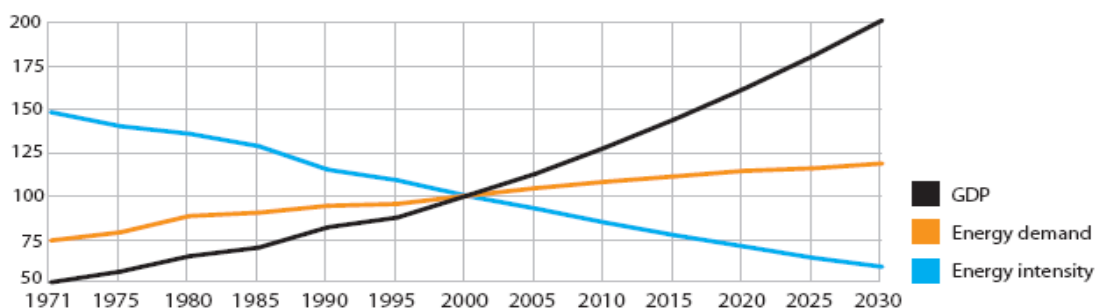


Figura 3: Desarrollo a largo plazo del consumo energético, PBI e intensidad energética para EU 25 (año 2000 = 100)

En la Fig. 4 se muestra una proyección de las demandas de recursos energéticos de Alemania, en el que se observa una reducción de la demanda de energía primaria, muy leve en lo que ya ha ocurrido en el período 2000 – 2005, pero que se reduce a cerca de la mitad para el año 2050 con relación al año 2000. Si bien resultados como los que se proyectan en la Fig. 4 pueden ser factibles en función de las condiciones de borde que son específicas de cada País, este ejemplo debería servir al menos para tratar de intentar emularlos al máximo nivel posible. Y en la situación actual, no se requiere de esfuerzos notables puesto que basta con observar nuestro entorno para comprender que en general estamos rodeados de ineficiencias energéticas de todo tipo, a los que no prestamos atención, y consecuentemente no intentamos remediar.

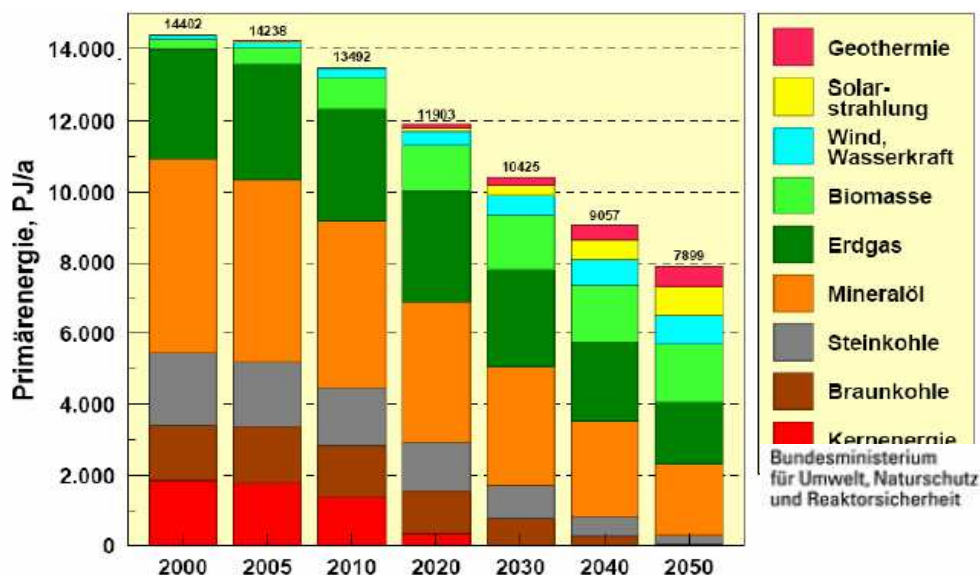


Figura 4: Proyección de las demandas de recursos energéticos de Alemania desde el año 2000 al 2050

Las prácticas corrientes en nuestro País dejan mucho que desear a la luz de las posibilidades que cualquier ciudadano común conoce como aquellas conocidas como “housekeeping”, y el diseño de sistemas térmicos eficientes por reducción de las irreversibilidades evitables que el actual nivel de conocimientos permite. Ambas ofrecen un potencial significativo de ahorro de recursos, las primeras por tratarse de la suma de una cantidad grande de usuarios que pueden lograr ahorros relativamente pequeños, y las segundas por afectar a instalaciones que procesan grandes cantidades de energía, como ser las industrias o los procesos de conversión energética.

Entre los procesos de conversión, se encuentran los ciclos convencionales a vapor, cuya eficiencia evolucionó desde los primeros ciclos de Rankine con vapor de baja presión y muy baja eficiencia. Con el aumento de la presión y temperatura del vapor hasta valores supercríticos y con la introducción de conceptos tales como el precalentamiento regenerativo, el recalentamiento, el precalentador de aire en las calderas, etc. la eficiencia de estos ciclos fue mejorando aunque manteniendo valores bajos en comparación a lo que hoy se obtiene mediante los ciclos integrados (la cogeneración, los ciclos combinados, ambos de alta eficiencia, y la cogeneración con ciclos combinados) que pueden ser implementados con máquinas térmicas de diferentes tipos para combinarse en esquemas conceptuales adecuados, con creatividad autóctona, por nuestros propios investigadores, profesionales y técnicos.

## CONCLUSIONES

La eficientización de los ciclos convencionales de generación termoeléctrica a vapor tiene un impacto muy significativo en el consumo de recursos energéticos. El reemplazo de menos de 2000 MW de generación por ciclos de vapor con una eficiencia neta de generación del 35% por ciclos combinados del 55% de eficiencia neta, produce una reducción del consumo de gas natural de 5 millones de m<sup>3</sup> de gas natural por día, cantidad similar a lo que se importa actualmente de Bolivia a un costo muy superior al precio que perciben los productores locales.

Los autores del presente trabajo se proponen confeccionar otros dos trabajos con el objetivo de dar un análisis más detallado de las posibilidades de mejorar la eficiencia energética de ciclos de generación de las tradicionales centrales a vapor, a través de la integración de procesos de generación por repotenciación a ciclo combinado, o de integración de un proceso de generación con uno calórico por cogeneración.

## REFERENCIAS

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Future Energy Consumption, 2nd Expert Meeting on National Biomass Action Plans, German National Biomass Plan 13 March 2007
- Commission of the European Communities: Communication from the Commission, COM (2006) 545 final. Action Plan for Energy Efficiency: Realizing the Potential. Brussels, 19.10.2006. pp 5.
- Commission of the European Communities: Communication from the Commission, COM (2006) 545 final. Action Plan for Energy Efficiency: Realizing the Potential. Brussels, 19.10.2006. pp 6.
- Commission of the European Communities, Directorate General for Energy and Transport: Doing more with less. Green Paper on Energy Efficiency. Luxemburgo, Bélgica, 2005. ISBN 92-79-00014-4.
- Fushimi, A.; Zárate, L.; Díaz de Quintana, G.; Moreda, M.; Fernández, J.P.; Hall, M. Análisis de las posibilidades de mejoras de la eficiencia energética de los ciclos de vapor por repotenciación a ciclo combinado, a ser presentado en ASADES 2007.
- Fushimi, A.; Zárate, L.; Díaz de Quintana, G.; Moreda, M.; Fernández, J.P.; Hall, M. Análisis de la mejora de la eficiencia energética de los ciclos de vapor por utilización del calor de baja exergía, a ser presentado en ASADES 2007.
- Mecon, Secretaría de Energía: Balances energéticos anuales, 1960 a 2005.

## **ABSTRACT**

The energy demand grows with increasing the production of goods and services or to the need for greater comfort of the habitants. Given this, the solutions that have been adopted in our country have been reducing demand (PURE / PUREE Programs), or increasing the supply (Energia Plus Program), without considering the possibility to optimize its use efficiently, ie , obtaining the same effects energy consumption with a minimum of resources and reducing the adverse effects on the environment. According to the current paradigms, Europe and other developed countries have managed to reduce their consumption through the "negajoules", or savings of resources for energy efficiency such that today is the largest contributor to its energy needs. The same thing has not happened here, but the energy intensity has increased over the last 50 years. For this reason it is necessary to highlight the enormous potential that exists for the concept of "saving resource by increasing efficiency," and the benefits it would bring its implementation. Conventional steam condensation cycles are inefficient, but can be optimized through the concept of process integration "above" (combined cycle), or "below" (CHP) of the cycle. Other works of the authors analyze these aspects.

**Keywords:** steam cycles, Rankine, cogeneration, conservation of resources, energy efficiency.