



RENDIMIENTO EXERGÉTICO EN SISTEMAS TÉRMICOS

M. I. Sosa

GECCU, Departamento de Mecánica – Facultad de Ingeniería--Universidad Nacional de La Plata

Calle 48 y 116 1900, La Plata, Pcia. Buenos Aires, Argentina
misosa@ing.unlp.edu.ar.

RESUMEN

Generalmente todo análisis de un sistema térmico se basa fundamentalmente en el rendimiento térmico, analizando potencias producidas y energías consumidas, desechando todo aspecto de uso racional de la energía. Su optimización se realiza disminuyendo las pérdidas de calor según el Primer Principio, desdeñando el concepto de destrucción exergética. Todo sistema debería evaluarse también teniendo en cuenta el medioambiente, sus emisiones o sea valorizando la repercusión en el entorno. Se resumen diferentes rendimientos de forma de evaluar el funcionamiento de un sistema térmico y se analizan las ventajas y desventajas de los mismos. La valoración del medio ambiente y de la forma de obtener la energía primaria debe ser tomada en cuenta, de forma que contribuya como una herramienta numérica para tomar decisiones de elección del sistema térmico a analizar.

En este trabajo se resumen diferentes rendimientos de forma de evaluar el funcionamiento de un sistema térmico y se analizan las ventajas y desventajas de los mismos. Se ha realizado el análisis exergético de un ciclo combinado, tendiente a calcular las ineficiencias termodinámicas (destrucción de exergía) de las componentes del ciclo. Aproximadamente el 76% de la destrucción total de exergía es causada por la cámara de combustión. Es la componente principal de la ineficiencia general de la planta. Por otro lado la caldera de recuperación HRSG presenta una destrucción de exergía del 18 % de la exergía total que entra al ciclo. En el compresor es del 4% mientras que en los demás elementos que conforman la planta fue menor al 2%. Una forma de mejorar el sistema sería aprovechar la entalpía de los humos a su salida del HRSG, previa a su salida por chimenea. De esta forma se reduciría la destrucción exergética.

Palabras Claves: *exergía, rendimiento térmico, ciclo combinado.*

1. INTRODUCCIÓN

La incorporación del Uso Racional de los Recursos Energéticos URE, o sea la producción del efecto deseado con el mínimo consumo de recursos y afectación del medio ambiente, debería contemplarse en la valorización de todo sistema energético. El agotamiento de los recursos fósiles y la contaminación que sus procesos de conversión provocan en el medio ambiente es hoy en día un tema crucial. Hasta ahora la elección de un sistema térmico de potencia a instalar se basa fundamentalmente en la selección de un sistema de vapor o turbogruppo de gas o combinado, dependiendo de las necesidades. La inversión se define por el costo, tamaño o potencia y su rendimiento térmico. La optimización del sistema térmico se analiza disminuyendo las pérdidas de calor según el Primer Principio, desdeñando el concepto de destrucción exérgica, que mide la energía disponible no convertible en trabajo útil, [1-3],

Se considera que todo sistema debería evaluarse asimismo a través de un coeficiente medioambiental que valore la repercusión en el entorno. Un análisis de impacto ambiental determina la factibilidad ambiental de instalación, indicando las ventajas y desventajas, pero no se relaciona directamente con el rendimiento térmico.

2. EFICIENCIA TÉRMICA

Los dos principios de la Termodinámica indican formas diferentes de encarar el rendimiento de todo sistema térmico. Por un lado, el Primer Principio o Principio de Conservación de la Energía se basa en la cantidad de energía disponible y la eficiencia energética, o sea del rendimiento térmico o del coeficiente de operación, tomando en cuenta flujos energéticos en la forma de flujo calórico o potencia.

Los parámetros a considerar son conocidos. Para todo sistema térmico la eficiencia térmica se define como el cociente entre la salida deseada y la entrada requerida, según la Ecuación (1)

$$\text{eficiencia térmica} = \text{salida deseada} / \text{entrada requerida} \quad (1)$$

La misma toma diferentes expresiones dependiendo de que se trate de máquinas térmicas o frigoríficas. Si se trata de un sistema de potencia, definimos el rendimiento térmico, η_T , como el cociente entre la potencia neta del sistema y el flujo calórico entrante, Ecuación (2),

$$\eta_T = \text{potencia neta} / \text{flujo calórico entrante} \quad (2)$$

Para un sistema de vapor la expresión toma la forma siguiente donde se indica la potencia del ciclo de vapor CV y el flujo calórico entrante entregado por la caldera, Ecuación (3),

$$\eta_T(\text{CV}) = \text{potencia CV} / \text{flujo calórico (caldera)} \quad (3)$$

Análogamente para un ciclo de gas tipo Brayton donde la potencia neta del ciclo de gas CG, tomando en cuenta la de la TG y la del compresor, y el flujo calórico entrante el suministrado por la cámara de combustión, el rendimiento toma la forma, Ecuación (4),

$$\eta_T(\text{CG}) = \text{potencia CG} / \text{flujo calórico (cámara)} \quad (4)$$

Para un sistema de refrigeración el coeficiente de operación de refrigeración, COP_{ref} , se define como el cociente entre la salida deseada, o sea el flujo calórico a remover del espacio a refrigerar y la potencia demandada por el compresor. En el caso de una bomba de calor el coeficiente de operación de la bomba de calor, COP_{BC} toma la forma siguiente donde el flujo calórico es el entregado al recinto a calefaccionar y la potencia entrante la del compresor.

La eficiencia del sistema se basa en cantidades de energías entrantes y salientes. Un sistema será tanto más eficiente cuanto mayor sea el beneficio o salida requerida en función del gasto o entrada requerida, [3-4].

En sistemas de potencia la entrada requerida es el calor o flujo calórico que debe suministrarse al sistema, en un sistema de vapor es el calor suministrado por la caldera y en uno de gas el entregado por la cámara de combustión. Existen métodos para reducir este consumo como por ejemplo la regeneración, en la cual se eleva la temperatura del fluido entrante en la caldera en un sistema de vapor, mezclándolo con una fracción de fluido de alto contenido entálpico extraído de la turbina de vapor TV. O en un sistema de gas precalentando el aire a la salida del compresor previa entrada a la cámara de combustión utilizando el contenido entálpico de los humos que salen de la turbina de gas. Por otro lado, dado que en sistemas de refrigeración la entrada requerida es la potencia del compresor, la reducción de esta entrada se mejora aumentando el número de etapas del mismo.

El beneficio en sistema de potencia es la potencia producida. Por diferentes metodologías puede aumentarse el mismo ya sea por sobrecalentamiento en sistemas de vapor, o recalentamiento tanto en sistemas de vapor o gas. Pero como se observa, este Primer Principio analiza cantidades de energía disponible o utilizada, no tomando en cuenta su calidad o procedencia.

El Uso Racional de la Energía URE según este Primer Principio califica la cantidad de energía. Un sistema térmico es mejor que otro, si su eficiencia térmica es superior. Con el afán de aumentar el rendimiento de los ciclos de vapor a mediados del siglo pasado los fabricantes atacaron la problemática de la presión de caldera como forma de aumentar el rendimiento.

De esta forma surgieron sistemas más eficientes como ser los ciclos de vapor supercríticos con la correspondiente desventaja operativa de presiones elevadas superiores a los 22 MPa del punto crítico del agua. Así llegaron a fabricarse calderas que operaban a unos 30 MPa.

El advenimiento de las turbinas de gas con rendimientos y potencias superiores a las de TV's hizo perder la atención en sistemas de vapor que operan a presiones elevadas. La superación tecnológica ha llevado a los fabricantes a diseñar turbinas de gas cada vez más potentes, que operan a temperaturas cada vez más elevadas, requiriendo flujos calóricos superiores que implican un mayor consumo de combustible en calderas o cámaras de combustión y mayores costos operativos por la complejidad de la operación. En lo que respecta a las turbinas de gas su tecnología evolucionó notablemente en las últimas décadas. En un principio la temperatura máxima solo alcanzaba los 800° C con temperatura de escape de humos de 400° C, evolucionado a turbinas refrigeradas que alcanzan los 1400° C con humos que salen a 600° C. La utilización de un HRSG, caldera de recuperación del contenido entálpico de los humos salientes de un ciclo de gas permite la integración con uno de vapor donde se elimina la caldera convencional en el ciclo de vapor, ya que se recupera el contenido entálpico y se genera vapor para alimentar a la TV. La integración de ambos sistemas en el llamado ciclo combinado gas-vapor ha contribuido a aumentar notablemente el rendimiento térmico de los sistemas de potencia, Ecuación (5),

$$\eta_T(CC) = \text{potencia (CG+ CV)} / \text{flujo calórico (cámara)} \quad (5)$$

donde la potencia neta es la suma de la potencia neta del ciclo de vapor y el de gas, mientras que el flujo calórico entrante es debido solo al flujo que entra en el ciclo de gas, o sea la cámara de combustión.

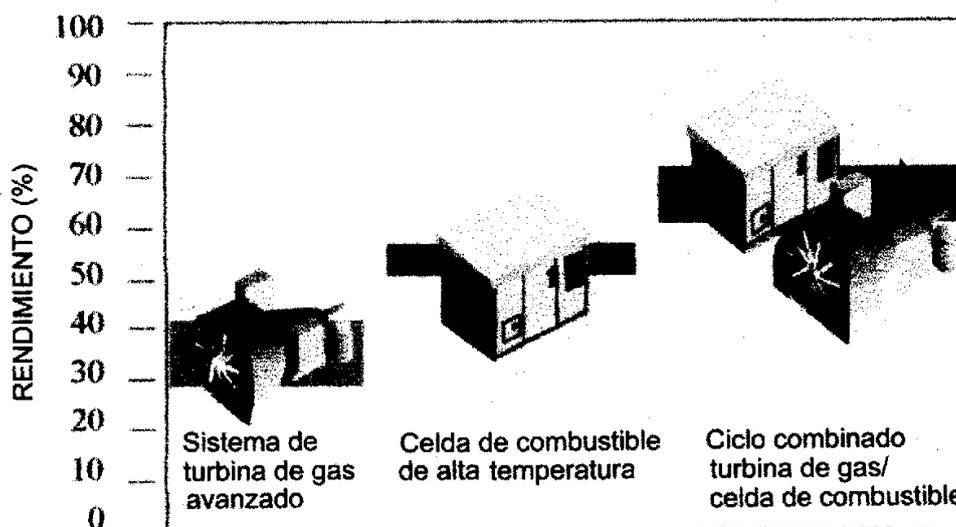


Figura 1: Rendimientos térmicos de sistemas con turbina de gas, celda de combustible y ciclo combinado con celdas de combustible.

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%, [2-5]. Una optimización del sistema según el Primer Principio analiza solamente pérdidas o consumos superfluos que pudieran minimizarse en función de la salida requerida. Pueden mencionarse aislaciones en mal estado, recuperación de condensado, quemadores sucios, paredes con reducción de la transmisión térmica por existencia de incrustaciones, válvulas con cierres en mal estado, instrumentos de medición y/o control no adecuados, sobredimensionamiento de equipamiento, etc.

3. SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Por otro lado, el Segundo Principio de la Termodinámica apunta a priorizar la calidad de la energía disponible, apunta a evitar pérdidas que se producen espontáneamente en la mayoría de los procesos reales, irreversibles, y detecta las pérdidas de calidad de la energía producidas espontáneamente en los mismos.

Un estudio exergético de un dado sistema arroja valores de exergía disponible, exergía producida o trabajo útil y de exergía destruida en el proceso. 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. Este concepto si bien se conoce hace más de 50 años, es de difícil comprensión dado que involucra cálculos no tomados en cuenta generalmente en el ámbito industrial. No obstante, resulta muy útil dentro del ámbito de la Termoeconomía dado que permite el análisis económico directo de las pérdidas energéticas producidas en el sistema, [4].

El concepto de exergía está asociado al máximo trabajo teórico que puede obtenerse. Dos sistemas en distintos estados termodinámicos o sea en desequilibrio termodinámico, tienen oportunidad de generar trabajo mecánico, si se colocan en contacto y se permite que alcancen el equilibrio.

Cuando uno de ellos es un sistema ideal llamado medio o ambiente, y el otro, el sistema, es factible generar trabajo de la interacción mutua entre ellos hasta alcanzar el equilibrio. La exergía no será la cantidad de trabajo que un sistema entregará después de ser instalado, sino más bien es el límite teórico de la cantidad de trabajo que puede entregar sin violar los dos principios termodinámicos. Si se quiere optimizar el ciclo deberá analizarse solo las pérdidas de trabajo o sea de posibilidad de realizarlo ya que por los Principios de la Termodinámica siempre existe un calor desechado a la fuente fría, que tiene un valor mínimo dado por el rendimiento de Carnot. Esta parte de la energía entrante no puede ser convertida en trabajo.

El Segundo Principio se ocupa de la calidad de la energía, de las irreversibilidades del sistema, o sea de las pérdidas de oportunidad de generar trabajo. El potencial de trabajo útil o exergía constituye el máximo trabajo posible de obtener cuando el sistema es sometido a un proceso reversible desde el estado inicial hasta el estado de sus alrededores. Un sistema tendrá mayor exergía cuanto mayor sea el desequilibrio con su medio.

.En la definición de la exergía es importante definir el estado de referencia respecto del cual un sistema dado tiene energía convertible en trabajo. La respuesta de una turbina de gas depende de las condiciones ambientales, [3-4-5]. La disponibilidad de un sistema en un dado estado termodinámico depende de las condiciones de su entorno, de su medio. En días calurosos la TG trabaja con menor eficiencia que en días fríos. Si la temperatura del medio ambiente (alrededores) es de 0° C se produce alrededor del 15 % más de energía eléctrica que la misma máquina a 30° C. Asimismo los climas secos favorecen la eficiencia de estos equipos. Por estas razones las eficiencias nominales no expresan los resultados reales.

4. CICLO COMBINADO

Una central térmica de ciclo combinado es una planta de producción energía eléctrica basada en dos sistemas térmicos, con un ciclo con turbina de gas y otro con turbina de vapor. La entalpía de los humos salientes de la TG en el ciclo de gas se utiliza como fuente de calor del ciclo de vapor, evitando el uso de una caldera convencional. De esta forma los gases calientes de escape del ciclo de turbina de gas entregan la energía necesaria para el funcionamiento del ciclo de vapor acoplado sin el gasto de combustible en la combustión en caldera. Esta configuración permite un muy eficiente empleo de combustible, con rendimientos que superan el 58% (es decir, más del 58% de la energía contenida en el combustible se convierte en energía eléctrica), [6-9].

Un ciclo combinado funcionando con gas presenta beneficios medioambientales. Con un menor consumo de energía primaria se logra una mayor producción de energía eléctrica. Ello supone ventajas tanto medioambientales como económicas, [7-9]. Producen menor contaminación atmosférica, ya que el gas natural es un combustible más limpio que el carbón, el petróleo o sus derivados, usados en muchos casos para producir electricidad en las centrales convencionales. El transporte y suministro de la energía primaria (el gas natural) se hace a través de un gasoducto enterrado, por lo que se evita el impacto derivado de la circulación de camiones o trenes de aprovisionamiento de carbón o fueloil. Por otro lado, una central de ciclo combinado sólo requiere, para la condensación del vapor, un tercio del agua de refrigeración necesaria en las centrales térmicas convencionales. El ciclo combinado está formado por una ciclo con turbina de gas TG, funcionando con gas natural, una caldera de recuperación HRSG, una turbina de vapor TV de alta y otra de baja presión, una cámara de agua de alimentación cerrado CAAC y otra del tipo abierto CAAA.

La temperatura de entrada a la TG es de 1250 °C. El medio ambiente está a 25° C y 101,325 kPa. La temperatura del vapor sobrecalentado en la salida de la caldera de recuperación HRSG o sea la entrada a la TV es de 590 °C con una presión de 6 MPa. El vapor se expande en la TV da alta presión hasta 2 MPa, donde se recalienta. La TV da baja presión se descarga a 10 kPa. Los rendimientos isentrópicos de la TG, TV's y compresor C son del 86% mientras que el de las bombas es del 75%. La relación de compresión es de 10. La exergía específica destruida e_{xd} de cada componente se calcula mediante la Ecuación (6)

$$-e_{xd} = \psi_s - \psi_e + w \quad (6)$$

donde ψ_s es la exergía específica de los flujos salientes y ψ_e la de los entrantes y w el trabajo específico producido. La exergía específica de flujo se calcula con la Ecuación (7),

$$\psi_s = h - T^0 s \quad (7)$$

siendo h la entalpía específica, s la entropía específica y T^0 la temperatura del punto muerto, o sea la del medio. Del análisis exergético surgen datos de la destrucción exergética, Figura 2.

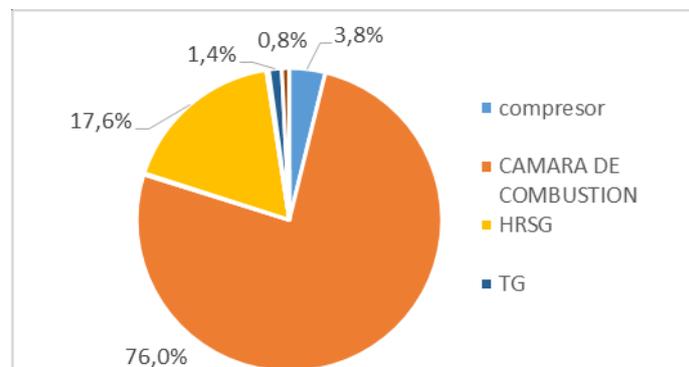


Figura 2: Destrucción exergética en %

Se encuentra que la CC es el equipo con mayor exergía destruida (76%), seguido por HRSG con un 17,6 %. En el C es del 4% y en las TV's del 0,8% y en la TG del 1,4%.

El proceso de combustión es donde hay mayores pérdidas de exergía, debido que las reacciones químicas causan altas irreversibilidades y por la transferencia de calor a través de las grandes diferencias de temperatura entre los gases del quemador y el fluido de trabajo. Una mejora del sistema desde el punto de vista exergético debería centrarse en esta unidad. La proporción de la masa aire-combustible modifica sustancialmente las tasas de destrucción de exergía.

Los dispositivos que presentaron la menor pérdida de exergía son las bombas y los intercambiadores de calor CAAA y CAAC, debido principalmente a la escasa diferencia térmica entre los flujos entrantes y salientes.

5. TASA DE RETORNO ENERGÉTICO

Otra forma conocida de evaluar el rendimiento de un sistema térmico es la denominada tasa de retorno energético TRE, Ecuación (8), la cual se indica en inglés como EROEI, *Energy returned on energy invested*, y se define como el cociente entre la cantidad de energía total capaz de producir una fuente de energía, E total, fuente y la cantidad de energía que es necesario emplear para explotar ese recurso energético, E invertida.

$$\text{TRE} = \text{E total, fuente} / \text{E invertida} \quad (8)$$

Si la energía total es menor que la energía consumida o invertida, el TRE es menor a la unidad e indica que el saldo neto es negativo, o sea que se invierte más de lo que se gana, para su funcionamiento consume más energía de la que produce. La fuente no es rentable en términos energéticos. La potencialidad de una fuente de energía puede medirse entonces a través de su TRE. Cuanto mayor sea este valor indica que se obtiene una mayor cantidad de energía neta utilizable por cada unidad de energía invertida en ella.

Un ejemplo muy citado es la tasa de retorno TRE del petróleo, cuyo valor ha descendido desde el valor de 100 a mediados del siglo pasado hasta el valor actual de 8. En los inicios de la explotación petrolera se calculaba que para extraer un barril de crudo sólo era necesario invertir un 1% de la energía contenida en el mismo, o sea un TRE de 100.

Esto era factible ya que los primeros yacimientos contenían un petróleo de altísima calidad a escasas profundidades y estaban ubicados en lugares accesibles, de forma que la energía necesaria para la búsqueda, perforación, bombeo y transporte del crudo era baja. A medida que la sociedad reclamó un mayor consumo de este combustible fósil, los yacimientos accesibles y superficiales se fueron agotando, creando la necesidad de perforaciones de mayor profundidad o en lugares con mayor dificultad de acceso, como ser perforaciones en alta mar.

En nuestro país la explotación petrolera siempre estuvo marcada por el hecho que su extracción se produce lejos de los principales centros de consumo, mientras que su refinación se realiza en polos industriales alejados de las perforaciones.

La tendencia decreciente en el valor de la TRE indica que el petróleo se agotará como fuente de energía antes que las reservas lleguen a cero, sino que se producirá en el momento el costo energético de la extracción de las reservas restantes sea igual al contenido energético de dichas reservas.

Tabla 1- Valores de TRE para fuentes primarias: combustibles fósiles

Combustibles fósiles				
Petróleo	hasta 1940	> 100	Gas natural	1 - 5
	hasta 1970	23		
	actual	5-15		
Carbón	hasta 1950	80		
	hasta 1970	30		

El agotamiento de los recursos primarios debe tomarse en cuenta en toda elección de un sistema térmico, evaluando su TRE. Según informaciones de la Asociación Española de Hidrógeno, se estiman picos de producción de gas natural a nivel mundial para el periodo 2015-2025 con una disminución drástica para el 2090, con una pendiente negativa de 2,7%/año. La producción está casi en su punto máximo y claramente descenderá en las próximas décadas.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación de un sistema térmico implica hacer un análisis de la cantidad de energía producida, evaluada a través del rendimiento térmico, como se indicó anteriormente. Por otro lado, se debe analizar la calidad del mismo a través de un análisis exergético, que indique las pérdidas energéticas del sistema propuesto. En la selección de unidades térmicas debe hacerse hincapié en el uso racional de recursos primarios y en el enfoque exergético.

A nivel de generación eléctrica en grandes centrales el uso de sistemas combinados y/o híbridos con la inserción de celdas de combustible mejora el rendimiento térmico notablemente alcanzando valores que rondan el 70%-80% y con rendimiento exergéticos superiores al 85%.

Otro concepto importante al momento de realizar un análisis exergético es la exergía específica del combustible; las exergías estándar de la mayoría de los hidrocarburos son similares a sus valores del poder calorífico inferior (PCI), calor liberado por la combustión completa de todos los componentes del combustible con el agua en los productos en la forma de vapor. La desventaja de estos sistemas es que requieren en su mayoría gas natural con un TRE bajo. La descentralización de la generación fomentando el micropower permitiría la instalación de sistemas que funcionen con recursos de energías renovables con valores mayores de TRE.

La naturaleza del combustible utilizado en un ciclo combinado puede incidir en cierta medida en la potencia, consumo específico, caudal gravimétrico, composición y temperatura del gas de escape de la TG en función de su diseño específico.

En consecuencia, el desempeño del ciclo combinado, cuando se cambia el combustible, solo puede ser determinado en forma completa cuando se conoce la respuesta de la turbina de gas ante el mencionado cambio.

Si el caudal y temperatura del gas de escape se mantienen constantes, el ciclo de bottoming daría una potencia superior cuanto mayor sea la relación H_2O/CO_2 en los humos. Este aumento es reducido en términos relativos, sin embargo es significativo en la búsqueda de mejoras de la eficiencia de tecnologías de conversión termoeléctrica, [9-10].

7. CONCLUSIONES

Actualmente todo análisis de un sistema térmico se basa fundamentalmente en el rendimiento térmico, analizando potencias producidas y energías consumidas, desechando todo aspecto de uso racional de la energía. Su optimización se realiza disminuyendo las pérdidas de calor según el Primer Principio, desdeñando el concepto de destrucción exergética. Todo sistema debería evaluarse también teniendo en cuenta el medioambiente, sus emisiones o sea valorizando la repercusión en el entorno. Se resumen diferentes rendimientos de forma de evaluar el funcionamiento de un sistema térmico y se analizan las ventajas y desventajas de los mismos. La valoración del medio ambiente y de la forma de obtener la energía primaria debe ser tomada en cuenta, de forma que contribuya como una herramienta numérica para tomar decisiones de elección del sistema térmico a analizar.

Se ha realizado el análisis exergético de un ciclo combinado, tendiente a calcular las ineficiencias termodinámicas (destrucción de exergía) de las componentes del ciclo. Aproximadamente el 76% de la destrucción total de exergía es causada por la cámara de combustión. Es la componente principal de la ineficiencia general de la planta. Por otro lado la HRSG presenta una destrucción de exergía del 18 % de la exergía total que entra al ciclo. En el compresor es del 4% mientras que en los demás elementos que conforman la planta fue menor al 2%. Una forma de mejorar el sistema sería aprovechar la entalpia de los humos a su salida del HRSG, previa a su salida por chimenea. De esta forma se reduciría la destrucción exergética [9-10].

8. REFERENCIAS

[1] Fushimi A. y Sosa, M. I. Proyecto BIRF No. TF51287/AR, Actividades Habilitantes para la 2º Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Estudio sobre Mitigación de Emisiones a través de Medidas de Eficiencia Energética, La Plata, Argentina, 2005.

- [2] Sosa, M. I. Panorama de las Aplicaciones del Hidrógeno a Nivel Mundial, IWHFC Iberoamerican Workshop on Hydrogen and Fuel Cell 2008. Anales 3 rd UNINDU, (ISBN 978-85-60235-03-2), 2008.
- [3] Sosa, M.I., Bouciguez A. y Lozano R. Inclusión de temas relacionados a energías alternativas en la asignatura termodinámica para la enseñanza de grado, AVERMA, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 12, II, Tema 10- Com. 10.01- 10.08, ASADIT- Argentina, 2008.
- [4] Bejan A., Tsatsaronis G. and Moran M., Thermal Design and Optimization, John Wiley and Sons. (1996).
- [5] Sosa, M.I. y Fushimi, A. La Cogeneración en el Contexto de las Tecnologías de Conversión Energética del Futuro, AVERMA, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, Nº II, pp. 07.01/06, ASADIT- Argentina, 2000.
- [6] Petakopoulsu, F. Tsatsaronis G., Morosuk T. Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant, vol 41, Nº1, p 146-152, 2012.
- [7] Sosa, M.I. El uso racional de la energía en sistemas industriales, Anales del 2º CAIM, segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, ISSN 978-987-1063-94-9, Vol. 1, Págs. 026 (2010)
- [8] Sosa, M. I. y Fushimi, A. Modelización de un Sistema de Cogeneración de Vapor mediante Hoja de Cálculo, Información Tecnológica, 12 (4), 2001.
- [9] Sosa, M. I. y Fushimi, A. Economizador: Calor o Exergía? Latcym 2001. Veracruz, México, 2001.
- [10] Sosa, M. I. y Fushimi, A. Análisis de la integración de recalentador y sobrecalentador, Encit CIT02-0229, 2002.