

# ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UN CICLO DE POTENCIA

**Ing. José Antonio Hernández<sup>1</sup>, Ing. Ariadna Domínguez Piedrafita<sup>2</sup>, Dr. C. Félix Juan Domínguez Alonso<sup>1</sup>**

*1. Energas S.A., Finca la Cachurra, Varadero, Matanzas, Cuba.*

*2. Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo de Occidente, km 40, Vía Blanca, Mayabeque, Cuba.*

## Resumen.

En este trabajo se muestra la metodología propuesta para realizar el análisis exergético y la determinación de las eficiencias exergéticas y razones de destrucción de exergía en los componentes de un ciclo combinado del tipo Brayton-Rankine a partir de la implementación de un modelo de simulación en el simulador de procesos ASPEN HYSYS V 7.0. Se muestran y analizan los resultados obtenidos de la aplicación de dicha metodología.

**Palabras claves:** *Ciclo Combinado; Turbinas de Gas; Simulación; ASPEN HYSYS;; Análisis Energético, eficiencia exergética, destrucción de exergía.*

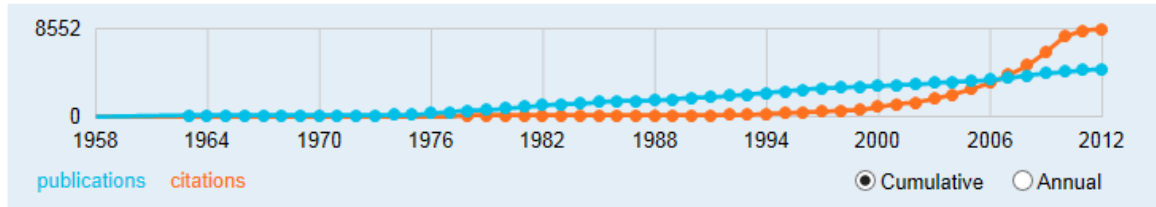
## Introducción

Muchos han sido trabajos publicados en esta temática en los últimos años, existiendo una tendencia creciente de las publicaciones según indica en la siguiente gráfica obtenida en el buscador de Microsoft Academic Search.

### Combined Cycle - Cc

Publications: 4,715 | Citation Count: 9,588

Stemming Variations: combine cycle, combinational cycles, combination cycles, combined cycles, Combining cycles



Al revisar la bibliografía publicada (Abdel-Moneim, S. A. y Hossin, K. M., 2013; Al-Sood, M. *et al.*, 2013; Ameri, M. *et al.*, 2008 y 2009; Anhedén, M., 2000; Aref, P., 2012; Balogun, O. *et al.*, 2014; Barclay, F.J., 1998; Bejan, A. *et al.*, 1996; Correa, K.S. y Ojeda, K., 2012; Dhar, P. *et al.*, 2013; Gorji- Bandpy, M. y Goodarzian, H., 2011; Martínez, Y., 2013; Memon, A.G. *et al.* 2013; Mohammadkhani, F. *et al.*, 2013; 2008; Okechukwu, E. H. y Imuentinyan, O. A., 2013; Ortega, D., 2010; Taghavi, M. *et al.*, 2013, por citar solo algunos ) se observa que es copiosa en lo referente a evaluación u optimización energética y exérgica de sistemas de potencia, que incluyen tanto ciclos simples como ciclos combinados, por ello se hace un poco complejo abordar dichos temas dado que han sido muy estudiados; sin embargo, producto a la importancia que tiene para la humanidad obtener una energía lo más barata posible y con el menor impacto ambiental estos sistemas continúan siendo un demandante objeto de estudio.

La utilización de simuladores generales de procesos como herramienta que facilite la implementación de la simulación ha sido muy poco publicada, por lo que nos proponemos en este material explicar la metodología seguida para realizar análisis energéticos y exergéticos de ciclos de potencia usando estas herramientas, ejemplificándolo con la evaluación de un ciclo combinado.

El simulador utilizado para el desarrollo de este trabajo es ASPEN HYSYS Versión 7.0, aunque también pueden emplearse otros simuladores generales disponibles en el mercado tales como ASPEN Plus, CHEMCAD, PRO II, Desing II, etc., pues todos tienen disponibles los módulos computacionales que permiten la correcta implementación del sistema, así como paquetes termodinámicos adecuados para estimar las propiedades de las corrientes involucradas en el proceso.

El documento ha sido estructurado en cuatro capítulos:

Sección 1. Introducción a la generación de potencia usando turbinas de gas y de vapor y ciclos combinados, donde se muestran los fundamentos teóricos referentes a los principales ciclos de potencia y se realiza una breve valoración de los métodos termodinámicos de evaluación de los sistemas energéticos,

Sección 2. Simulación de sistemas energéticos de cogeneración con turbinas de gas, donde se presenta la metodología empleada para realizar la implementación de dichos sistemas energéticos en el software de simulación general seleccionado (ASPEN HYSYS Versión 7.0). Para ello se ha usado como caso de estudio un ciclo combinado Brayton-Rankine.

Sección 3. Evaluación exergética de sistemas de cogeneración con turbinas de gas, donde se muestra un estudio de las irreversibilidades del sistema basándose en dos indicadores fundamentales: la eficiencia exergética y la razón de destrucción de exergía. Al igual que en capítulo 3 en este capítulo se estudian diferentes alternativas de operación del sistema.

## **Introducción a la generación de potencia usando turbinas de gas y ciclos combinados.**

Durante la década de 1970, el mundo empezó a ser consciente de la vulnerabilidad de los recursos energéticos. Esto trajo como consecuencia que se comenzara a estudiar y emplear posteriormente otras fuentes de generación de electricidad a partir de utilizar tecnologías capaces de aprovechar el gas natural asociado al petróleo para la producción de electricidad, empleando turbinas de gas con muy buenos resultados desde el punto de vista de eficiencia energética y de impacto ambiental del sistema. Estas turbinas pueden usarse en sistemas de cogeneración en la industrias de procesos, o acopladas a una turbina de vapor, conformando un ciclo combinado Brayton-Rankine.

Conocer las eficiencias de operación de estos sistemas con vista a poder accionar y optimizar los mismo se hace obligatorio, por lo que desarrollar una herramienta flexible, sencilla y práctica que permita la evaluación energética y exergética de los mismos hoy constituye una prioridad.

Una de las vías para conocer y elevar la eficiencia de generación en plantas generadoras de potencia basadas en ciclos combinados, es conocer a profundidad los fundamentos teóricos y prácticos de los ciclos que conforman el mismo, con vista a poder realizar una adecuada evaluación y optimización del sistema empleando herramientas de análisis de procesos, las que permiten estimar factores como el rendimiento de la planta, las emisiones al ambiente y la adaptabilidad del sistema al control automático; que repercuten en una mayor eficiencia tecnológica y menor impacto ambiental. (Bejan *et al.* 1996)

### 1.1 Aspectos fundamentales de los ciclos termodinámicos de potencia

Los procesos que regresan a su estado inicial reciben el nombre de procesos cíclicos. (García *et al.* 2009) Los dispositivos cíclicos generadores de potencia, comúnmente conocidos como ciclos de potencia, son de gran importancia en estudios termodinámicos debido a que varias máquinas y sistemas se basan en su funcionamiento. En el análisis de estos ciclos es muy común considerar despreciable el efecto de la energía cinética en los dispositivos que incluyen trabajo de eje, como las turbinas, compresores y bombas, a diferencia de dispositivos como las toberas aceleradoras y difusores donde esta es significativa, debido a su diseño para crear grandes cambios de velocidad. (Correa y Ojeda 2012)

Un motor térmico o máquina térmica es un artefacto que convierte energía térmica en trabajo mecánico, por medio del aprovechamiento del gradiente de temperatura entre una “fuente” caliente y un “sumidero” frío. El calor se transfiere de la fuente al sumidero y, durante este proceso, algo del calor se convierte en trabajo por medio del aprovechamiento de las propiedades de un fluido de trabajo, usualmente un gas o un líquido. Así, aunque el fluido de trabajo en un ciclo ideal de potencia opere en un circuito cerrado, el flujo de procesos individuales que componen el ciclo dependen de los dispositivos individuales utilizados para ejecutar este ciclo. (Correa y Ojeda 2012)

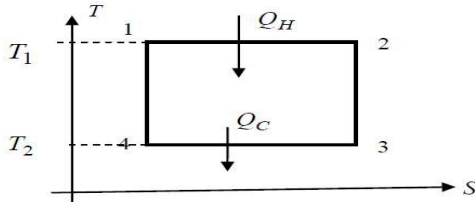
Los ciclos de potencia son sistemas muy analizados por su capacidad de producir fuerza, lo que conlleva al estudio de los mismos partiendo fundamentalmente de los ciclos teóricos correspondientes. En este caso los ciclos objeto de estudio son:

- Ciclo Carnot
- Ciclo Joule-Brayton
- Ciclo Rankine
- Ciclos combinados

*Ciclo de Carnot*

En el contexto de la termodinámica clásica de equilibrio, el modelo más simple de una máquina que transforma calor en trabajo es el conocido ciclo de Carnot, dado a conocer en 1824 por el científico francés Nicolas Léonard Sadi Carnot. (Iockheck 2014)

Las temperaturas de los almacenes frío y caliente, respectivamente, son  $T_2$  y  $T_1$  (que se supone son las mismas que las temperaturas de trabajo de la máquina térmica, ver figura 1.1), y  $\eta_C$  constituye un límite físico para cualquier máquina térmica. El ciclo de Carnot paga el precio de ser el más eficiente posible con tener una potencia nula, pues los procesos que lo componen son infinitamente lentos. (Ladino-Luna 2010)



*Figura 1.1 Ciclo de Carnot en el plano entropía,  $S$ , contra Temperatura,  $T$ . Las cantidades  $Q_1$  y  $Q_2$  son los calores absorbido y cedido respectivamente por la máquina. Fuente: elaboración propia.*

Se compone básicamente por cuatro procesos totalmente reversibles: adición de calor isotérmico, expansión isoentrópica, rechazo de calor isotérmico y compresión isoentrópica. El ciclo de Carnot puede realizarse en un sistema cerrado (un dispositivo de cilindro- émbolo) o en un sistema de flujo estacionario (usando dos turbinas y dos compresores), debido a que es el más eficiente que puede ejecutarse entre una fuente de energía térmica a temperatura  $T_1$  y un sumidero a temperatura  $T_2$ . (Correa y Ojeda 2012)

#### *Ciclo Brayton: turbina de gas*

El ciclo de potencia Brayton, similar al ciclo de Carnot, es un modelo termodinámico utilizado para un gas ideal en motores de turbina. Un ciclo Brayton convencional se compone de cuatro etapas que incluye la compresión isoentrópica, adición de calor a presión constante, expansión isoentrópica y rechazo de calor a presión constante. (Balogun *et al.* 2014)

El ciclo Brayton fue creado en 1872 por George Brayton y propuesto a principios de 1791 por John Barber. El mismo emplea como fuente de obtención de energía combustibles fósiles, queroseno o gas, los cuales permiten mediante la combustión interna producir dicha energía. La transformación termodinámica es de cuatro etapas con dos transformaciones adiabáticas y dos transformaciones isobáricas. (figura 1.2) Su rendimiento es de aproximadamente un 17% para las turbinas de gas, aplicadas en la generación de energía. (Iockheck 2014)

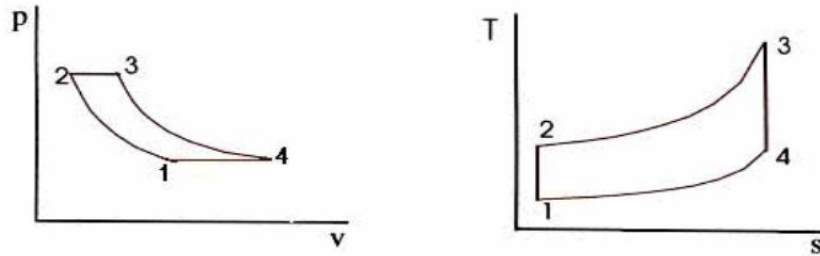


Figura 1.2 Curvas de un ciclo Brayton simple: presión contra volumen y temperatura contra entropía. Fuente: elaboración propia.

En la actualidad las turbinas de gas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. Los usos más comunes incluyen las plantas de generación de energía (producción de electricidad y calor), la rama militar y la aviación (generación de empuje). (Özgirgin 2004, Balogun 2014) Las empleadas para la generación de potencia eléctrica pueden producir de 20 a 250 MW con eficiencias que oscilan desde un 20% hasta un 40%. (Aref 2012)

En un ciclo sencillo de turbina de gas, el aire a baja presión se introduce en un compresor (estado 1) donde es comprimido hasta una presión determinada (estado 2). Se añade combustible al aire comprimido y la mezcla se quema en una cámara de combustión. Los productos calientes resultantes entran en la turbina (estado 3) y se expanden hasta el estado 4. Esta expansión del fluido de trabajo en caliente produce una gran salida de potencia de la turbina. La mayor parte de la potencia producida en la turbina se utiliza para mover el compresor y los equipos auxiliares, siendo el resto, la potencia neta que entrega la turbina. (figura 1.2 y 1.3) (Cohen *et al.* 1996, Özgirgin 2004, Aref 2012, Al-Sood *et al.* 2013, Balogun *et al.* 2014)

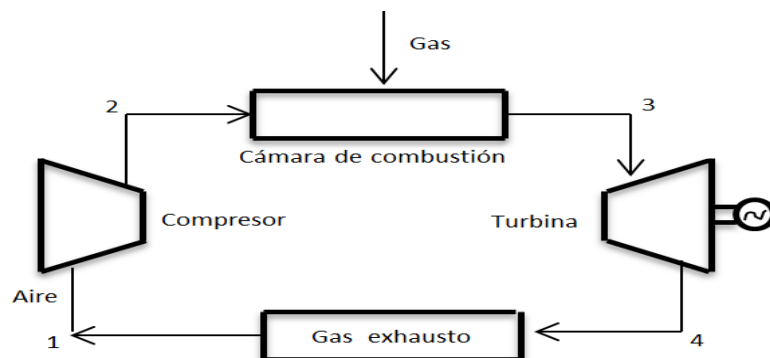
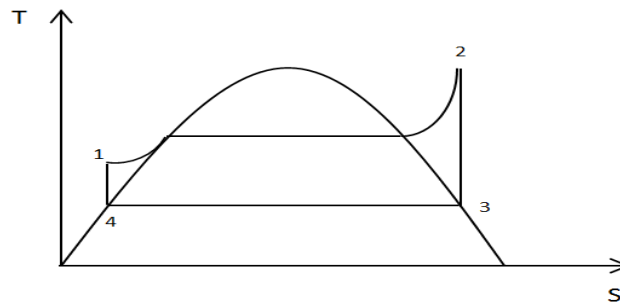


Figura 1.3 Diagrama de flujo de una turbina de gas simple. Fuente: elaboración propia.

Ciclo Rankine: turbina de vapor

El ciclo Rankine fue creado en 1859 por William Rankine John Macquorn. Este utiliza como fuente de energía materiales básicamente fósiles, carbón o gas natural, los cuales permiten la obtención de energía mediante una combustión externa. Se emplea en las centrales eléctricas y es uno de los ciclos más difundidos pues la mayoría de las máquinas de potencia operan por dicho ciclo. La transformación termodinámica es en cuatro etapas con dos transformaciones adiabáticas y dos transformaciones isobáricas, además se produce un cambio de estado donde el agua de fase líquida pasa a fase vapor. (figura 1.4) Su rendimiento es de aproximadamente un 20 a un 30%. (Muller-Steinhagen y Gottfried 2011, Iockheck 2014, Turboden 2015)



*Figura 1.4 Curvas de un ciclo Rankine con sobrecalentamiento: temperatura contra entropía.  
Fuente: elaboración propia.*

El ciclo Rankine es una modificación del ciclo Carnot y posibilita mejorar el sistema térmico corrigiendo los problemas que este produce; además puede hacer uso del calor de escape de las turbinas de gas, permitiendo que esta energía no sea desperdiciada al acoplarse en un ciclo combinado. Se diferencia de los ciclos de potencia de gas en la existencia de una mezcla bifásica para algunas zonas del proceso, ya que el fluido que se emplea se evapora y condensa continuamente durante el proceso. (García *et al.* 2009, Muller-Steinhagen y Gottfried 2011)

El sistema que funciona según este ciclo (figura 1.4 y 1.5) consta de una caldera, donde el agua (que es el fluido más conveniente por ser abundante y barato) entra en estado líquido y sale como vapor sobrecalentado. Después que el vapor sobrecalentado sale de la caldera se expande en la turbina produciendo trabajo. A continuación este vapor pasa a través de un aparato de condensación, donde sale como líquido. Luego es impulsado por una bomba de inyección hacia la entrada de la caldera donde ingresa nuevamente para ser reutilizado, según muestra la figura 1.5. (Black y Veatch 1996, Lindsley 2005, Muller-Steinhagen y Gottfried 2011, Huang y Gramoll 2015)

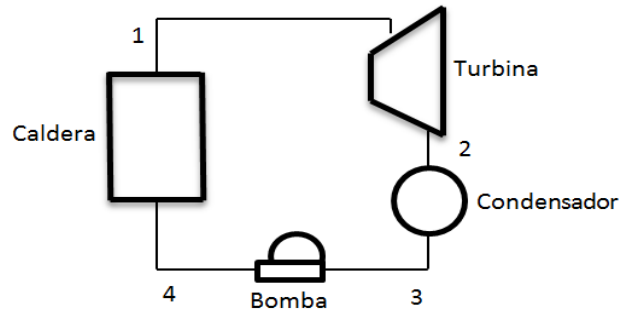


Figura 1.5. Diagrama de flujo de una turbina de vapor simple. Fuente: elaboración propia.

El ciclo termodinámico que emplea vapor difiere del ciclo Rankine ideal como resultado de irreversibilidades en diversos componentes, siendo las más comunes la fricción y la pérdida de calor no deseada hacia los alrededores. (Huang y Gramoll 2015)

### Ciclos combinados

Durante mucho tiempo, los ciclos combinados han ocupado un lugar eminente en el ámbito de la generación de energía a causa de sus mayores beneficios. Algunas de las características atractivas de estos ciclos son la alta eficacia, eficiencia térmica y potencia con respecto a los ciclos individuales que los componen. Además de ser sistemas flexibles y de rápida instalación, permiten la obtención de una mayor cantidad de energía empleando fluidos no tóxicos, baratos y de fácil disponibilidad. (Kumar y Prakash 2013, Taghavi 2013, Barclay 1998)

El diseño de este tipo de plantas permite optimizar de manera eficaz el consumo de combustible fósil, lo que deviene en una reducción del costo por concepto de combustible quemado. (Taghavi *et al.* 2013)

Un ejemplo de ciclo combinado lo constituye la unión del ciclo Brayton y el ciclo Rankine, ampliamente difundido por su capacidad de aumentar la producción de energía y disminuir la contaminación ambiental. (figura 1.6)



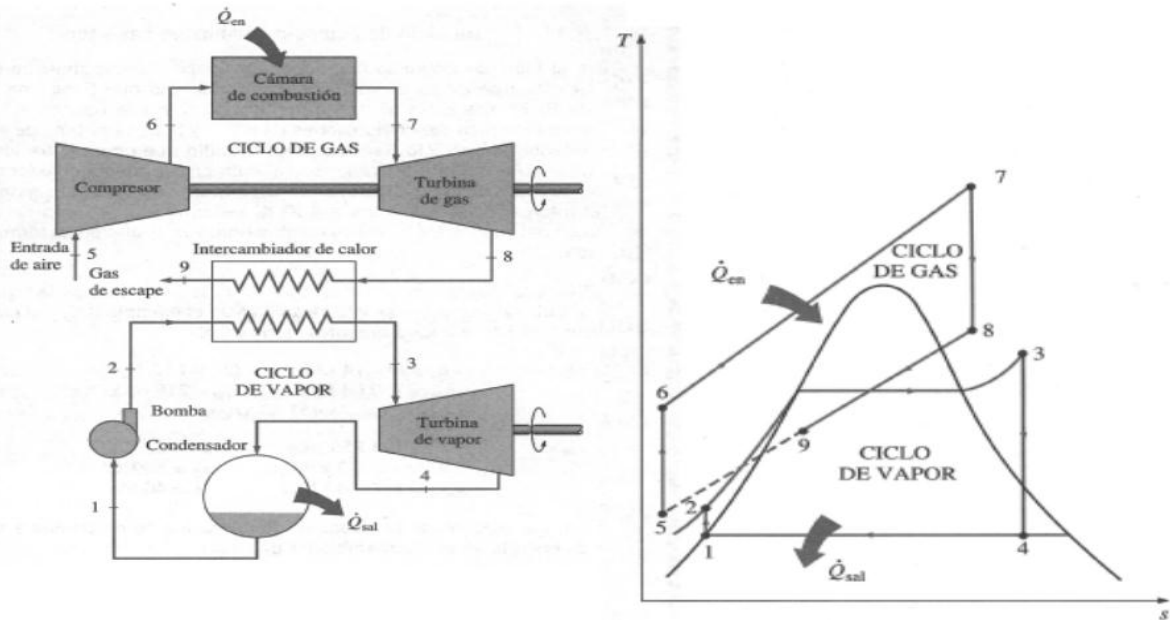


Figura 1.6 Representación de un ciclo combinado Brayton-Rankine: diagrama termodinámico  $T - S$ . Fuente: (García et al. 2009)

La combinación de los dos tipos de ciclos es posible debido a la gran diferencia de temperatura entre el ciclo de trabajo de gas y el calor de baja temperatura disipado en la turbina de vapor. En este caso el ciclo Brayton entrega su calor al ciclo Rankine, permitiendo producir vapor en lugar de dirigirlo a la atmósfera como en la configuración de ciclo simple, lo que a su vez posibilita la obtención de energía útil. Por razones obvias, este principio se llama "recuperación de calor residual" y el equipo que permite realizar dicha acción se denomina caldera recuperadora de calor. (figura 1.6) (Polyzakis et al. 2008, Martínez 2013, Taghavi et al. 2013)

#### Ventajas de los ciclos combinados

En la tabla 1.1 se han resumido las ventajas que presentan los ciclos combinados, frente a las centrales térmicas clásicas:

Tabla 1.1 Ventajas de los ciclos combinados frente a las centrales térmicas convencionales: (López 2007)

Ventajas de los ciclos combinados	Ciclos combinados	Centrales clásicas de ciclos ( agua/ vapor)
Mayor eficiencia energética. (Neta)	45-57%	35-40%
Menores emisiones atmosféricas, en especial de CO <sub>2</sub> .	350 g CO <sub>2</sub> /kW	850 g CO <sub>2</sub> /kW

Bajo costo de inversión específico.	400-600 €/kW	>1000 €/kW
Menor plazo de construcción.	2 años	3-4 años
Alto grado de automatización, bajo costo de operación.	5 €/kW-año	27 €/kW-año
Mayor aceptación social, bajo requerimiento de espacio, facilidad de ubicación, próxima al consumo.	100 000 m <sup>2</sup> (400 MW)	250 000 m <sup>2</sup> (400 MW)
Menor consumo de agua, por ser menor la necesidad de refrigeración.	435 m <sup>3</sup> /h (MW)	875 m <sup>3</sup> /h (MW)

## 1.2. Métodos termodinámicos de evaluación de sistemas energéticos

Uno de los objetivos de la termodinámica es establecer criterios generales con los cuales se pueda juzgar la bondad del diseño y el funcionamiento de los sistemas industriales en los que la energía juega un papel importante. Por lo tanto, a la hora de analizar procesos como la síntesis de un producto químico, la producción de electricidad en una central térmica o la refrigeración y licuación de gas natural, entre otros, debemos plantearnos en primer lugar la interrogante de cómo discernir su eficiencia. (Bejan 2013, Tsatsaronis 2007)

El análisis termodinámico constituye una herramienta muy útil en las industrias. Los fundamentos de la termodinámica fueron profundizados en el siglo XIX cuando debido al desarrollo de las máquinas térmicas, se planteó la necesidad de estudiar las leyes de transformación del calor en trabajo. (Bejan 2013)

Pero más tarde el método termodinámico saltó los límites de la termotecnia y encontró una amplia aplicación en muchas ramas de la física, la química y otras ciencias. Con el segundo principio de la termodinámica, se puede predecir en qué dirección pueden transcurrir las diversas transformaciones físicas y químicas en unos u otros sistemas. (Bejan 2013)

En este tópico se pretende realizar un análisis de las transformaciones de energía por cada uno de los tres métodos fundamentales:

1. Energético. Tecnología de pliegue (“*pinch*”).
2. Exergético.
3. Exergoeconómico.

### *Método energético*

Los postulados para un análisis energético están vinculados con la primera ley de la termodinámica, donde se establece que la energía no se crea ni se destruye, solamente se

transforma. Este primer principio se encarga de cuantificar las diversas formas de transmisión de energía entre el sistema y los alrededores, así como los cambios en la energía almacenada en dicho sistema. A su vez trata las interacciones de trabajo y calor como formas equivalentes de energía en tránsito y no ofrece ninguna indicación sobre la posibilidad de un proceso espontáneo en determinada dirección. (Pal *et al.* 2012) (Dhar *et al.* 2013)

La expresión matemática de esta ley expone la relación cuantitativa entre el calor (Q) y el trabajo (W), y define la energía interna (U) como una propiedad del sistema. (ecuación 1.1)

$$Q = \Delta U + W \quad (1.1)$$

### *Análisis “Pinch”*

La tecnología de pliegue “*pinch*” es una metodología basada en la primera ley, la cual se emplea con el fin de optimizar la recuperación energética de los procesos químicos. Dicha optimización consiste en un diseño correcto de la red de intercambiadores de calor de modo que se pueden aprovechar aquellas corrientes calientes y frías de una planta, para intercambiar calor entre ellas, minimizando así el uso de servicios de calentamiento o enfriamiento. (Benítez *et al.* 2010, Mendoza y Yepes 2014)

En los últimos 10 años el análisis de pliegue ha pasado de ser una herramienta dirigida a mejorar la eficiencia energética en el diseño de redes de recuperación de calor, a una metodología de optimización tanto para diseñar procesos nuevos como para modificar procesos existentes. Actualmente incluye el diseño de redes de recuperación de calor, de sistemas de separación, sistemas de remoción de desechos, sistemas de calor y potencia, sistemas de servicios auxiliares y complejos industriales. Sus objetivos, además del mejoramiento de la eficiencia energética, contemplan la reducción del costo de capital, del costo de la energía y de las emisiones contaminantes, así como la optimización del uso del agua y el mejoramiento de la operación y la producción. (Mendoza y Yepes 2014)

### *Método exergético*

La exergía se define como el máximo trabajo que puede aportar un sistema en equilibrio con el medio ambiente. (Petrapoulou *et al.* 2012) El análisis exergético por su parte es un método que utiliza la conservación de la masa y la energía junto con la segunda ley de la termodinámica para el análisis, diseño y mejora de los sistemas energéticos. Se considera una herramienta útil que permite el uso más eficiente de los recursos energéticos, ya que posibilita esclarecer las causas, ubicaciones, tipos y magnitudes de las pérdidas de energía producto de las irreversibilidades inherentes a cualquier proceso termodinámico. (Ameri y Enadi 2012, Petrapoulou *et al.* 2012, Abdel-Moneim y Hossin 2013, Dhar *et al.* 2013, Memon *et al.* 2013)

La exergía se puede dividir en cuatro componentes distintos. Los dos más importantes son la exergía física y química. En muchos estudios, los otros dos componentes que son la exergía cinética y potencial se suponen despreciables pues la elevación y la velocidad tienen cambios insignificantes. (Ameri *et al.* 2009, Ameri y Enadi 2012)

El análisis exergético supera muchas de las limitaciones del análisis energético, produciendo eficiencias que proporcionan una medida real de acercamiento a la idealidad, por lo que hoy en día el mismo se ha convertido en un método de evaluación más atractivo que el anteriormente expuesto. (Rosen 2008)

#### *Método exergoeconómico o termoeconómico*

Exergoeconomía es la rama de la ingeniería que combina adecuadamente a nivel de componentes del sistema, las evaluaciones termodinámicas basadas en un análisis de exergía con los principios económicos, a fin de proporcionar información útil para el diseño y operación de un sistema rentable, la cual no se puede obtener por un análisis energético, exergético o económico regular de forma separada. (Mohammadkhani *et al.* 2013) El objetivo principal que se persigue al combinar gastos de recursos financieros (económicos) con ecuaciones termodinámicas de un sistema de energía es encontrar un equilibrio entre la alta eficiencia térmica y un bajo costo de capital.

La termoeconomía por su parte es un término general que caracteriza cualquier combinación de análisis termodinámico con el análisis económico. La misma evidencia un gran alcance ya que va desde el análisis de costos, mejoramiento y comparaciones técnicas, a la viabilidad y optimización de los sistemas energéticos. Con el fin de definir una función de costos, que depende de la optimización de los parámetros de interés, el costo de los componentes debe expresarse como función de los parámetros termodinámicos de diseño. (Gorji- Bandpy y Goodarzian 2011, Ameri y Enadi 2012, Aref 2012, Mohammadkhani *et al.* 2013)

La mayoría de los métodos económicos basados en el análisis exergético tienen varios puntos en común: combinan la exergía y la economía para ayudar a lograr los objetivos termodinámicos y económicos, y reconocen que la exergía, no la energía, es el producto de valor en un sistema. En general estos métodos se encargan de estudiar las interacciones entre un sistema y sus alrededores, analizando económicamente el costo por ineficiencias termodinámicas. (Rosen 2008, Gorji- Bandpy y Goodarzian 2011, Shokati *et al.* 2014)

### **Evaluación exergética de sistemas de cogeneración con turbinas de gas.**

El análisis exergético, tiene como objetivo fundamental determinar las irreversibilidades de un proceso, apoyándose para esto en la segunda ley de la termodinámica. El mismo permite determinar las pérdidas exergéticas en un proceso completo o en cada uno de los equipos que lo

conformen, posibilitando emplear esta información para el diseño de nuevos sistemas térmicos o la evaluación de un sistema ya existente.

Los balances exergéticos para sistemas cerrados vienen dados por la combinación de los balances de energía y entropía como se muestra en la expresión 4.1. (Bejan *et al.* 1996)

$$\frac{d(U + Ke + Pe)}{dt} = Q - W \quad (4.1)$$

Donde  $U$ ,  $Ke$ ,  $Pe$  denotan la energía interna, la energía cinética y la energía potencial gravitatoria; mientras que los términos  $Q$  y  $W$  representan el flujo neto de energía transferida por calor y trabajo.

En general la exergía ( $E_c^T$ ) asociada a una corriente de materia “c” puede descomponerse en cuatro componentes, la exergía termomecánica o física ( $E_c^{PH}$ ), la exergía química ( $E_c^{CHE}$ ), la exergía cinética ( $E_c^{KN}$ ) y la potencial gravitatoria ( $E_c^{PT}$ ). (ecuación 2.2)

$$E_c^T = E_c^{PH} + E_c^{CHE} + E_c^{KN} + E_c^{PT} \quad (2.2)$$

Generalmente para simplificar los cálculos se suele considerar que el sistema se encuentra en reposo en relación al ambiente, pues de esta forma las componentes de la exergía cinética y potencial gravitatoria se hacen cero, por lo que la ecuación 2.2 queda de la siguiente manera:

$$E_c^T = E_c^{PH} + E_c^{CHE} \quad (2.3)$$

Luego la exergía física de una corriente definida puede determinarse a partir de la expresión 2.4: (Shokati *et al.* 2014)

$$E_c^{PH} = m_c * [(H_c - H_o) - T_o * (S_c - S_o)] \quad (2.4)$$

Donde:

$m_c$  : flujo molar de la corriente c, kgmole/h

$H_c$  y  $H_o$  : entalpía molar de las corrientes c y de referencia, kJ/kgmole

$S_c$  y  $S_o$  : entropía molar de las corrientes c y de referencia, kJ/kgmole°C

$T_o$  : Temperatura de referencia, °C

Mientras, la exergía química queda formulada por la ecuación 2.5: (Shokati *et al.* 2014)

$$E_c^{CHE} = m_c * \left[ \sum_{i=1}^n x_i * e_i^o + R * T_o * \sum_{i=1}^n x_i * \ln x_i \right] \quad (2.5)$$

Donde:

$i$  : componentes de la corriente objeto de estudio

$x_i$  : fracción molar de los diversos componentes de la corriente

$e_i^o$  : exergía química estándar para los diversos componentes de la corriente; basadas en valores de temperatura y presión del ambiente de referencia, kJ/kgmole

$R$  : constante universal de los gases, kJ/kgmole°C

Como puede observarse la exergía de una corriente depende en gran medida del estado o ambiente de referencia que se defina. El mismo se encuentra representado por el subíndice “0” y alcanza extrema importancia para el análisis que se realiza.

En la modelación el ambiente de referencia se representa como un sistema compresible simple, infinito y uniforme a temperatura  $T_o$  y presión  $P_o$ . Uno de los más adecuados e inclusive más utilizados lo constituye el estado de referencia a 101,3 kPa y 25°C, aunque es importante destacar que en aplicaciones reales, estos valores pueden ser especificados de forma diferente. Ejemplo de autores que emplean este estado de referencia lo constituyen: (Ameri *et al.* 2008, Memon *et al.* 2013, Taghavi *et al.* 2013, Tara Chand *et al.* 2013, López 2007, Montes de Oca 2007).

En Bejan y Tsatsaronis (1996) se proponen dos alternativas de ambientes de referencia para trabajos de ingeniería, estos autores los llaman Modelo I y Modelo II, cada uno con sus características y especificidades.

Por la composición del sistema que se analiza en este trabajo se ha seleccionado el Modelo II como el más adecuado para el cálculo del componente químico de la exergía. La elección de dicho modelo se ha fundamentado en el empleo del mismo en trabajos anteriores que presentan componentes similares a los tratados en esta investigación. (Díaz 2007, López 2007, Montes de Oca 2007)

#### *Indicadores a utilizar en el análisis exergético*

Existen dos indicadores fundamentales en el análisis exergético: la eficiencia exergética y la razón de destrucción de exergía. Para la determinación de estas se hace necesario determinar la exergía de todas las corrientes y la exergía destruida en cada equipo o sistema. (Ameri *et al.* 2008)

Como en el caso de los balances de masa, energía y entropía, los balances de exergía pueden ser escritos de diferentes maneras para aplicaciones particulares de interés práctico. Una forma conveniente de plantear los balances de exergía para un sistema cerrado es la siguiente: (Shokati *et al.* 2014)

$$E_Q + E_c^T \text{ entrada} = E_W + E_c^T \text{ salida} + E_D \quad (2.6)$$

Donde:

$E_Q$ : exergía asociada al calor transferido, MW

$E_c^T \text{ entrada}$  y  $E_c^T \text{ salida}$ : exergía de entrada y salida de las corrientes a un equipo o sistema, MW

$E_W$ : exergía asociada con la potencia mecánica o trabajo generado o consumido por un equipo o sistema, MW

$E_D$ : exergía destruida en un equipo o sistema, MW

#### *Determinación de la eficiencia exergética*

El análisis exergético de cualquier sistema introduce la eficiencia exergética como parámetro para la evaluación del rendimiento termodinámico. La eficiencia exergética (eficiencia de la segunda ley, efectividad o eficiencia razonable) proporciona una verdadera medida del rendimiento de un sistema energético desde el punto de vista termodinámico; pues esta representa la razón existente entre la exergía útil ( $E_{\text{útil}}$ ) y la exergía suministrada ( $E_{\text{suministrada}}$ ) al sistema. (Okechukwu y Imuentinyan 2013)

De esta manera, la eficiencia exergética en por ciento para un sistema cualquiera queda planteado según la literatura de la siguiente forma: (Okechukwu y Imuentinyan 2013)

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{suministrada}}} * 100 = \left(1 - \frac{E_{\text{destruida}}}{E_{\text{suministrada}}}\right) * 100 \quad (2.7)$$

$E_{\text{útil}}$ : exergía útil (también conocida como  $E_{\text{product}}$  según diversas literaturas) (Shokati *et al.* 2014)

$E_{\text{suministrada}}$ : exergía suministrada (también conocida como  $E_{\text{fuel}}$  según diversas literaturas) (Shokati *et al.* 2014)

$E_{\text{destruida}}$ : exergía destruida en el equipo o sistema

Para el caso de estudio que ocupa este trabajo la exergía destruida y eficiencia exergética se calculan como se muestra en la tabla siguiente:

*Tabla 2.1 Exergía destruida y eficiencia exergética para los ciclos y sus componentes*

Componentes	$E_D$ (MW)	$\epsilon * 100$ (%)
Filtros de aire	$E_{S_3}^T - E_{S_4}^T$	$\frac{E_{S_4}^T}{E_{S_3}^T}$
Compresor	$E_{S_4}^T - E_{S_5}^T + E_{W_{compresor}}^T$	$\frac{E_{S_5}^T - E_{S_4}^T}{E_{W_{compresor}}^T}$
Válvula	$E_{S_1}^T - E_{S_2}^T$	$\frac{E_{S_2}^T}{E_{S_1}^T}$
Cámara de combustión	$E_{S_2}^T + E_{S_5}^T - E_{S_6}^T$	$\frac{E_{S_6}^T}{E_{S_2}^T + E_{S_5}^T}$
Turbina de gas	$E_{S_6}^T - E_{S_7}^T - E_{W_{turbina}}^T$	$\frac{E_{W_{turbina}}^T}{E_{S_6}^T - E_{S_7}^T}$
Ciclo Brayton	$\sum E_D$ por componente	$1 - \frac{E_D \text{ ciclo Brayton}}{E_{S_1}^T}$
Caldera recuperadora	$E_{S_8}^T + E_{S_9}^T + E_{S_{10}}^T - E_{S_{17}}^T$	$\frac{E_{S_{17}}^T - E_{S_{10}}^T}{E_{S_8}^T + E_{S_9}^T}$
Atemperador	$E_{S_{17}}^T + E_{S_{18}}^T - E_{S_{19}}^T$	$\frac{E_{S_{19}}^T}{E_{S_{17}}^T + E_{S_{18}}^T}$
Turbina de vapor	$E_{S_{22}}^T - E_{S_{28}}^T - E_{W_{turbina}}^T$	$\frac{E_{W_{turbina}}^T}{E_{S_{22}}^T - E_{S_{28}}^T}$
Condensador	$E_{S_{28}}^T + E_{S_{30}}^T - E_{S_{29}}^T - E_{S_{31}}^T$	$\frac{E_{S_{29}}^T + E_{S_{31}}^T}{E_{S_{28}}^T + E_{S_{30}}^T}$
Bomba de condensado	$E_{S_{34}}^T - E_{S_{29}}^T$	$\frac{E_{S_{34}}^T - E_{S_{29}}^T}{E_{W_{bomba}}^T}$
Ciclo Rankine	$\sum E_D$ por componente	$\frac{E_{Potencia\ neta\ ciclo\ Rankine}^T}{\sum E_{S_8}^T + \sum E_{S_9}^T}$
Ciclo combinado	$E_D$ ciclo Brayton + $E_D$ ciclo Rankine	$\frac{E_{Potencia\ neta\ ciclo\ combinado}^T}{\sum E_{S_1}^T + \sum E_{S_9}^T}$

*Determinación de la razón de destrucción de exergía*



La razón de destrucción de la exergía no es más que la razón existente entre la exergía destruida de un componente o equipo ( $E_{D_{componente}}$ ) con respecto a la exergía total destruida en el sistema ( $E_{D_{sistema}}$ ). (ecuación 2.8) (Memon *et al.* 2013)

$$R_{E_D} = \frac{E_{D_{componente}}}{E_{D_{sistema}}} * 100 \quad (2.8)$$

$R_{E_D}$  : Razón de destrucción de la exergía, %

Por tanto si el elemento o equipo forma parte del ciclo Rankine, la determinación de la razón de destrucción de exergía dependerá de la exergía total destruida en este ciclo; mientras que si el elemento o equipo se encuentra formando parte del ciclo Brayton este parámetro dependerá de la exergía total destruida en dicho ciclo.

De forma similar al análisis energético la implementación del análisis exergéticos en el software de simulación se hace necesario crear varios módulos de cálculos (Spreadsheets). Se crea un módulo para el análisis de cada uno de los sistemas (Turbina de gas, calderas recuperadora y Turbina de vapor)

#### *Resultados del Análisis exergético*

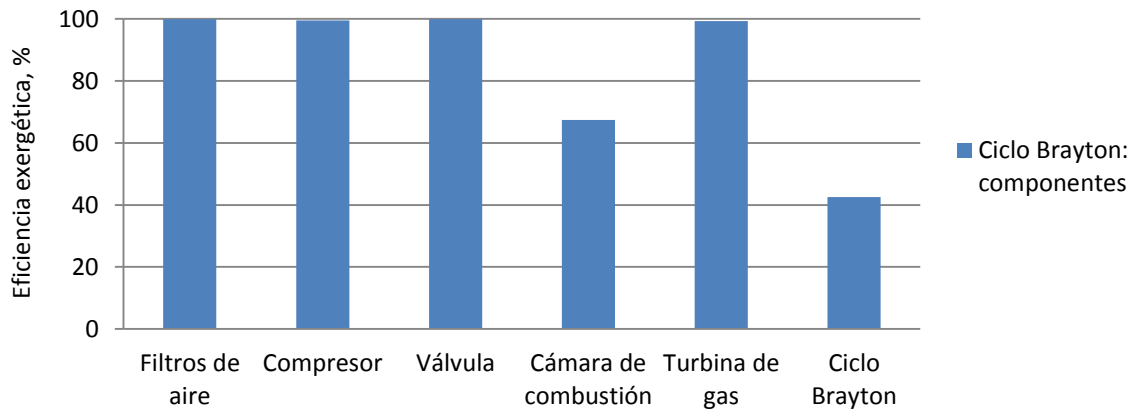
Para realizar el análisis exergético se han empleado los balances de materia y energía ya mencionados anteriormente, así como los valores calculados de entalpía, entropía, exergía química, exergía física y exergía total de las diversas corrientes. Estas exergías se han determinado siguiendo la metodología de evaluación exergética mostrada anteriormente, siendo los resultados de dicha evaluación para el caso base los que se muestran en la tabla 2.2.

*Tabla 2.2 Análisis exergético del ciclo Brayton para el caso base*

<b>Parámetros/equipos</b>	<b>Potencia (MW)</b>	<b>Ed (MW)</b>	<b>R Ed (%)</b>	<b>ε (%)</b>
Filtros de aire	-	0,15	0,03	99,97
Compresor	218,35	1,05	0,23	99,50
Válvula	-	0,05	0,01	99,99
Cámara de combustión	-	446,99	99,19	67,68
Turbina de gas	370,83	2,41	0,53	99,34
Ciclo Brayton	152,48	450,64	-	42,73

Como se puede observar en la tabla 3.8 el 99,19% de la exergía que se destruye en el ciclo Brayton tiene lugar en la cámara de combustión, razón por la cual la misma se considera el

componente que menos favorece desde el punto de vista exergético al ciclo Brayton. El análisis gráfico de esta tabla se muestra a continuación:



*Figura 2.1 Eficiencia exergética del ciclo Brayton para el caso base*

En la figura 2.1 se reflejan las eficiencias exergéticas de los diferentes componentes del ciclo Brayton, así como la del mismo es su totalidad, siendo esta de un 42,73%, valor acertado según estudios anteriores efectuados en la instalación. (Domínguez 2015)

Un análisis más detallado de las pérdidas de exergía en los diversos equipos se puede ilustrar en la siguiente figura:

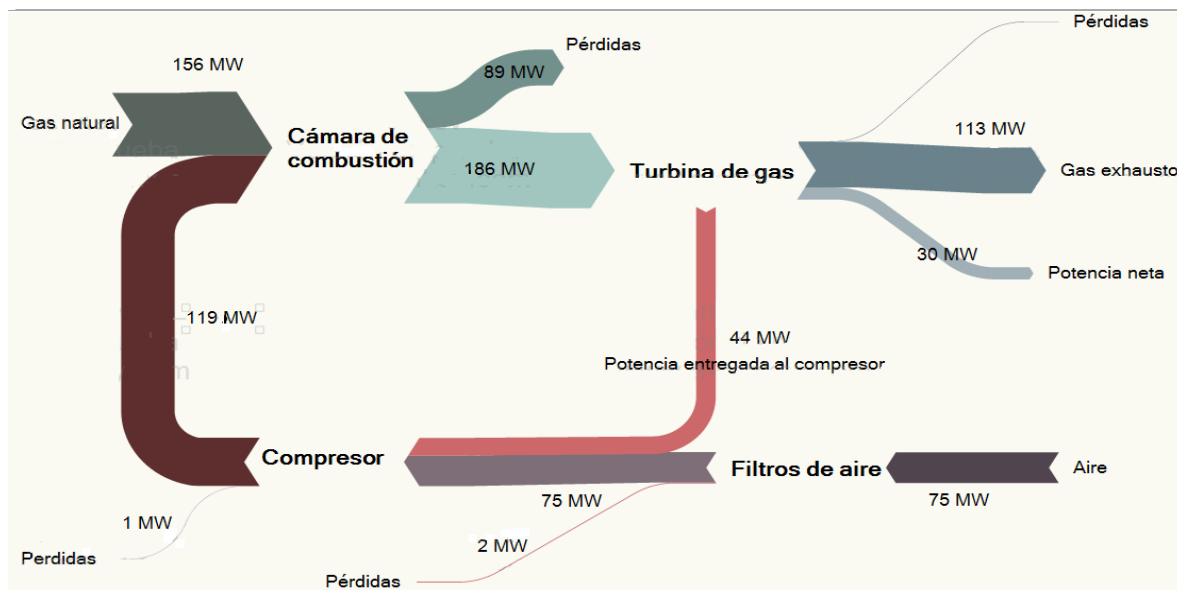


Figura 2.2 Diagrama Sankey para una TG del caso base

Al analizar los componentes por independiente se muestra correspondencia con lo antes expuesto acerca de la cámara de combustión, pues se evidencia que además de poseer las mayores pérdidas como es de esperarse posea la menor eficiencia exergética.

De forma similar el análisis exergético del ciclo Rankine queda:

Tabla 2.3 Análisis exergético del ciclo Rankine para el caso base

Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	ε (%)
Caldera recuperadora	-	458,09	87,35	51,46
Atemperador	-	0,13	0,03	99,99
Turbina de vapor	150,85	2,21	0,42	98,56
Condensador	-	64,02	12,21	92,48
Bomba de condensado	0,13	0,003	0,001	97,33
Ciclo Rankine	150,73	524,45	-	18,70

En el ciclo Rankine (tabla 2.3) las calderas recuperadoras y el condensador acumulan más del 99% de la exergía destruida en el sistema; pues poseen valores de razón de destrucción de exergía (**R Ed**) de 87,35% y 12,21% respectivamente.

Un análisis de lo antes mencionado se puede observar en la siguiente figura:

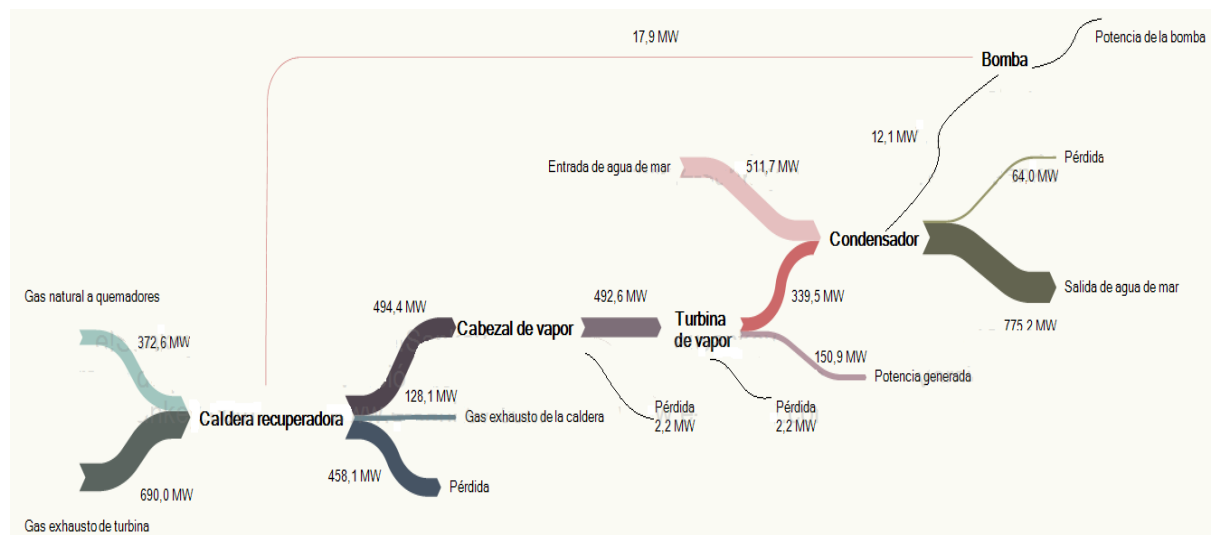


Figura 2.3 Diagrama Sankey para la turbina de vapor

Si se analizan en el ciclo de vapor los componentes por independiente se observa que las calderas recuperadoras son las que destruyen la mayor parte de la exergía en el ciclo. Estos resultados se obtienen como consecuencia de la quema de gas en los quemadores auxiliares presentes en dichas calderas recuperadoras.

Luego la representación gráfica de las eficiencias exergéticas refleja el comportamiento antes descrito, pues muestra que los menores valores de estas corresponden a las calderas recuperadoras, seguidas a continuación del condensador. (figura 2.4)

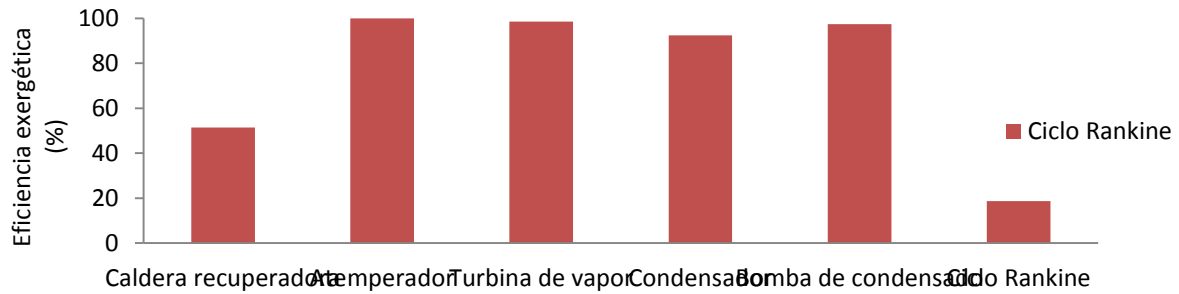


Figura 2.4 Eficiencia exergética del ciclo Rankine para el caso base

Como bien se observa tanto en el ciclo Brayton como el Rankine, los componentes que menos eficiencia han reportado son los que involucran el quemado de gas, pues este proceso implica grandes pérdidas.

Luego de manera similar se ha desarrollado el análisis exergético de las diferentes alternativas estudiadas, calculándose los valores de entalpía, entropía, exergía química, exergía física y exergía total para dichas alternativas.

Usando la información anterior se realiza la evaluación exergética de cada una de las alternativas, mostrándose en las tablas 2.4, 2.5 y 2.6 dicho resultado.

Tabla 2.4 Análisis exergético para la alternativa 1

Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	$\epsilon$ (%)
Ciclo Brayton				
Filtros de aire	-	0,14	0,03	99,97
Compresor	207,33	0,69	0,15	99,65
Válvula	-	0,05	0,01	99,99
Cámara de combustión	-	442,51	99,25	67,18
Turbina de gas	356,46	2,45	0,55	99,30

Ciclo Brayton	149,14	445,84	-	42,52
Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	ε (%)
Ciclo Rankine				
Caldera recuperadora	-	260,83	86,54	53,36
Atemperador	-	0,07	0,02	99,99
Turbina de vapor	91,46	1,34	0,44	98,56
Condensador	-	39,14	12,99	94,96
Bomba de condensado	0,08	0,002	0,001	96,92
Ciclo Rankine	91,39	301,38	-	16,49

Tabla 2.5 Análisis exergético para la alternativa 2

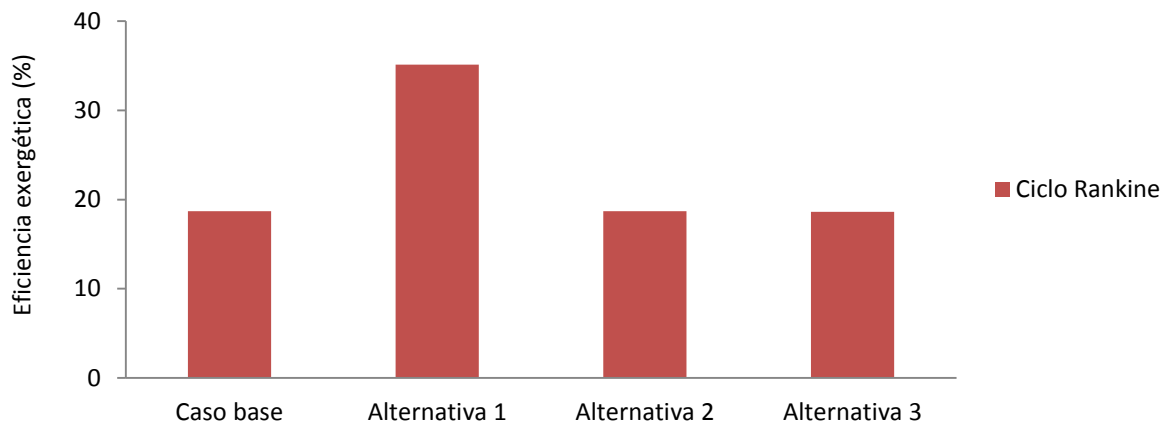
Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	ε (%)
Ciclo Brayton				
Filtros de aire	-	0,14	0,03	99,97
Compresor	215,07	0,93	0,21	99,57
Válvula	-	0,05	0,01	99,99
Cámara de combustión	-	443,66	99,21	67,48
Turbina de gas	366,10	2,42	0,54	99,34
<i>Ciclo Brayton</i>	151,03	447,20	-	42,61
Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	ε (%)
Ciclo Rankine				
Caldera recuperadora	-	473,32	89,90	44,72
Atemperador	-	0,09	0,02	99,99
Turbina de vapor	120,22	1,76	0,33	98,56
Condensador	-	51,33	9,75	93,90
Bomba de condensado	0,10	0,003	0,001	97,17
<i>Ciclo Rankine</i>	120,12	526,49	-	14,01

Tabla 2.6 Análisis exergético para la alternativa 3

Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	ε (%)
Ciclo Brayton				
Filtros de aire	-	0,15	0,03	99,97
Compresor	216,90	0,93	0,21	99,55
Válvula	-	0,05	0,01	99,99
Cámara de combustión	-	446,85	99,21	67,42
Turbina de gas	370,69	2,46	0,55	99,34

Ciclo Brayton	153,79	450,43	-	42,49
Parámetros/equipos	Potencia (MW)	Ed (MW)	R Ed (%)	$\epsilon$ (%)
Ciclo Rankine				
Caldera recuperadora	-	472,21	89,12	46,67
Atemperador	-	0,07	0,01	99,99
Turbina de vapor	130,68	1,91	0,36	98,56
Condensador	-	55,67	10,51	93,55
Bomba de condensado	0,11	0,003	0,001	97,22
Ciclo Rankine	130,57	529,86	-	18,63

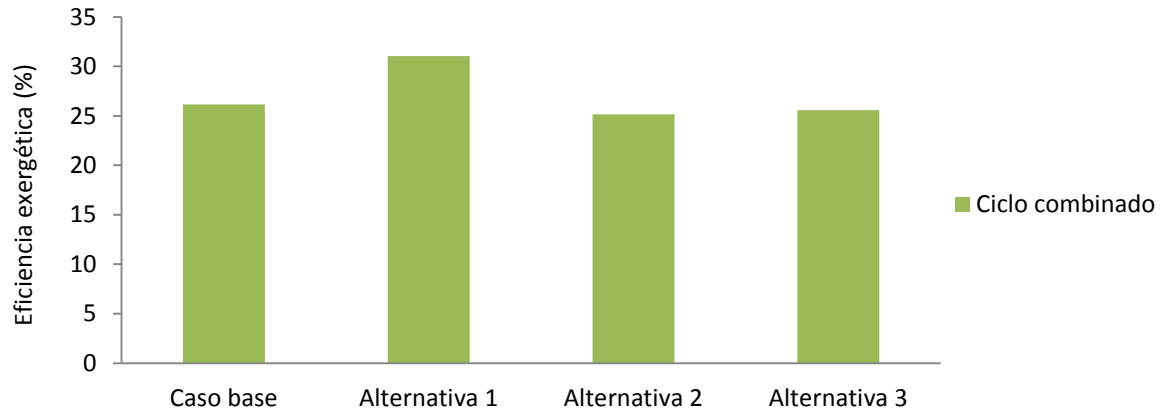
La representación gráfica de los datos arrojados por dicho análisis para las diversas condiciones de operación se evidencia en la figura 2.3.



*Figura 2.5 Eficiencia exergética del ciclo Rankine en las diferentes alternativas*

Al comparar el caso base y las diferentes alternativas (figura 2.5) se obtiene que la mayor eficiencia corresponde al sistema en el que no se emplea quemado auxiliar, donde se alcanza un valor ligeramente superior al 35%. Sin embargo para el caso base y las otras alternativas (quemadores a carga parcial) se observa que la eficiencia exergética es similar, tomando valores próximos al 20%.

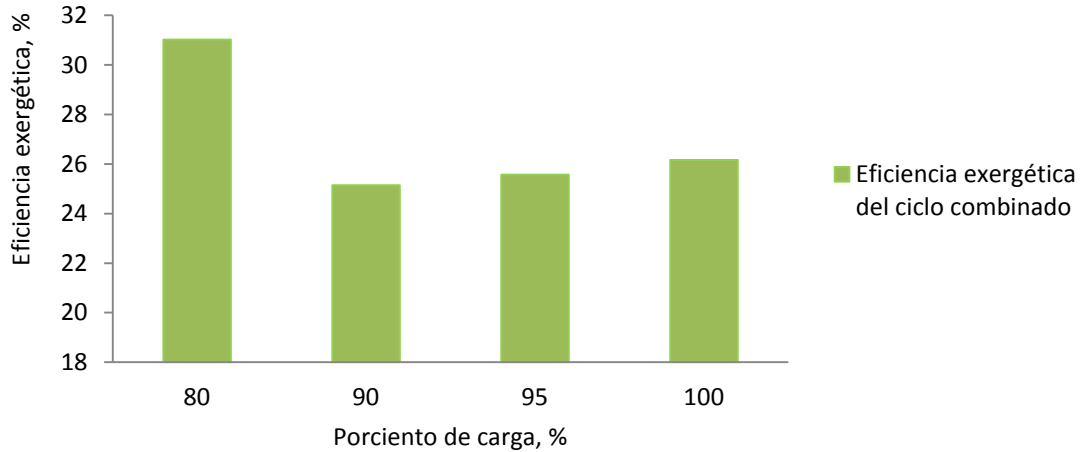
Llevando este análisis al ciclo combinado en general se obtiene la figura siguiente:



*Figura 26 Comportamiento de la eficiencia exergetica para el ciclo combinado en las diversas alternativas*

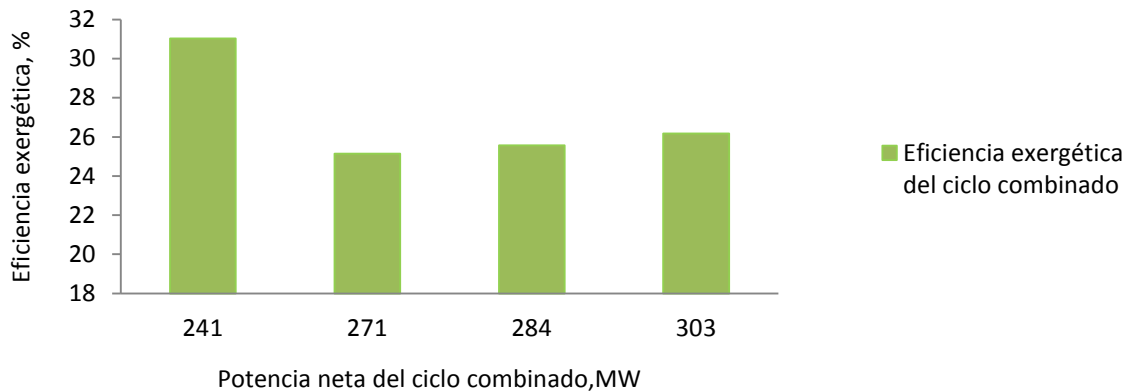
En correspondencia con lo antes planteado si se analiza la figura 2.6 se podrá observar un comportamiento similar al de la figura 2.5, donde se obtiene al igual que para el ciclo Rankine una mayor eficiencia exergetica en la alternativa que no emplea el quemado auxiliar. A su vez se mantiene la equivalencia entre el caso base y las alternativas que emplean los quemadores de las calderas recuperadores a carga parcial.

Al reordenar la figura 2.6 en función del porcentaje de carga (figura 2.7) se observa un comportamiento descendente primero y ascendente después, provocado por el aumento del consumo de gas en los quemadores. Dicha reagrupación posibilita una mayor comprensión de las condiciones de operación del ciclo combinado para diferentes flujos de gas en los quemadores auxiliares de las calderas, pues arroja que la eficiencia más elevada se alcanza para un 80% de carga (alternativa 1), donde como bien se conoce no se emplea quemado auxiliar y se producen 91,39 MW en la turbina de vapor.



*Figura 2.7 Comportamiento de la eficiencia exergetica del ciclo combinado respecto al porcentaje de carga del mismo*

Si se analiza la eficiencia exergetica del ciclo combinado en función de la potencia neta producida en el mismo (figura 2.8), se puede observar un comportamiento similar al de la figura 2.7.



*Figura 2.8 Comportamiento de la eficiencia energética del ciclo combinado respecto a la potencia neta del mismo*

Como puede observarse cuando no existe consumo adicional del gas enviado a quemadores auxiliares la potencia generada es de 240,6 MW; mientras que cuando se emplea gas adicional hasta satisfacer la máxima capacidad de los quemadores el ciclo es capaz de producir 303,3 MW. (figura 2.8)



Para facilitar este análisis es necesario tener en cuenta lo mostrado en la figura siguiente:

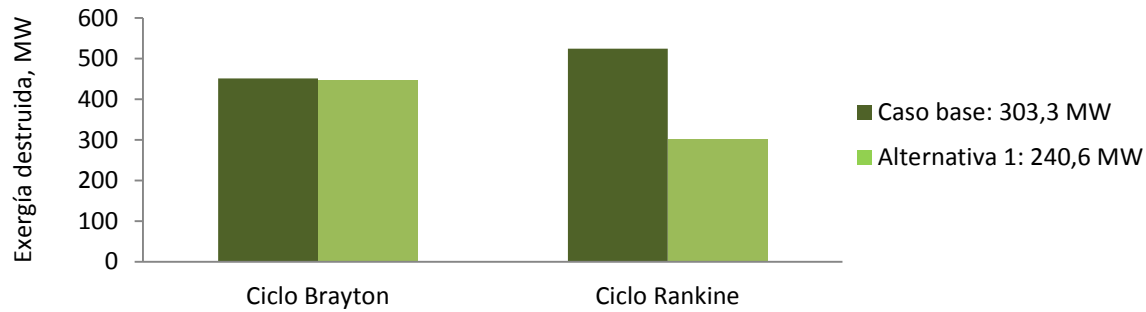


Figura 2.9 Exergía destruida de los ciclos Brayton y Rankine respecto al ciclo combinado

Como bien se sabe el consumo de gas del ciclo Brayton se mantiene prácticamente constante siendo solo el ciclo Rankine el que influye en la variación de carga y razón de destrucción de exergía del ciclo combinado. Es por ello que en la figura 2.9 se muestra prácticamente invariable la exergía destruida del ciclo Brayton para las dos condiciones de operación, mientras que en el ciclo Rankine esta es mayor en el caso base como resultado de la quema adicional de gas.

Un análisis más detallado de la eficiencia exergética del ciclo combinado en su conjunto muestra que este parámetro se ve influenciado ante la variación de la carga en el ciclo Rankine y en el ciclo combinado en su totalidad, no siendo así para el caso del ciclo Brayton, lo que está en correspondencia con lo planteado anteriormente. (figura 2.10)

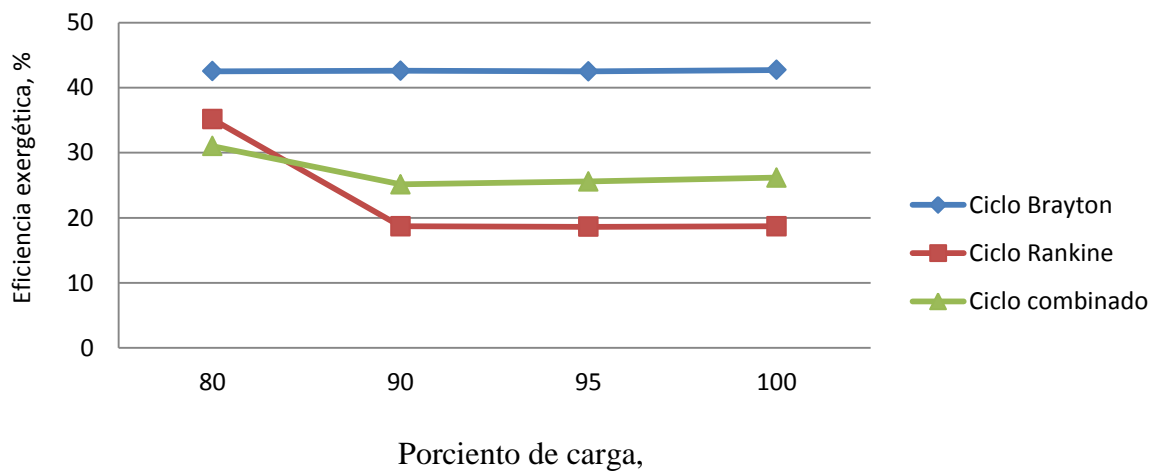


Figura 2.10 Comportamiento de la eficiencia exergética del ciclo Brayton, ciclo Rankine y ciclo combinado respecto al porcentaje de carga para las diversas condiciones de operación

Al comparar el caso base (100% de carga) con las alternativas de operación que incluyen los quemadores a carga parcial (90% y 95% de carga), se observa que la eficiencia exergética no varía considerablemente, por lo que se puede deducir que aunque existe un ligero ascenso de la misma no hay gran fluctuación cuando la turbina de vapor produce 120 MW, 130 MW o 150 MW.

Al igual que en el caso del análisis energético el análisis exergético exige marcar pautas que declaren si es de interés obtener mayor eficiencia energética o mayor generación de potencia, pues en dependencia del objetivo que se persiga se seleccionará una u otra condición de operación.

Según los resultados arrojados tanto por el análisis energético como por el exergético se puede resumir que cuando se pretende obtener mayor producción de potencia las condiciones de operación del caso base son las indicadas, mientras que cuando se quiere elevar la eficiencia exergética de la planta la alternativa 1 es la más recomendada.

### Referencias bibliográficas

- Abdel-Moneim, S. A. y Hossin, K. M. (2013). “Exergy Analysis of A Combined Gas/ Steam Turbine Cycle with A Supercharged Boiler”. American Journal of Engineering Research (AJER) **2**(12): 321-333.
- Al-Sood, M. *et al.* (2013). “Optimum parametric performance characterization of an irreversible gas turbine Brayton cycle”. International Journal of Energy and Environmental Engineering **4**(37): 1-13.
- Ameri, M. *et al.* (2008). “Exergy analysis of a 420MW combined cycle power plant”. International Journal of Energy Research **32**: 175–183.
- Ameri, M. *et al.* (2009). “Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study”. International Journal of Energy Research **33**: 499–512.
- Ameri, M. y Enadi, N. (2012). “Thermodynamic modeling and second law based performance analysis of a gas turbine power plant (exergy and exergoeconomic analysis)”. Journal of Power Technologies **92**(3): 183–191.
- Anheden, M. (2000). *Analysis of Gas Turbine Systems for Sustainable Energy Conversion*. Tesis de doctorado. Suecia: Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology. 57p.
- Aref, P. (2012). *Development of a Framework for Thermoeconomic Optimization of Simple and Combined Gas-Turbine Cycles*. Tesis de doctorado. Inglaterra: Cranfield University. 193p.

- Ataurima, M. (2013). *Matlab & Simulink para Ingeniería*. Primera edición. España: Universidad Cardenal Herrera. 116p.
- Balogun, O. *et al.* (2014). “Exergy Analysis Of Gas Turbine-Burner Engine”. International Journal of Scientific & Technology Reaserch **3**(1): 62-67.
- Barclay, F.J. (1998). *Combined Power and Process*. Segunda edición. Reino Unido: Professional Engineering Publishing, University Press & Cambridge. 175p. ISBN: 1 86058 129 3.
- Bejan, A. (2013). “Entropy Generation Minimization, Exergy Analysis, and the Constructal Law”. Arabian Journal for Science and Engineering **38**( 2): 329-340.
- Bejan, A. *et al.* (1996). *Thermal Design and Optimization*. Primera edición. New York: John Wiley & Sons, Inc.. 533 p. ISBN:0-471-58467-3.
- Benítez, A. *et al.* (2010). “Tecnología Pinch: Una Introducción a la Integración Energética”. *Monografía* [en línea]. Cuba: Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/215728861/Guia-Completa> [Consulta: febrero de 2014]
- Billo, E. J. (2007). *Excel for Scientist and Engineers: Numerical Methods*. Primera edición. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.. 480p. ISBN: 0471387347.
- Black y Veatch (1996). *Power plant engineering*. Primera edición. Estados Unidos: Springer. 856p. ISBN: 0-412-06401-4.
- Cohen, H. *et al.* (1996). *Gas Turbine Theory*. Cuarta edición. Reino Unido: Longman Group Limited. 435p. ISBN: 0-582-23632-0.
- Correa, K.S. y Ojeda, K. (2012). “Análisis termodinámico de ciclos de potencia”. Ingeniator **3**(4): 100-109. Disponible en: <http://letravirtual.usbctg.edu.co/index.php/ingeniator/article/view/241> [Consulta: febrero de 2014]
- Dhar, P. *et al* (2013). “Exergy and Efficiency Analysis of Combined Cycle Power Plant”. International Journal of Scientific & Engineering Research **4**(12): 1161-1169.
- Díaz, Y. (2007). *Desarrollo de un modelo de simulación para la evaluación de los ciclos de turbinas de gas utilizando para ello un simulador de procesos*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Termoenergética Industrial. Cuba: Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. 81p.
- Domínguez, F. J. (2015). “Análisis energético y exergético del ciclo combinado de ENERGAS.S.A Boca de Jaruco”. En: *VIII Conferencia Internacional de Energía Renovable*,

*Ahorro de Energía y Educación Energética (CIER 2015)*. La Habana, Cuba: Palacio de Convenciones de La Habana. 12 p.

EcuRed (2013). *EcuRed.cu*. [en línea]. Disponible en web: [http://www.ecured.cu/index.php/Lenguaje\\_de\\_Programaci%C3%B3n](http://www.ecured.cu/index.php/Lenguaje_de_Programaci%C3%B3n). [Consulta: enero de 2014]

García, E. et al. (2009). “Capítulo IV :Tema 1 Ciclos de Potencia de Vapor”. En: *Termoaplicadaunefm's Blog* [en línea]. Venezuela: Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Disponible en: <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/02/tema-1-ciclo-de-vapor.pdf> [Consulta: enero de 2015]

General Electric. (2015). *Heavy Duty Gas Turbine Overview*. [en línea] Disponible en web: [www.scrib.com/doc/220897307/01-Intro-theory-GT.html](http://www.scrib.com/doc/220897307/01-Intro-theory-GT.html). [Consulta: abril de 2015]

Gorji- Bandpy, M. y Goodarzian, H. (2011). “Exergoeconomic optimization of gas turbine power plants operating parameters using genetic algorithms : a case study”. *Thermal Science* **15**(1): 43-54.

Himmelblau, D.M. (2012). *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*. Octava edición. Estados Unidos: Editorial Pearson. 930 p. ISBN: 0132346605.

Huang, M. y Gramoll, K. (2015). “Chapter 10. Rankine Cycle”. *Thermodynamics eBook* [en línea]. Multimedia Engineering Thermodynamics. Disponible en eCourses: [http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=th&chap\\_sec=10.1&page=case\\_intro](http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=th&chap_sec=10.1&page=case_intro) [Consulta: enero de 2015]

Iockheck, M. (2014). *Patent heat engine operating in accordance with carnot's thermodynamic cycle and control process*. Estados Unidos. WO 2014000072 A1 (Cl. F02G1/043, F02C5/06), 26 de febrero de 2014.

Kumar, A. y Prakash, O. (2013). “Optimization Of Net Work Output & Efficiency Of Gas Turbine”. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* **3**(4): 732-739.

Ladino-Luna, D. (2010). “Análisis del Comportamiento de un Ciclo Tipo Carnot”. *Información Tecnológica* **21**(4): 79-86.

Liengme, B.V. (2015). *A Guide to Microsoft Excel for Scientists and Engineers*. Primera edición. Estados Unidos : Elsevier. 382p. ISBN: 9780128028162.

- Lindsley, D. (2005). *Power-plant control and instrumentation, the control of boilers and HRSG systems*. Primera edición. Londres, Reino Unido: The Institution of Electrical Engineers. 213p. ISBN: 0-85296-765-9.
- López, Y. (2007). *Desarrollo de un modelo riguroso para el control operacional de un ciclo de vapor*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Termoenergética Industrial. Cuba: Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. 80p.
- Martínez, Y. (2013). *Determinación del esquema óptimo de operación del Ciclo Combinado Boca de Jaruco*. Tesis de diploma. Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. 73p.
- Memon, A.G. *et al.* (2013). “Exergy Analysis of 144 Mw Combined Cycle Power Plant Kotri Pakistan”. *Sindh University Research Journal (Science Series)* **45**(1): 107-112.
- Mendoza, Y. y Yepes, E. (2014). “La tecnología Pinch como herramienta para el uso eficiente de la energía”. *Monografía*. Colombia: Universidad del Atlántico. [Consulta: marzo de 2015]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/emyg88/la-tecnologa-pinch-como-herramienta-para-el-uso-eficiente-de-la-energa-29933253>
- Mohammadkhani, F. *et al.* (2013). “Effect of Ambient Temperature on Exergetic and Exergoeconomic Parameters of a CHP System”. *Journal of Environmentally Friendly Processes* **1**(3): 28-37.
- Montes de Oca, L. (2007). *Desarrollo de un modelo de simulación para la evaluación de una caldera recuperadora de calor usando un simulador de procesos*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Termoenergética Industrial. Cuba: Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. 83p.
- Montes de Oca, L. *et al.* (2008). “Simulación de una caldera de recuperación de calor utilizando el software Hysys”. *Tecnología Química* **XXVIII**(1): 54-64.
- Montes, N. (2014). “Ranking de lenguajes de programación más usados para el 2014”. En: *Blogs CEU informática* [en línea]. Disponible en: <http://blog.uchceu.es/informatica/ranking-de-lenguajes-de-programacion-mas-usados-para-2014/> [Consulta: marzo de 2015]
- Muller-Steinhagen y Gottfried, H.M. (2011) “Rankine Cycle”. *Thermopedia: Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering*. Disponible en: <http://www.thermopedia.com/content/1072/> [Consulta: enero de 2015]
- Okechukwu, E. H. y Imuentinyan, O. A. (2013). “Exergy analysis of Omotosho phase 1 gas thermal power plant”. *International Journal of Energy and Power Engineering* **2**(5): 197-203.

- Ortega, D. (2010). *Obtención de un modelo de simulación riguroso para la toma de decisiones en un Ciclo Combinado de Turbina de Gas*. Tesis de diploma en opción al título de Ingeniero Químico. Cuba: Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. 70p.
- Özgirgin, E. (2004). *Utilization of natural gas, optimization of cogeneration/ Combined cycle applications in campus environment*. Tesis presentada en opción al título de Máster. Turquía: Middle East Technical University. 143p.
- Pal, M.K. *et al.* (2012). “Thermodynamic Analysis of Power Generating Units Based On First and Second Law: A Review”. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) **2**(6): 349-356.
- Petrakopoulou, F. *et al.* (2012). “Chapter 21 - Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture with Monoethanolamine in a Combined-Cycle Power Plant: Exergetic, Economic and Environmental Assessment”. *Greenhouse Gases – Emission, Measurement and Management*. Primera edición. República de Croacia: InTech. 464-484p. ISBN: 978-953-51-0323-3.
- Petroleum Community Forum.* (2010). “Hysys vs ChemCad vs Aspen Plus vs Pro II”. [en línea]. Estados Unidos: vBulletin Solutions, Inc.. Disponible en: <http://www.egpet.net/vb/content/258-hysys-vs-chemcad-vs-aspen-plus-vs-proii.html?langid=7>. [Consulta: marzo de 2015]
- Polyzakis, A.L. *et al.* (2008). “Energy analysis of Brayton combined cycles”. Int. J. Exergy **5**(5/6): 652-683.
- Rosen, M. A. (2008). “A Concise Review of Exergy-Based Economic Methods”. En: *3rd IASME/WSEAS Int. Conference on Energy & Environment*. Reino Unido: University of Cambridge. 136-144p.
- Scenna, N. J. (1999). *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*. Primera edición. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. 829 p. ISBN: 950-42-0022-2.
- Shames, I. H. (1995). *Mecánica de fluidos*. Tercera edición. Colombia: McGraw-Hill. 850 p. ISBN: 958-600-246-2.
- Shokati, N. *et al.* (2014). “A Comparative Exergoeconomic Analysis of Waste Heat Recovery from a Gas Turbine-Modular Helium Reactor via Organic Rankine Cycles”. Sustainability **6**: 2474-2489.
- Sue, D. y Chuang, C. (2004). “Engineering desing and exergy analyses for combustion gas turbine based power generation system”. Energy **29**: 1183-1205.

- Taghavi , M. *et al.* (2013). “Thermodynamic and Thermo Economic Optimization of Combined Cycle Power Plant”. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing **1**(2): 186-190.
- Tara Chand, V. *et al.* (2013). “First Law and Second Law Analysis of Gas Turbine Plant”. International Journal of Mechanical Engineering and Research. **3**(4): 415-420.
- Threepwood, G. (2015). *Mathcad, Matlab, Maple & Mathematica* [en línea]. Disponible en web: <https://www.physicsforums.com/threads/mathcad-matlab-maple-mathematica.4529/>. [Consulta: marzo 2015]
- Tsatsaronis, G. ( 2007). “Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics”. Energy **32**(4): 249-253.
- Turboden srl (2015). “Organic Rankine Cycle – Description”. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.* [en línea]. Disponible en: <http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-history.php> [Consulta: febrero 2015]
- Winterbone, D. (1997). *Advanced Thermodynamics for Engineers*. Primera edición. Estados Unidos: Arnold. 378 p. ISBN: 9780340676998.