

## CÁLCULO TERMEOECONÓMICO DE LOS ÍNDICES EXERGÉTICOS DEL GENERADOR DE VAPOR GB-3 DE LA REFINERÍA DE PETRÓLEO “HERMANOS DÍAZ”

José Jorge Noa Hechavarría, Ángel Luis Brito Sauwanell  
CEEfE, Universidad Oriente

*En el presente trabajo se desarrolla, paso a paso, la metodología para el cálculo termoeconómico del generador de vapor # 3 ubicado en la planta de fuerza de la refinería de petróleo “Hermanos Díaz”, de la Ciudad de Santiago de Cuba. Esta herramienta permite, de acuerdo al segundo principio de la termodinámica, comparar la calidad del proceso de generación de vapor para dos períodos diferentes de explotación de la máquina (diciembre de 2004 y 2007), ya que mide correcta y universalmente la cantidad de exergía gastada en el proceso real que es el que genera el consumo de recursos y, por tanto, da origen a la formación de los costos asociados a estos.*

*El procedimiento general de su aplicación consiste en primer lugar en realizar el balance usual de masa y de calor del proceso que ocurre en el equipo, para luego efectuar el balance de disponibilidad de la energía (exergía) que resultan de esas irreversibilidades. La combinación con los conceptos económicos se produce al establecer los precios de la energía disponible en todas las corrientes energéticas que intervienen en el proceso y por tanto, el valor económico de las pérdidas de disponibilidad en cada período evaluado.*

*La valoración económica de cada corriente del sistema introduce una nueva posibilidad de análisis no utilizada hasta el momento y que consiste en la evaluación económica del valor de la energía no por su cantidad, sino por la disponibilidad de esa energía.*

**Palabras clave:** refinerías de petróleo, generadores de vapor, exergía, índices exergéticos.

*In the present work has been developed, step by step, the methodology for thermoeconomic calculation of the boiler # 3 located in petroleum's power plant of refinery Hermanos Díaz, in Santiago de Cuba city. This tool permits, according to the thermodynamic, to compare the process quality steam production for two different periods of exploitation machine (december 2004 and 2007), its measures correct and universally the quantity of exergy spent in the real process that the one that generates the consumption of resources therefore, gives rise to the formation of costs associated of these.*

*The general procedure of this application consists first, to realize the usual balance of mass and heat of the process than occurs in the machine, to the next to make the balance of availability of the energy (exergy) than they work out of those irreversibilities. The combination with economical concepts is produced when establishing the prices of available energy in all the energetic currents that intervening in the process therefore, the economic value of the losses of availability in each evaluated period.*

*The economic evaluation of every current of the system introduces a new possibility of analysis not utilized until now and that consists in the economic appraisal of the value of energy not for the quantity, but for the availability of that energy.*

**Key works:** petroleum's power plant of refinery, steam boiler, exergy, exergetic index.

### Introducción

La refinería de petróleo “Hermanos Díaz” cuenta con una instalación de tres generadores de vapor, del mismo modelo, que cumple la función

principal de satisfacer la carga térmica necesaria para mover las turbinas acopladas a las bombas y ventiladores, suministrar la energía térmica con vapor al proceso químico de las plantas, así como para otras necesidades de la empresa.

Tabla 1  
Características de los generadores de vapor

Descripción	Observaciones	Unidades
Denominación:	GB-1; GB-2; GB-3	-
Fabricante:	Erie Works (USA)	-
Superficie total de transferencia:	411, 34	m <sup>2</sup>
Presión de operación:	17,58	kgf/cm <sup>2</sup>
Tiro:	Natural y forzado mecánico	-
Capacidad continua:	19 954,65	kg/h
Temperatura de operación del vapor:	208	°C
Combustible:	fuel oil # 2 y gas combustible	-
Tipo de atomización:	Mecánica con vapor	-
Rendimiento bruto:	85	%

Siendo la planta de generación de vapor un “sistema clave”, por ser su función vital para las necesidades del proceso industrial principal, e identificados los generadores de vapor como “puestos claves”, han sido múltiples los esfuerzos realizados para evaluar su actividad industrial, con el objetivo de alcanzar mayor efectividad en la conservación energética y en la determinación del ahorro potencial de los portadores energéticos. Aunque el sistema de evaluación actual sólo realiza la auditoria energética de los equipos de manera satisfactoria, es un hecho impostergable, el lograr fusionarlo con una herramienta más poderosa como vía para garantizar la rigurosidad en el control sistemático de los parámetros de operación y de las incidencias.

El análisis exergético y exactamente el termoeconómico, está imponiéndose en los últimos años, en el diseño y auditoria de las instalaciones industriales. Al conocer la parte noble, o sea, la capacidad de producir trabajo de los flujos de energía que ingresan a los portadores energéticos, estaremos discerniendo u optimizando el comportamiento o diseño de los equipos que componen la instalación objeto de estudio, a la luz del segundo principio de la termodinámica, que es el que verdaderamente incorpora la información de la calidad de los procesos físicos y químicos desde el punto de vista termodinámico. Esto se traduciría en ahorro de combustible y menor impacto ambiental.

El cálculo termoeconómico, que se realiza al generador de vapor GB-3, permite evaluar el comportamiento termodinámico del equipo antes

y después de un mantenimiento capital, desde el punto de vista de la primera y la segunda ley.

## Fundamentación teórica

Un aspecto clave para discernir la eficiencia de un sistema industrial, es comparar el producto obtenido con el consumo o recurso necesario para obtenerlo. Para que dicha comparación tenga un resultado inequívoco, ambos conceptos (producto y recurso) deben expresarse en unidades equivalentes, o sea de igual valor termodinámico. Por lo tanto, dado que las calidades de la energía son diversas y la definición de eficiencia debe ser general, independiente de las formas de energía que participan en el proceso, no debe utilizarse la energía para expresar el producto y el recurso, sino otra propiedad que sí sea termodinámicamente equivalente. Esta propiedad es la Exergía.

Múltiples han sido las definiciones, interpretaciones y cuestionamientos a que se ha sometido este concepto. Campos Avella /1/, afirma que Kelvin la define de la siguiente manera:

El trabajo útil que puede obtenerse de un sistema cerrado en desequilibrio con el medio ambiente, no es más que la exergía. Este desequilibrio puede ser: térmico, mecánico y químico.

El concepto de exergía está indisolublemente asociado al del ambiente físico, debido a que todos los procesos industriales tienen uno como entorno y están condicionados por él. El ambiente físico se puede dividir en dos partes: Recursos

---

naturales (R.N) combustibles, metales, yacimientos geotérmicos, etcétera, que se encuentran en desequilibrio termodinámico con la segunda parte denominado Ambiente de Referencia (A.R), el cual esta representado por aquellos recursos que la naturaleza pone a nuestra disposición en cantidades ilimitadas a un costo de extracción nulo evaluado en trabajo técnico.

Los procesos industriales se accionan aprovechando la situación de desequilibrio con el A.R. La máxima utilidad termodinámica de los R.N se obtiene al exhaustarlos reversiblemente hasta alcanzar un estado de equilibrio con el A.R.

La literatura técnica, demuestra sin lugar a dudas que existen algunas “escuelas” respecto al enfoque termoeconómico /2, 7, 9/, pero la idea central del análisis si es prácticamente común: Los sistemas técnicos (formados por subsistemas) se relacionan entre sí a través de flujos de masa, energía o información, los cuales intercambian, realizándose un determinado objetivo de producción, y ésta persigue un incremento de la utilidad económica. Por tanto: “El producto es la causa final y los recursos disponibles la causa material”.

El análisis exergético permite desglosar la irreversibilidad o ineficiencia de un sistema (complejo o no) por equipos o causas, así como calcular los costos exergéticos de sus flujos internos y productos finales, todo lo cual establece valoraciones precisas de la repercusión en el consumo de FUEL (recursos) por la mala explotación de cualquier equipo que compone la estructura del sistema. O sea, el análisis permite desglosar las irreversibilidades, el control de costos y la auditoria exergética.

Pero esto no es suficiente pues la evaluación final de cualquier proceso debe realizarse en términos monetarios, por lo que no sólo hay que incorporar el FUEL al costo de los flujos internos y de productos sino “gravar” éstos con todos y cada uno de los otros recursos utilizados (depreciación y gastos de explotación de los equipos, por ejemplo).

De modo que existen dos medios ambientales relacionados entre sí:

1) Físico: constituido por el A.R, recursos energéticos y materia prima.

2) Económico: caracterizado por el precio de mercado de los recursos energéticos y de la materia prima, así como las reglas utilizadas para contabilizar el costo de depreciación y mantenimiento de los equipos.

En el ambiente “físico” la variable relevante es el costo exergético, el cual dependerá de la estructura del sistema (relación funcional entre equipos y flujos) y de la calidad del funcionamiento (rendimiento exergético de los equipos).

En el ambiente “económico” hay que tener en cuenta que se introducen dos factores adicionales:

- a) Los costos (precios) de mercado de los recursos energéticos y materias primas no están necesariamente vinculados con sus respectivas exergías.
- b) Deben contabilizarse los costos de amortización y mantenimiento.

## Métodos utilizados y condiciones experimentales

Como bien fue explicado con anterioridad, el estudio termodinámico se concreta al generador de vapor GB-3, pero el mismo pudo ser aplicado a cualquiera de los tres debido a que bajo las mismas condiciones técnicas y de explotación, estos seguirán un patrón semejante de comportamiento.

El período comprendido entre diciembre de 2004 y 2007 se consideró apropiado para la evaluación de la GB-3, por mediar en el mismo la ejecución de una reparación capital encaminada a revitalizarlo, debido a las pésimas condiciones técnicas en las que se encontraba.

El procesamiento de los datos se realizó de forma rápida y precisa, haciendo empleo del Software “EXERGÓN” elaborado por el autor, que permitió realizar el análisis energético, exergético y termoeconómico de la instalación.

La metodología aplicada parte de un balance de masa, seguido de un balance energético que se desarrolla a través del método indirecto ó de pérdidas separadas, recogida en los textos siguientes: /3, 8/; los balances exergético y termoeconómico finales, fueron desarrollados por el método expuesto por los españoles Valero y Lozano, encontrados en las literaturas: /5, 6, 10/.

**Balance energético** (Este es el balance clásico, que siempre se realiza)

Rendimiento bruto:

$$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) \quad (1)$$

donde:

$q_2$  (Pérdida de calor con los gases de escape)

$q_3$  (Pérdida de calor por incombustión química)

$q_4$  (Pérdida de calor por incombustión mecánica)

$q_5$  (Pérdida de calor al medio exterior)

**Balance Exergético** (Este es el balance que se desea introducir)

El ambiente de referencia (A.R) [5] establecido para este análisis es:

$$T_o = 298 \text{ °K y } P_o = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$$

Rendimiento Exergético:

$$\eta_{exerg} = \frac{P}{F} \cdot 100\% \quad (2)$$

donde:

$$P = B_v - B_{aa} \quad (3)$$

$$F = B_c + B_a + B_{va} \quad (4)$$

siendo:

P (Producto deseado), en kcal/kg

F (Fuel), en kcal/kg

$B_v, B_{aa}, B_c, B_a$  y  $B_{va}$  (Exergías totales del vapor, el agua de alimentar, el combustible, el aire y el vapor de atomización), en kcal/kg

Destrucción de exergía interna:

$$D = F - P - L \quad (5)$$

donde:

$$L = B_{ge} \quad (6)$$

siendo:

L (Pérdidas exergéticas), en kcal/kg

$B_{ge}$  (Exergía total de los gases de escape), en kcal/kg

La exergía total relacionada con sustancias tales, como el agua y su vapor, son analizadas solamente determinando la componente física de su exergía

( $b_f$ ). Aquellas asociadas al fuel, al aire y a los gases de escape, se evalúan a través de las componentes física y química de sus exergías ( $b_f$  y  $b_q$ ).

$$bf = (h - h_o) - T_o \cdot (s - s_o) \quad (7)$$

donde:

$h$  y  $h_o$  (Entalpías de la sustancias en el estado considerado y en el ambiente de referencia, respectivamente)

$s$  y  $s_o$  (Entropías de la sustancia en el estado considerado y en el ambiente de referencia, respectivamente)

$$b_q = \Sigma (\mu_o - \mu^o) \text{ kJ/kg} \quad (8)$$

siendo:

$\mu_o$  (Potencial químico de la sustancia o sistema en el A.R, o sea, a  $P_o$  y  $T_o$ )

$\mu^o$  (Potencial químico de las sustancias de referencia en el estado muerto)

### Balance Termoeconómico

Costo exergético unitario:

El inverso de la eficiencia exergética real da por resultado el costo exergético unitario ( $k$ ). Este indicador refleja la cantidad de recursos invertidos ( $F$ ) para obtener la unidad de producto ( $P$ ). De ahí que:

$$k = \frac{F}{P} \geq 1$$

### Determinación de los costos termoeconómicos

Este va a estar formado por la suma del costo termoeconómico del flujo de FUEL (?FUEL) que es ingresa al hogar del generador de vapor, más el costo termoeconómico del flujo de agua de alimentar ( $\Pi_{AGUA}$ ) que ingresa al domo.

$$\Pi_{PRODUCTO} = \Pi_{FUEL} + \Pi_{AGUA} \text{ (\$MN/seg y \$CUC/seg)} \quad (9)$$

Una vez conocido el escenario económico existente y conscientes de que el costo termoeconómico (o exergoeconómico) no es el indicador clave para valorar el trabajo del sistema desde el punto de vista contable, se hace necesario formular uno que permita medir, en términos monetarios, que recursos se

han invertido por cada unidad de exergía. Ese es el costo exergoeconómico unitario.

El costo exergoeconómico unitario, denominado en otros países “factor de intensidad energética”, es el encargado de mostrar en dinero el uso de cada unidad de energía disponible que poseen los distintos flujos que atraviesan el sistema termodinámico.

El balance económico, al igual que el de masa y energía, es conservativo. El costo exergoeconómico unitario del producto ( $C'_{PRODUCTO}$ ) se obtiene de la suma entre los costos exergoeconómicos unitarios de los flujos de FUEL ( $C'_{FUEL}$ ) y de agua de alimentación, pero hay que tener presente que en el  $C'_{FUEL}$  están contenidos además, los costos de cada unidad de exergía que se esta destruyendo en el interior del equipo  $C'_{IRREV. INT.}$  y de la que se esta perdiendo con los gases de escape  $C'_{IRREV. EXT.}$

Cálculo del costo exergoeconómico unitario del flujo de producto:

Constituye la relación existente entre el costo termoeconómico y la exergía del flujo de Producto.

$$C'_{PRODUCTO} = \frac{\Pi_{PRODUCTO}}{10^{-4} \cdot B_{PRODUCTO}} \quad (10)$$

donde:

$\Pi_{PRODUCTO}$  (Costo termoeconómico del flujo de Producto), en (\$MN/seg y \$CUC/seg)

$B_{PRODUCTO}$  (Exergía del flujo de Producto), en kW

Cálculo del costo exergoeconómico unitario del flujo de FUEL:

Este representa el 100 % del dinero, que invertido en cada unidad de exergía del FUEL, entra en el generador de vapor.

$$C'_{FUEL} = \frac{\Pi_{FUEL}}{10^{-4} \cdot B_{FUEL}} \quad (11)$$

donde:

$\Pi_{FUEL}$  (Costo termoeconómico del flujo de FUEL), en (\$MN/seg y \$CUC/seg)

$B_{FUEL}$  (Exergía del flujo de FUEL), en kW

Cálculo del costo exergoeconómico unitario de las irreversibilidades internas:

Va a constituir el por ciento del costo exergoeconómico unitario del flujo de FUEL que es destruido en el interior del generador de vapor, debido a las irreversibilidades presentes durante la combustión y la transferencia de calor.

$$C'_{IRREV. INT.} = 0.01 \cdot D \cdot C'_{FUEL} \quad (\$MN/GJ \text{ y } \$CUC/GJ) \quad (12)$$

donde:

$C'_{FUEL}$  conocido, en (\$MN/GJ y \$CUC/GJ)

D (Destrucción de exergía interna), en %

Cálculo del costo exergoeconómico unitario de las irreversibilidades externas:

Va a representar el por ciento del costo exergoeconómico unitario del flujo de FUEL que es expulsado con los gases de escape fuera del equipo.

$$C'_{IRREV. EXT.} = 0,01 \cdot L \cdot C'_{FUEL} \quad (\$MN/GJ \text{ y } \$CUC/GJ) \quad (13)$$

donde:

$C'_{FUEL}$  conocido, en (\$MN/GJ y \$CUC/GJ)

L (Pérdidas exergéticas), en %

## Resultados y su discusión

De los resultados que aparecen en las tablas 2 y 3, desde el punto de vista de la primera y la segunda ley, se puede apreciar que:

- 1) El equipo evaluado logró en diciembre de 2007 entregar al agua y al vapor más del 80 % (80,34 %) de la energía que obtuvo de la combustión del fuel, es decir, casi 19 % más que en el 2004 (62,07 %), sin embargo, debido a la irreversibilidad del proceso de combustión y de la transferencia de calor al agua sólo el 26,16 % estuvo disponible para el vapor, lo que representa sólo un 5,71 % más que en el 2004 (20,45 %).
- 2) De acuerdo al balance térmico, las causas principales de las pérdidas en el 2004 fueron con el calor sensible de los gases de escape y por incombustión química (19,12 % y 14,47 % respectivamente), mientras que en el 2007 recayó sólo en los gases de escape con

13,40 %, sin embargo, el análisis exergético muestra que la disponibilidad de la energía que sale con los gases es muy baja en ambos períodos (5,76 % y 5,18 % respectivamente) respecto a la destrucción de exergía interna.

- 3) Lo más significativo del análisis, en ambos períodos, lo constituye el hecho de que, a pesar de que el mejoramiento de las condiciones técnicas y de

explotación del equipo permitió elevar su rendimiento exergético, la degradación de esa energía se mantuvo por encima del 68 %. Esto demuestra que la utilización de calor de alto potencial mediante la quema de combustible para su uso en procesos de bajo potencial, siempre será muy ineficiente y trae consigo la pérdida en valor de más del 50 % del combustible.

Tabla 2  
Resultados obtenidos en diciembre de 2004

Día	G <sub>v</sub> (Ton/h)	Balance energético				Balance exergético			
		$\eta_b$ (%)	q <sub>2</sub> (%)	q <sub>3</sub> (%)	q <sub>4</sub> (%)	q <sub>5</sub> (%)	$\eta_{exerg}$ (%)	L (%)	D (%)
1	9,50	61,82	19,22	15,33	0,9	2,73	19,99	5,73	74,28
2	12,10	61,22	18,77	15,04	0,9	4,07	19,95	6,17	73,88
3	10,00	64,49	17,62	12,92	0,9	4,07	21,28	5,80	72,92
4	9,80	65,87	16,49	14,01	0,9	2,73	21,62	5,65	72,73
5	10,20	62,24	17,46	15,33	0,9	4,07	20,67	5,00	74,33
6	11,50	60,64	19,35	15,04	0,9	4,07	19,90	5,57	74,53
7	10,80	61,46	17,83	15,75	0,9	4,07	20,36	5,58	74,06
8	10,30	60,48	19,15	15,40	0,9	4,07	20,05	5,52	74,43
9	8,30	60,52	20,23	15,62	0,9	2,73	19,99	5,92	74,09
10	8,10	62,51	19,46	14,40	0,9	2,73	20,86	5,55	73,59
11	8,00	62,22	19,50	14,64	0,9	2,73	20,57	5,31	74,12
12	4,40	60,59	20,53	15,25	0,9	2,73	19,67	6,47	73,86
13	4,30	60,91	20,73	14,74	0,9	2,73	19,90	6,71	73,39
14	7,60	61,02	20,08	15,27	0,9	2,73	19,98	5,67	74,35
15	8,80	64,50	19,74	12,13	0,9	2,73	21,22	5,65	73,13
16	10,20	64,48	19,69	10,86	0,9	4,07	21,48	5,96	72,56
17	13,00	63,13	18,97	12,93	0,9	4,07	20,97	5,91	73,12
18	15,60	61,34	19,39	15,51	0,9	2,86	20,32	5,95	73,73
19	12,30	61,30	18,84	14,90	0,9	4,07	20,22	5,48	74,30
20	10,60	62,52	19,24	13,27	0,9	4,07	20,55	5,54	73,91
21	11,40	60,25	19,22	15,56	0,9	4,07	19,80	5,76	74,44
Prom.	9,85	62,07	19,12	14,47	0,90	3,44	20,45	5,76	73,80

Tabla 3  
Resultados obtenidos en diciembre de 2007

Día	G <sub>v</sub> (Ton/h)	Balance energético				Balance exergético			
		η <sub>b</sub> (%)	q <sub>2</sub> (%)	q <sub>3</sub> (%)	q <sub>4</sub> (%)	q <sub>5</sub> (%)	η <sub>exerg</sub> (%)	L (%)	D (%)
13	16,20	80,60	14,33	1,31	0,9	2,86	25,71	5,67	68,62
14	14,80	80,06	13,76	1,31	0,8	4,07	25,39	5,23	69,38
15	13,30	80,34	13,73	1,06	0,8	4,07	25,31	5,25	69,44
16	12,70	80,10	13,73	1,21	0,9	4,07	25,65	5,21	69,14
17	11,90	80,84	13,03	1,27	0,8	4,07	26,20	5,10	68,70
18	13,60	79,14	14,69	1,21	0,9	4,07	26,05	5,74	68,21
19	14,10	79,41	14,23	1,39	0,9	4,07	25,76	5,72	68,52
20	13,60	80,04	13,59	1,40	0,9	4,07	25,40	5,32	69,28
21	12,30	79,51	14,17	1,35	0,9	4,07	25,83	5,43	68,74
22	12,30	80,00	13,75	1,27	0,9	4,07	26,21	5,32	68,47
23	13,60	80,20	13,72	1,11	0,9	4,07	26,42	5,11	68,47
24	16,00	82,18	12,75	1,41	0,8	2,86	26,63	5,10	68,27
25	15,10	81,24	13,41	1,69	0,8	2,86	26,70	5,19	68,11
26	10,30	80,94	12,64	1,45	0,9	4,07	26,71	4,88	68,41
27	12,10	80,47	12,91	1,64	0,9	4,07	26,39	4,86	68,75
28	13,60	81,15	12,29	1,59	0,9	4,07	26,78	4,75	68,47
29	13,60	80,49	13,14	1,40	0,9	4,07	26,56	5,00	68,44
30	13,60	80,30	12,66	2,08	0,9	4,07	26,50	4,86	68,64
31	13,60	81,13	12,08	1,83	0,9	4,07	26,77	4,74	68,49
Prom.	13,49	80,43	13,40	1,42	0,87	3,88	26,16	5,18	68,66

Del balance termoeconómico efectuado se tiene que:

- 1) El costo exergético unitario (k) del equipo disminuyó como promedio 1,06, según se muestra en

la tabla 4, lo cual si bien pudiera parecer bajo, es de extraordinaria importancia debido al ahorro de recursos disponibles que dejó de consumir físicamente el sistema durante su operación diaria.

Tabla 4  
Valor del costo exergético unitario de acuerdo  
a la producción de vapor

Día	Diciembre de 2004		Diciembre de 2007	
	G <sub>v</sub> (Ton/h)	k	G <sub>v</sub> (Ton/h)	k
1	9,50	5,00		
2	12,10	5,01		
3	10,00	4,70		
4	9,80	4,63		
5	10,20	4,84		
6	11,50	5,03		
7	10,80	4,91		
8	10,30	4,99		
9	8,30	5,00		
10	8,10	4,79		
11	8,00	4,86		
12	4,40	5,08		
13	4,30	5,03	16,20	3,89
14	7,60	5,01	14,80	3,94
15	8,80	4,71	13,30	3,95
16	10,20	4,66	12,70	3,90
17	13,00	4,77	11,90	3,82
18	15,60	4,92	13,60	3,84
19	12,30	4,95	14,10	3,88
20	10,60	4,87	13,60	3,94
21	11,40	5,05	12,30	3,87
22			12,30	3,82
23			13,60	3,79
24			16,00	3,76
25			15,10	3,75
26			10,30	3,74
27			12,10	3,79
28			13,60	3,73
29			13,60	3,77
30			13,60	3,77
31			13,60	3,74
Prom.	9,85	4,88	13,49	3,82

Aunque este comportamiento, de k, es prueba más que suficiente del mejor empleo de los recursos en el período correspondiente a diciembre de 2007, la práctica frecuente de esta herramienta se muestra más eficaz si se cuantifica y compara su magnitud para obtener una misma producción. En las tablas 5 - 9, se

observa perfectamente lo inequívoco de esta afirmación.

Téngase presente, que el valor de referencia establecido en cada tabla para evaluar el despilfarró, se refiere a la mejor condición de explotación obtenida entre los días del período o de los períodos evaluados, de acuerdo al consumo de FUEL.



Tabla 5  
Comportamiento de (k) para una producción de 10,20 ton/h

Fecha	16/12/04	05/12/04
k	4,66	4,84
FUEL (kW)	11218,56	11 743,60
D (kW)	8139,98	8 728,67
Despilfarro (kW)	(Referencia)	525,04

Tabla 6  
Comportamiento de (k) para una producción de 10,30 ton/h

Fecha	26/12/07	08/12/04
k	3,74	4,99
FUEL (kW)	9 087,91	12 322,37
D (kW)	6 217,06	9 171,39
Despilfarro (kW)	(Referencia)	3 234,46

Tabla 7  
Comportamiento de (k) para una producción de 12,10 ton/h

Fecha	27/12/07	02/12/04
k	3,79	5,01
FUEL (kW)	10 791,78	14 453,77
D (kW)	7 419,86	10 678,84
Despilfarro (kW)	(Referencia)	3 661,99

Tabla 8  
Comportamiento de (k) para una producción de 12,30 ton/h

Fecha	22/12/07	21/12/07	19/12/04
k	3,82	3,87	4,95
FUEL (kW)	10 937,99	11 111,12	14 300,52
D (kW)	7 489,54	7 637,69	10 625,82
Despilfarro (kW)	(Referencia)	173,13	3 362,53

Tabla 9  
Comportamiento de (k) para una producción de 13,60 ton/h

Fecha	28/12/07	31/12/07	29/12/07	30/12/07	23/12/07	18/12/07	20/12/07
k	3,73	3,74	3,77	3,77	3,79	3,84	3,94
FUEL (kW)	11 967,56	11 969,58	12 064,33	12 093,89	12 155,85	12 264,38	12 502,07
D (kW)	8 194,20	8 198,29	8 256,17	8 300,98	8 323,55	8 365,02	8 661,80
Despilfarro (kW)	(Refer,)	2,02	96,77	126,33	188,29	296,82	534,51

Se puede apreciar que la magnitud del ahorro alcanzado es superior, para días con una producción similar entre ambos períodos, donde se aprecia que:

- a) Las producciones de (10,30, 12,10 y 12,30) ton/h se logran obtener en diciembre de 2007 empleando respectivamente (3 234,46, 3 661,99 y 3 362,53) kW de exergía menos, con respecto a diciembre de 2004.
  - b) Esas mismas producciones se logran obtener en Diciembre de 2007 destruyendo respectivamente (2 954,33, 3 258,98 y 3 136,28) kW menos de exergía, con respecto a diciembre de 2004.
- 2) A pesar de poseer en el 2007 un ambiente económico no muy favorable, incluso caracterizado por un aumento en el precio del combustible que se quema de CUC 17 cada metro cúbico, los costos del agua de alimentación empleada y del vapor saturado producido disminuyeron por tonelada:
- a) La tonelada de agua de alimentación consumida costaba 13,38 MN y 1,51 CUC en el 2004, pero para el 2007 se encontraba en 8,74 MN y 0,72 CUC. Diferencia por tonelada: 4,64 MN y 0,79 CUC.
  - b) La tonelada de vapor generado era obtenida a 41,18 MN y 28,28 CUC en el 2004, pero para el 2007 se encontraba a 22,41 MN y 16,11 CUC. Diferencia por tonelada: 18,77 MN y 12.17 CUC
  - 3) Se demostró, durante la comparación exergoeconómica para una misma producción entre períodos, que a pesar de que el ambiente económico provoca un ligero encarecimiento de los costos monetarios de la unidad de exergía del flujo de FUEL para el 2007, el ambiente físico logra revertir este efecto originando un ahorro más significativo de los costos exergoeconómicos unitarios del producto (tablas 10 y 11).

Tabla 10  
Costo exergoeconómico unitario (C') de los flujos en diciembre de 2004

Día	Exergía (FUEL)	C (FUEL)		Exergía (producto)	C (Producto)		Destrucción de exergía	C (Irreversibilidades internas)	
	(kW)	\$MN/GJ	\$CUC/GJ	(kW)	\$MN/GJ	\$CUC/GJ		(kW)	\$MN/GJ
1	11 383,67	6,41	6,25	2 276,07	48,06	33,23	8 455,63	8,63	8,42
2	14 453,77	5,05	5,78	2 883,68	37,98	30,50	10 678,84	6,83	7,82
3	11 091,49	6,58	6,38	2 360,46	46,22	32,28	8 087,92	9,02	8,74
4	10 663,69	6,84	6,48	2 305,87	47,29	32,32	7 755,81	9,41	8,91
5	11 743,60	6,21	6,07	2 427,11	45,01	31,59	8 728,67	8,36	8,16
6	13 785,83	5,29	5,71	2 743,32	39,39	30,62	10 274,29	7,10	7,66
7	12 564,46	5,81	6,00	2 558,60	42,73	31,42	9 304,85	7,84	8,10
8	12 322,37	5,92	5,97	2 470,52	44,31	31,31	9 171,39	7,95	8,02
9	9 864,33	7,39	6,43	1 971,91	55,55	33,93	7 308,94	9,98	8,68
10	9 234,41	7,90	6,82	1 926,60	55,67	35,11	6 795,38	10,73	9,27
11	9 236,58	7,90	6,67	1 899,98	57,42	35,02	6 846,42	10,65	9,00
12	5 179,74	14,08	8,85	1 018,95	106,68	48,30	3 825,75	19,07	11,98
13	4 982,41	14,64	9,24	991,45	108,48	49,70	3 656,41	19,95	12,59
14	8 930,38	8,17	6,83	1 784,41	59,69	36,15	6 639,49	10,99	9,19
15	9 782,51	7,46	6,58	2 076,09	51,85	32,59	7 153,63	10,20	9,00
16	11 218,56	6,50	6,24	2 409,40	44,58	30,34	8 139,98	8,96	8,60
17	14 650,45	4,98	5,60	3 071,45	35,15	27,78	10 712,96	6,81	7,66
18	18 167,41	4,02	5,29	3 691,21	29,47	26,92	13 394,27	5,45	7,17
19	14 300,52	5,10	5,66	2 891,19	37,82	29,35	10 625,82	6,86	7,62
20	12 126,46	6,02	5,94	2 492,49	43,96	30,21	8 962,08	8,14	8,03
21	13 504,01	5,40	6,02	2 674,19	41,02	31,69	10 052,04	7,26	8,09
Sum.		147,65	134,80		1 078,34	700,38		200,18	182,71
Prom.		7,03	6,42		51,35	33,35		9,53	8,70

Tabla 11  
Costo exergoeconómico unitario (C') de los flujos en diciembre de 2007

Día	Exergía (FUEL)	C (FUEL)		Exergía (Producto)	C (Producto)		Destrucción de exergía	C (Irreversibilidades internas)	
	(kW)	\$MN/GJ	\$CUC/GJ	(kW)	\$MN/GJ	\$CUC/GJ	(kW)	\$MN/GJ	\$CUC/GJ
13	14 509,88	4,42	5,48	3 729,95	27,09	22,06	9 956,93	6,44	7,98
14	13 396,76	4,79	5,54	3 402,19	29,78	22,90	9 294,47	6,90	7,98
15	12 093,38	5,30	5,68	3 061,21	32,98	23,36	8 396,92	7,64	8,19
16	11 477,41	5,59	5,77	2 944,14	34,41	24,15	7 935,28	8,08	8,34
17	10 575,10	6,06	5,91	2 771,00	36,44	23,65	7 264,76	8,83	8,61
18	12 264,38	5,23	5,69	3 195,45	31,60	22,87	8 365,02	7,66	8,34
19	12 887,34	4,98	5,57	3 319,68	30,38	22,38	8 830,07	7,26	8,13
20	12 502,07	5,13	5,62	3 175,91	31,84	23,00	8 661,80	7,40	8,11
21	11 111,12	5,77	5,93	2 870,09	35,18	24,16	7 637,69	8,39	8,62
22	10 937,99	5,86	5,97	2 866,32	35,22	23,76	7 489,54	8,56	8,73
23	12 155,85	5,27	5,80	3 210,82	31,42	22,81	8 323,55	7,70	8,47
24	14 019,79	4,57	5,57	3 732,96	27,06	21,68	9 572,19	6,70	8,16
25	13 359,93	4,80	5,65	3 567,14	28,37	22,10	9 098,91	7,05	8,29
26	9 087,91	7,05	6,31	2 427,06	41,50	24,77	6 217,06	10,31	9,22
27	10 791,78	5,94	5,99	2 847,48	35,40	23,64	7 419,86	8,64	8,70
28	11 967,56	5,36	5,82	3 204,56	31,50	22,63	8 194,20	7,82	8,50
29	12 064,33	5,31	5,80	3 204,53	31,52	22,71	8 256,17	7,77	8,48
30	12 093,89	5,30	5,80	3 204,48	31,49	22,75	8 300,98	7,72	8,45
31	11 969,58	5,36	5,84	3 204,56	30,54	22,63	8 198,29	7,82	8,53
Sum.		102,09	109,73		613,72	438,01		148,70	159,83
Prom.		5,37	5,78		32,30	23,05		7,83	8,41

Tabla 12  
Tendencia de los costos exergoeconómicos unitarios de los flujos

Producciones similares entre periodos	Diferencia (2007 - 2004)			
	C' FUEL (\$/GJ)		C' PRODUCTO (\$/GJ)	
	\$MN	\$CUC	\$MN	\$CUC
10,20 ton/h	-1,13	-0,34	2,81	6,54
12,10 ton/h	-0,89	-0,21	2,58	6,86
12,30 ton/h	-0,76	-0,31	2,60	5,59

## Conclusiones

Basando nuestro análisis en los resultados obtenidos, estamos en condiciones de afirmar, que es posible mediante la aplicación del cálculo termoeconómico, conocer los índices exergéticos del generador de vapor GB-3 de la refinería de petróleo "Hermanos Díaz" y, en función de estos, lograr evaluar los costos de operación de cada uno de los flujos tecnológicos.

El problema fundamental de los costos es el siguiente: dado un sistema cuyos límites han sido definidos y un nivel de agregación que específica

las áreas cuyo ambiente económico influye sobre este, obtener los costos exergéticos de los flujos físicos que interrelacionan esa estructura es posible, siempre y cuando se utilicen tres fuentes de información:

- 1) Los valores de las exergías de los flujos de entrada al sistema (el FUEL).
- 2) La aplicación de las reglas de asignación de costos.
- 3) La aplicación del balance de costos, el cual es conservativo como lo son el de masa y energía.

Se ha comparado la calidad del proceso de generación de vapor, para dos períodos diferentes de explotación de la máquina.

1) Luego del balance de masa y de energía se logra conocer que:

Antes del mantenimiento capital: Sólo el 62,07 % de la energía proveniente del fuel era entregada al agua y al vapor, siendo las pérdidas principales con el calor sensible de los gases de escape (19,12 %) y por incombustión química (14,47 %).

Después del mantenimiento capital: El 80,34 % de la energía proveniente del fuel es aprovechada por la sustancia de trabajo, mientras que las pérdidas por incombustión química disminuyen apreciablemente a 1,47 % y las registradas con los gases de escape a 13,40 %.

2) El balance exergético permite valorar la disponibilidad real de la energía e identificar las irreversibilidades presentes:

Antes del mantenimiento capital: Al Producto sólo llegaba el 20,45 % de la exergía presente en el combustible, siendo la elevada destrucción de exergía interna (73,80 %) la principal responsable y no las bajas pérdidas exergéticas con los gases de escape (5,76 %).

Después del mantenimiento capital: El 26,16 % de la exergía del fuel era absorbida por la sustancia de trabajo, la destrucción de exergía interna disminuyó a 68,66 % y continuaban las pérdidas exergéticas con los gases de escape sin experimentar cambio significativo (5,18 %).

3) La asignación de costos a la exergía obtenida, se logra luego de la caracterización de los ambientes involucrados:

**Ambiente físico:** En el 2004 se producía una unidad de producto con 1,06 veces más recursos que los empleados en el 2007 (3,82). Esto es importante debido a que el uso de la energía disponible es bajo y existe un mayor potencial económico recuperable.

**Ambiente económico:** Aunque no fue muy favorable en el 2007, debido al aumento de los precios de los recursos necesarios, se logran

disminuir los costos por t del agua de alimentación y del vapor en 4,64 MN y 0,79 CUC y 18,77 MN y 12,17 CU respectivamente. Así como también, se obtiene un significativo ahorro por cada unidad de exergía del producto (\$/GJ), con respecto al 2004.

- Para una producción de 10,20 ton/h, se ahorran (2,81 MN y 6,54 CUC)
- Para una producción de 12,10 ton/h, se ahorran (2,58 MN y 6,86 CUC)
- Para una producción de 12,30 ton/h, se ahorran (2,60 MN y 5,59 CUC)

## Bibliografía

1. Campos Avella, J. C.; Santos Macias, L.; Cruz Torres, E. Calidad de la Energía. Métodos avanzados de análisis de sistemas energéticos para programas de control y mejoramiento de la eficiencia de procesos industriales, Universidad de Cienfuegos, ISBN 959-257-019-1, 1998, Cuba.
2. Castellanos Estupiñán, J. E. Balances de masa y energía. Métodos clásicos y técnicas modernas, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, UCLV.
3. Colectivo de autores. Generadores de vapor. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1982: pág. 52-117.
4. Comisión Nacional de Energía (CNE). Sistemas de Generación y Distribución de vapor: Cálculos Rápidos (I). 1 ed. La Habana. S/E: pág. 1-96.
5. Folleto de Termoeconomía de la asignatura: Análisis termodinámico de sistemas energéticos. Maestría de Eficiencia Energética. Centro de Estudios de Eficiencia Energética. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2001.
6. Lozano, M. A.; Valero, A. Determinación de exergía para sustancias de interés industrial. Revista Ingeniería Química, Zaragoza, España, 1986: pág. 119-128.
7. Lozano, M. A.; Valero, A. Theory of the exergy cost. Energy, Vol. 18, No. 9, 1993.
8. Pérez Garay, L. Generadores de vapor. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1986: pág. 38, 88-100.
9. Valero, A.; Lozano, M. A.; Muñoz, M. A general theory of exergy saving. Part I: On the exergy cost. Part II: On the thermoeconomic cost. Part III: Energy saving and thermoeconomics. Computed-Aided engineering and energy systems. AES, Vol. 2-3 (ASME Book H0341C), 1986.
10. Valero, A.; Lozano, M. A. Curso de Termoeconomía. Centro Politécnico Superior de Ingenieros. Universidad de Zaragoza, España, 1994.