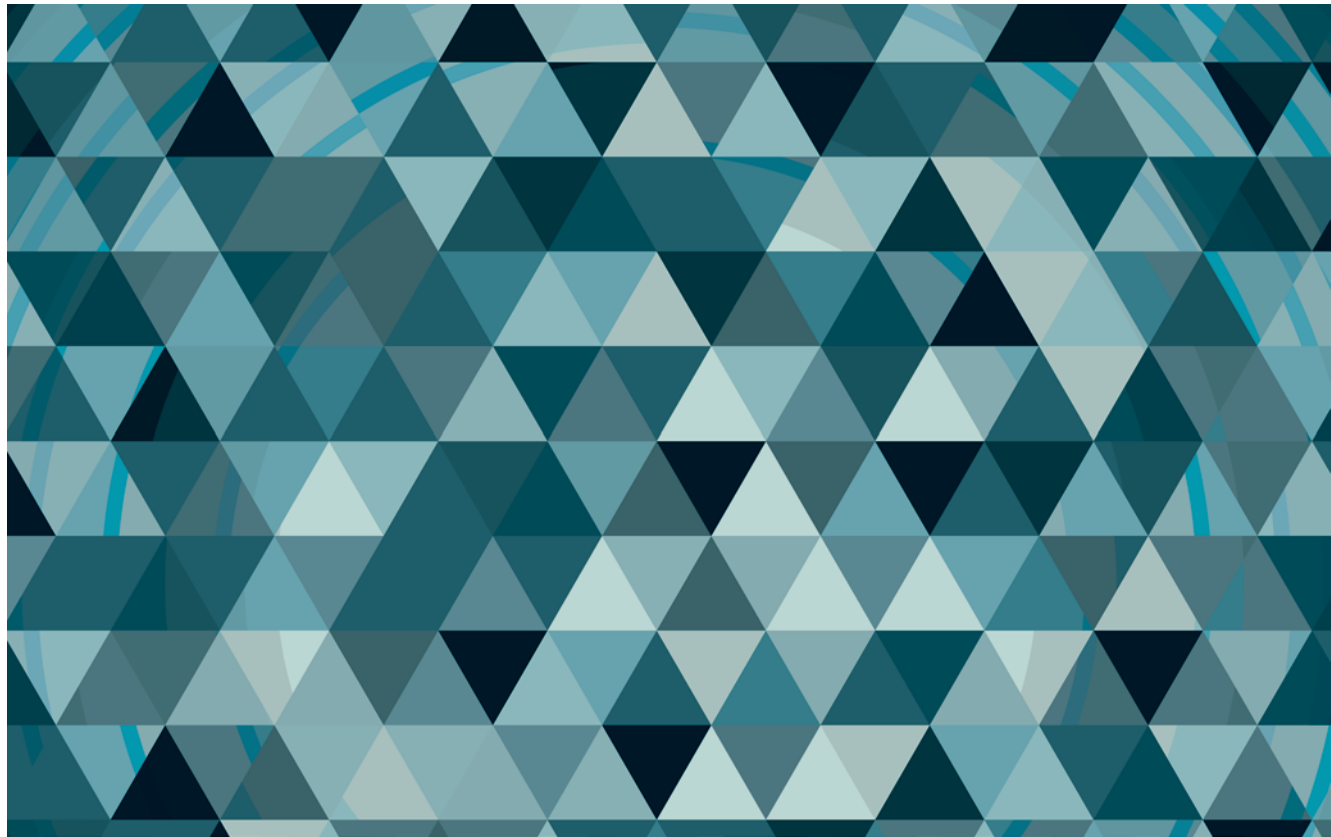


4.



*La Calidad Académica,
un Compromiso Institucional*



La termoeconomía como alternativa para mejorar la competitividad industrial

Jorge René Silva Larrotta

Silva L., Jorge R. (2014).
La termoeconomía como
alternativa para mejorar
la competitividad
industrial.
Criterio Libre, 12 (21),
97-116
ISSN 1900-0642

LA TERMOECONOMÍA COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR LA COMPETITIVIDAD INDUSTRIAL¹

THERMOECONOMICS AS AN ALTERNATIVE TO IMPROVE THE INDUSTRIAL COMPETITIVENESS

A TERMOECONOMIA COMO UMA ALTERNATIVA PARA MELHORAR A COMPETITIVIDADE INDUSTRIAL

LA TERMOECONOMIE COMME ALTERNATIVE POUR AMÉLIORER LA COMPÉTITIVITÉ INDUSTRIELLE

JORGE RENÉ SILVA LARROTTA²

Fecha de Recepción: 14 de agosto de 2014
Fecha de Aceptación: 30 de octubre de 2014

RESUMEN

El artículo presenta una breve descripción del término *termoeconomía* con el propósito de justificar su aplicación en los sectores industriales colombianos a partir de la formación académica en el área en concordancia con las políticas energéticas de Estado. Para entender su aplicación se realiza el desarrollo de una evaluación exérgica a un proceso industrial de secado de subproductos de plantas de beneficio de aves a fin de establecer destrucción de exérgica, costos exérgicos y valoración de combustibles alternativos.

PALABRAS CLAVE:

Costos exérgicos, entropía, exérgica, termoeconomía.

CLASIFICACIÓN JEL:

C69, L66, M11, Q49.

¹ El artículo es producto del desarrollo de un anteproyecto en el área termoeconómica para el Programa de Maestría en Administración de la Universidad Nacional de Colombia, con el propósito de optar al título de magíster en Administración y de promover el análisis exérgico en el país.

² Ingeniero mecánico. Magíster en Ingeniería Mecánica. Estudiante de maestría en Administración, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. jsilval@unal.edu.co

ABSTRACT

The paper presents a brief description of *thermoeconomic* term for the justification of its application in industrial Colombians sectors from academic training in accordance with state energy policies. For understand its application was made the development of one exergetic evaluation to industrial process of drying of subproducts of sacrifice plants of birds for establishing exergy destruction, exergy costs and valuations of alternative fuels.

Key words: entropy, exergy, exergy costs, thermoeconomic.

JEL Classification: C69, L66, M11, Q49.

RESUMO

O artigo apresenta uma breve descrição do vocábo *termoeconomia* para justificar a sua aplicação no sector industrial colombiano desde a formação acadêmica na área de acordo com as políticas de energia do estado. Para entender a sua aplicação desenvolve-se uma avaliação exergetica a um processo industrial de secagem dos subprodutos de plantas de benefício das aves a fim de estabelecer a destruição de exergia, custos exergeticos e avaliação de combustíveis alternativos.

Palavras-chave: custos exergeticos, entropía, exergia, termoeconomia.

Classificação JEL: C69, L66, M11, Q49.

RÉSUMÉ

L'article présente une brève description du terme *termoeconomie* avec le propos de justifier son application dans les secteurs industriels colombiens à partir de la formation académique dans l'aire dans une concordance avec les politiques énergétiques d'État. Pour entendre son application le développement d'une évaluation exérgétique est réalisé à un processus industriel de séché des sous-produits de plantes de bénéfice d'oiseaux pour établir destruction d'exergie, des prix exérgétiques et une évaluation de combustibles alternatifs.

Mots clés: entropie, exergie, prix exérgétiques, termoeconomie.

Classification JEL: C69, L66, M11, Q49.

INTRODUCCIÓN

La energía se constituye en el recurso más importante para la generación y el sostenimiento de los procesos desarrollados por el hombre y la naturaleza. Su empleo directo y transformación en trabajo y calor entregan el impulso necesario para crear la vida, la naturaleza misma, los productos artificiales y todo lo material de lo que se constituye el planeta.

Desde la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII, con el desarrollo de la industria textil, la industria del hierro y la máquina de vapor, el hombre observó que había una fuerte dependencia entre el desarrollo industrial y el recurso energético, sin que a la fecha dicha postura haya cambiado.

Por el contrario, es el único recurso insustituible de cualquier proceso productivo y puede llegar a afectar la competitividad industrial de un país, medida por diferentes factores de carácter político, económico, social, ambiental, gubernamental, etc.

Las fuentes energéticas primarias, es decir, las disponibles en la naturaleza como los combustibles fósiles, energía eólica, energía solar, energía hidráulica, etc., en principio se considerarían inagotables, exceptuando los combustibles fósiles que son limitados a las reservas mundiales. Pese a ello persiste la fuerte dependencia por el carbón, el petróleo y el gas natural, constituyéndose en 85% del consumo mundial (Administration, 2014). Ello conduce a la reflexión del buen uso de la energía con propósitos de ahorro, preservación del medio ambiente, procesos eficientes y elección adecuada de fuentes energéticas, que solo puede lograrse con la integración de varias disciplinas o áreas de conocimiento.

El presente trabajo propone la implementación en el país de la termoeconomía, disciplina que combina la termodinámica clásica con los fundamentos de costos a fin de promover la gestión energética integral desde el momento mismo de la concepción de un nuevo proyecto hasta su ejecución y puesta en marcha.

Dicha propuesta se acompaña de un ejemplo aplicado en un proceso de producción en una empresa de subproductos de plantas de beneficio de aves ubicada en la Sabana de Bogotá y cuyas políticas de desarrollo se enmarcan dentro de la conservación ambiental y la gestión energética, lo que a su vez ha permitido el trabajo conjunto con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia en temas de Uso Racional de Energía (URE) y gestión desde el año 2012.

1. CONTEXTO INTERNACIONAL Y NACIONAL

El consumo mundial de energía permanecerá en crecimiento por varios factores, principalmente

Desde la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII, con el desarrollo de la industria textil, la industria del hierro y la máquina de vapor, el hombre observó que había una fuerte dependencia entre el desarrollo industrial y el recurso energético, sin que a la fecha dicha postura haya cambiado. Por el contrario, es el único recurso insustituible de cualquier proceso productivo y puede llegar a afectar la competitividad industrial de un país, medida por diferentes factores de carácter político, económico, social, ambiental, gubernamental, etc.

por el incremento del producto interno bruto y de la población, como lo señala el estudio **"Perspectivas sobre el suministro y la demanda internacional de energía hasta el 2030" (Exxon Mobil, 2010)**, que estima una demanda mundial de energía para el año 2030 en 35% superior a la del año 2005 ($1,5 \times 10^{13}$ W), considerando un incremento promedio

anual del PIB de 2,7% y de la población de 1.2%. Otro referente importante es el informe mundial de energía elaborado por la Energy Information Administration (EIA) del gobierno de Estados Unidos en el año 2007, que plantea un incremento de 57% en el consumo total de energía entre 2004 y 2030, presentando la siguiente proyección:

Cuadro 1. Proyección del consumo mundial de energía en cuatrillones de unidades térmicas británicas (BTU).

2004	2010	2015	2020	2025	2030
447	511	559	607	654	702

Fuente: Internacional Outlook 2005 / International Energy Outlook 2007. Energy Information Administration EIA (2007).

Aunque los estudios difieren entre agencias, institutos, países y compañías, lo que tienen en común es el señalamiento en el incremento mundial de consumo de energía en detrimento de las reservas mundiales de las fuentes primarias de energía no renovables (petróleo, gas natural y carbón) y de la conservación del medio ambiente.

Colombia no es ajena a la situación energética mundial; entre el año 2011 y 2020 la Estatal Petrolera Colombiana ECOPELROL invertirá 80.000 millones de dólares en la explotación de crudo y gas (*Portafolio*, 2011), que deberían representar una producción de 1,2 millones de barriles de petróleo equivalente por día en el año 2020, según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), de los cuales 57% se utilizaría para exportación, con lo que el país tendría un favorable escenario de autosuficiencia energética que, de no presentarse, lo convertiría en un país dependiente por completo del mercado internacional de hidrocarburos.

Paralelamente, el actual gobierno promulgó en su Plan Nacional de Desarrollo las cinco estrategias (vivienda, minería, infraestructura, agro

e innovación), denominadas "locomotoras", que a mediano y largo plazos impactarán la demanda de energía por consumo directo o por la creación de las condiciones propicias para incrementar la productividad industrial del país, a propósito de la apertura de la nación a los tratados de libre comercio.

En el área normativa, desde el año 2001 la nación promulgó la ley 697 que reglamentó el fomento del Uso Racional y Eficiente de la Energía URE en conjunto con las energías alternativas. Posteriormente en el año 2003 expidió el Decreto 3683 que en su artículo 5 constituyó la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía (CIURE); y recientemente, el 1º. de junio de 2010 el Ministerio de Minas y Energía firmó la Resolución 180919 PROURE (Plan de Acción Indicativo 2010-2015 Pro Uso Racional de Energía), a fin de promover el uso eficiente de la canasta energética nacional y disminuir globalmente, al año 2015, el consumo final de energía en 4.06%, entre electricidad (2,26%) y otros energéticos (1,8%), sin que hasta el momento se hayan reportado resultados favorables de dichas políticas.

2. TERMOECONOMÍA

Particularmente las proyecciones de ahorro parten de un potencial energético calculable con cierto grado de exactitud para la energía eléctrica pensando en la sustitución de tecnologías. En los denominados "otros energéticos", la estimación no es tan simple porque agrupa cualquier proceso térmico de intercambio de calor y trabajo que por lo general presentan potenciales de ahorro muy superiores.

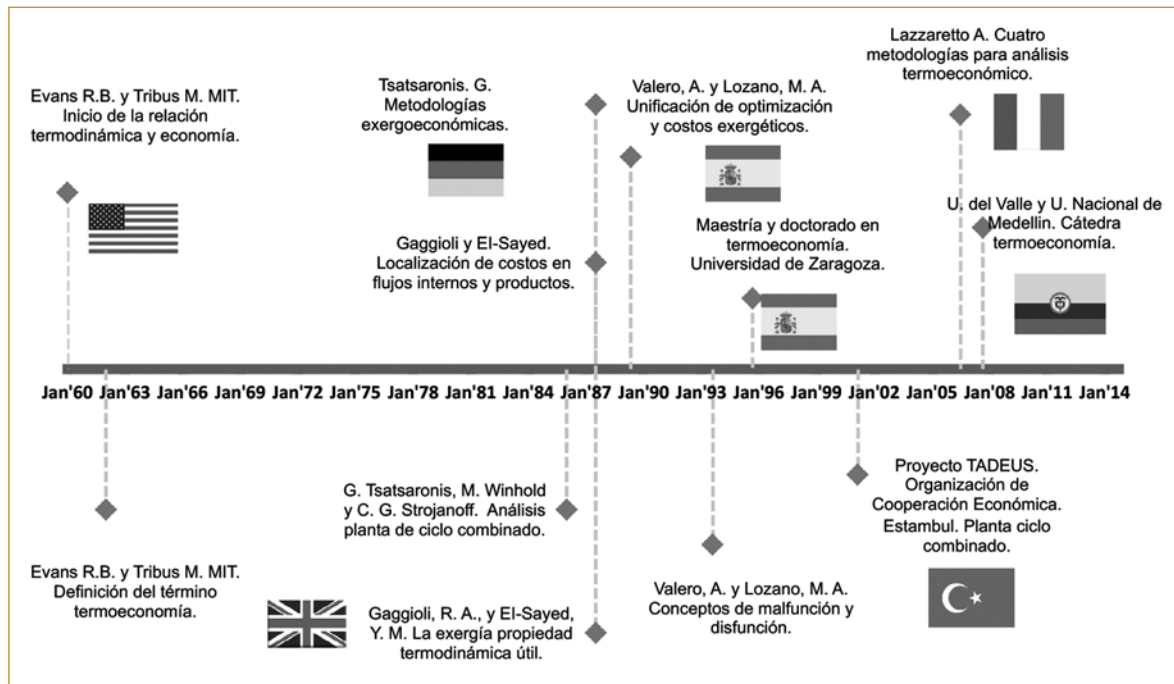
Por tanto, las oportunidades para implementar en el área térmica proyectos de administración de energía son sobresalientes con la inclusión de análisis de costos energéticos durante las etapas de diseño, implementación y puesta en marcha de procesos industriales. Para ello se requiere introducir el término *termoeconomía*, cuyo origen fue el resultado de las nuevas formulaciones de la segunda ley de la termodinámica y el análisis exergético para evaluar el máximo trabajo teórico que puede realizar un sistema combinado (sistema cerrado y ambiente), cuando el sistema cerrado evoluciona hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente.

Lo que significa en términos prácticos que la exergía o el máximo trabajo se puede conseguir cuando la materia alcanza las condiciones de presión y temperatura con el ambiente de referencia, es decir, presión (P_0) y temperatura (T_0) ambiente, situación que en la práctica no ocurre porque el trabajo se limita por unas condiciones especiales de operación definidas por el medio utilizado para producirlo y la existencia de irreversibilidades. Por tanto, siempre hay destrucción de exergía y podría llegar a destruirse completamente si un sistema pasa de una condición inicial hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente sin que exista un dispositivo o un medio para lograr algún trabajo.

Un ejemplo simple correspondería a la quema de un combustible fósil en un horno para un proceso industrial de calentamiento de materia prima. En tal caso se alcanzaría cierta temperatura de operación y los gases de combustión saldrían por encima de la temperatura ambiente, por lo cual no serían aprovechados en su totalidad. Y aunque podrían instalarse uno o varios dispositivos posteriores para tratar de recuperar al máximo dicha energía, siempre se presentarían disipaciones y pérdidas que no harían posible la extracción de la totalidad del trabajo útil del combustible, lo que se explica por la teoría de la irreversibilidad que básicamente considera que en la naturaleza ningún proceso real puede revertirse sin la adición de una nueva fracción de energía. Además en dicho ejemplo habría que preguntarse si el combustible utilizado es el más adecuado, no en términos de costo, ni en términos de abundancia, sino en términos de trabajo máximo teórico; **¿cuál sería el más adecuado para aportar el mayor trabajo de acuerdo con el proceso mismo?** ... una razón más para aplicar la termoeconomía.

La primera institución que introdujo el término fue la Escuela de Ingeniería del Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1962, por R.B. Evans y M. Tribus, a través de dos artículos publicados en años anteriores, relacionados con la disponibilidad de la termodinámica como recurso para la optimización de sistemas con la interacción del entorno. Sin embargo, solo a finales de los años ochenta diferentes investigadores (G. Tsatsaronis, M. Winhold, C. G. Strojjanoff, R. A. Gaggioli, A. Valero, M. A. Lozano, y M. Muñoz), demostraron su utilidad a escala industrial por la reducción en el consumo térmico de energía en casos críticos y especiales. En la siguiente figura se presenta el desarrollo que ha tenido la termoeconomía desde su origen.

Figura 1. Evolución de la termoeconomía.



Fuente: Elaboración propia, previa revisión bibliográfica.

Actualmente la termoeconomía no solo obedece a la definición misma dada en 1987 por el profesor Antonio Valero Capilla, de la Universidad de Zaragoza, como la disciplina que estudia la conexión entre la termodinámica y la economía para fundamentar las bases teóricas del ahorro de energía, con criterios generales que permitan evaluar la eficiencia y el costo de los productos en sistemas con un consumo intensivo de energía, sino para conseguir la integración más racional, económica y menos degradante para el medio ambiente de inmensos complejos energéticos; desarrollar el álgebra simbólica para el estudio de los sistemas térmicos; y la comprensión de la organización de sistemas biológicos y sociales porque permite el estudio de la estructura de interacciones entre los subsistemas que los componen (Torres, 2000, p. 1).

En Colombia la termoeconomía se utiliza recientemente en la academia a través de la asignatura denominada con el mismo nombre en facultades de ingeniería de la Universidad del Valle

(2007) y la Universidad Nacional de Medellín (2007) y Bogotá (2012). El conocimiento de los ingenieros y de los administradores colombianos en sus fundamentos, metodología, campos de aplicación e importancia para la toma de decisiones y la administración de los recursos es deficiente, evidenciado por su ausencia en planes de estudio de pregrado y posgrado en las áreas de administración, economía, ingenierías, etc., al igual que en proyectos de investigación aplicada. A nivel productivo en procesos licitatorios públicos y privados de carácter energético no se inserta la eficiencia exergética (derivada de un análisis termoeconómico) como criterio de evaluación, para la obtención de resultados con mayor significancia al valorar la calidad de la energía.

Su implementación en la industria nacional representaría un análisis alternativo que consideraría el consumo de energía desde los fundamentos de la termodinámica y la economía, representando un avance en la academia y en la administración

óptima del recurso energético, asociado a sus principales características:

1. Asignar costos racionalmente al medir el verdadero valor termodinámico del trabajo, el calor y otras interacciones entre un sistema y su entorno, así como el efecto de las irreversibilidades (pérdidas de energía) dentro del sistema actual o proyectado, como lo manifiesta Durán (2004, p. 189).
2. Evaluar los posibles proyectos destinados a mejorar las prestaciones de los sistemas térmicos (cambio tecnológico, cambio de fuente energética y/o inversiones adicionales) a través del concepto de eficiencia exergética diferente al concepto de eficiencia, que limita el análisis a una condición particular del sistema sin tener en cuenta el entorno en que se encuentra establecido.
3. Diferenciar la calidad de la energía como una variable importante de evaluación económica de un proyecto y no solo como un insumo de un proceso productivo, lo que conduce a la optimización económica de sistemas y procesos industriales.
4. Reducir el calentamiento global y en términos generales, favorecer el medio ambiente, cuando se implementan proyectos derivados de la termoeconomía, dado que el análisis parte del principio de la interacción del sistema con su entorno, de tal manera que no se percibe el medio ambiente como un elemento separado del proyecto sino como parte fundamental del mismo.

Una de las áreas más importantes de aplicación del análisis termoeconómico es la cogeneración, cuyo principal objetivo es la producción de trabajo y transferencia de calor por medio de un sistema integrado que reduce el consumo de recursos frente a su implementación por separado. En Colombia durante los últimos años se han identificado los siguientes potenciales (UPME, 2008):

- 423 MW, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 1997.

- 773 MW, Asociación Nacional de Industriales (ANDI), 2005.
- 850 MW, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2008.

Estos constituyen una fuente importante de proyectos de desarrollo en beneficio del consumo energético del país y de la conservación y protección del medio ambiente, que integrados con las metas de ahorro descritas requieren especialistas de todas las áreas con una formación rigurosa que les permita en las diferentes etapas de la formulación y evaluación de proyectos, la concepción adecuada del uso racional de energía, empezando por proyectos de investigación cofinanciados, soportados en la actual legislación energética y de manejo de regalías para la investigación.

Una metodología adecuada, posterior al tema de los especialistas, partiría de la medición del potencial para aplicar la termoeconomía en las organizaciones colombianas por actividad industrial a través de la caracterización de los diferentes procesos energéticos que las componen, energéticos utilizados, consumos medios, productividad, tecnologías, etc. Posteriormente se seleccionarían los de mayor número de procesos térmicos y mayor consumo para evaluar el desempeño energético y desarrollar un modelo por cada transformación industrial que determinaría el desempeño exergético actual, integrado al proceso productivo y al entorno en que se desarrolla, originando la fundamentación teórica para la administración de los procesos actuales con relevancia térmica y para diseñar nuevas líneas de transformación de materia prima, en concordancia con las metas establecidas para el año 2015.

3. APLICACIÓN PRÁCTICA

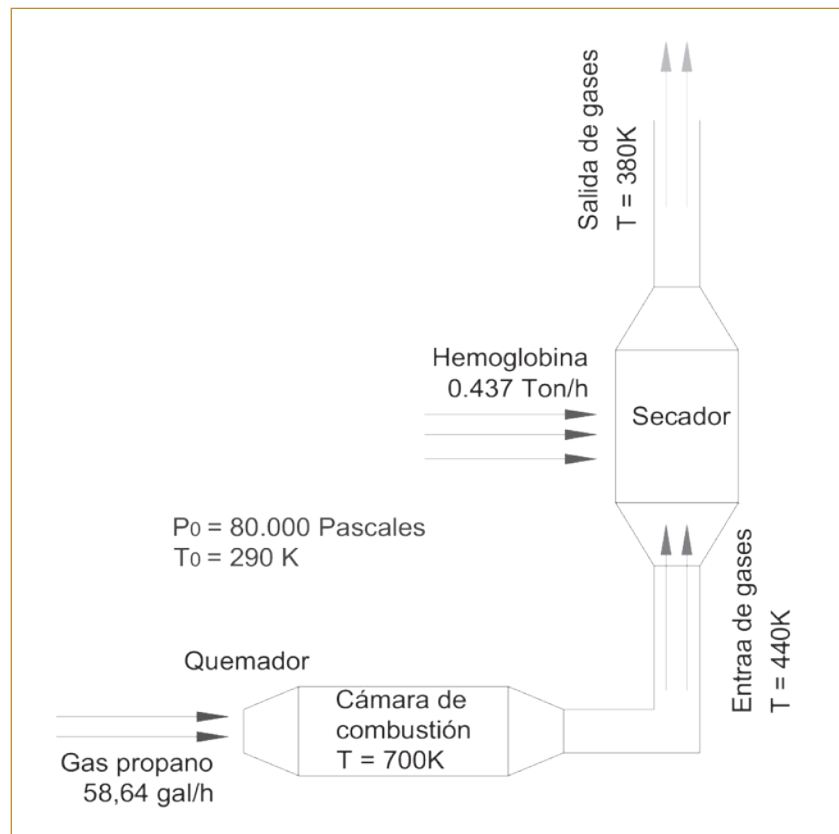
A manera de ejemplo práctico se ha desarrollado un análisis termoeconómico a un sistema simple de secado en una planta de "rendering" o de procesamiento de subproductos de plantas de beneficio de aves ubicada en la Sabana de Bogotá. La descripción del proceso así como los

datos suministrados corresponden a las actuales condiciones de operación. A continuación se presenta el diagrama simplificado del proceso con los parámetros de operación.

El sistema se compone de un quemador principal de gas propano que tiene un consumo de 58,64 gal/h equivalentes a $6,16 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$ cuya función es generar gases de combustión que son conducidos por una tubería hasta el secador de subproducto (hemoglobina) para deshidratarlo.

Dicho subproducto ingresa a una tasa de 0,437 ton/h durante 8,5 horas por día. Los gases de combustión alcanzan la temperatura de 700 K en el interior del quemador y durante su recorrido ingresan al secador a 440 K para salir a una temperatura final de 380 K y posteriormente ser tratados para su refrigeración.³ Como es necesario la definición del ambiente de referencia (T_0 , P_0) se trabajará con una temperatura ambiente (T_0) de 290 K y una presión atmosférica (P_0) de 80.000 Pa.⁴

Figura 2. Diagrama simplificado del proceso evaluado.



Fuente: Elaboración propia.

³ Para efectos prácticos la última etapa de refrigeración no se evaluará; sin embargo, el procedimiento es el mismo que se desarrollará a partir de este análisis.

⁴ Condiciones propias de la Sabana de Bogotá.

4. METODOLOGÍA

El análisis termoeconómico se desarrollará a través de la siguiente metodología que resulta válida para cualquier aplicación industrial y/o sector:

1. Determinación de los flujos de exergías en las fases del proceso: entrada del combustible, quemador, secador y salida de los gases del secador. En este primer análisis se hace uso de la primera y segunda leyes de la termodinámica, considerando flujo unidimensional y estacionario de los gases de combustión a través del sistema.
2. Determinación de los costos unitarios de los flujos exergéticos durante el recorrido por el sistema.
3. Determinación de los costos por unidad de tiempo de los flujos exergéticos establecidos.
4. Análisis de los resultados.

4.1. FLUJO DE EXERGÍA DE ENTRADA DEL COMBUSTIBLE

La exergía del gas propano que ingresa a la cámara de combustión se divide en dos partes:

1. Exergía química, b_q , que corresponde al trabajo útil máximo logrado al pasar de la condición inicial al ambiente de referencia (T_0 , P_0) por procesos químicos (combustión).
2. Exergía física, b_f , que corresponde al trabajo útil máximo logrado al pasar de la condición inicial al ambiente de referencia (T_0 , P_0) por procesos físicos.

A partir del balance de masa de la ecuación para la formación del propano C_3H_8 considerando los elementos carbono, grafito e hidrógeno gaseoso:



Se obtiene la exergía química del combustible por moles con los coeficientes de balance (n_i), la exergía química de los elementos (b_q) y la energía libre de Gibbs del propano ($g_{f(x)}$):

$$\tilde{b}_q = \sum n_i b_q (\text{elementos}) + g_{f(x)} \quad (2)$$

(Querol Aragón, García Torrent *et al.*, 2011).

Los valores para el caso son (Zsargut, 2007):

- Exergía química del carbono grafito.

$$C = 410.820 \frac{kJ}{kmol}$$

- Exergía química del hidrógeno gaseoso.

$$H = 238.490 \frac{kJ}{kmol}$$

- Energía libre de Gibbs del propano $g_{f(x)} =$

$$- 23490 \frac{kJ}{kmol}$$

Por tanto,

$$\tilde{b}_{q(C_3H_8)} = \left(3 \times 410.820 \frac{kJ}{kmol}\right) + \left(4 \times 238.490 \frac{kJ}{kmol}\right) - 23.490 \frac{kJ}{kmol} = 2.162.930 \text{ kJ/mol}$$

Para expresar la exergía en términos de masa se utiliza la masa molar del propano, correspondiente a $44.097 \frac{kg}{kmol}$ de manera que la exergía química del propano será:

$$b_{q(C_3H_8)} = 2.162.930 \frac{kJ}{kmol} \times \frac{1 \text{ kmol } (C_3H_8)}{44.097 \text{ kg}} = 49.049,37 \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

La determinación de la **exergía física del combustible** es diferente, dado que tiene en cuenta el proceso físico, en el caso evaluado, las condiciones de flujo y el trabajo realizado por el desplazamiento del propano. Se calcula con la siguiente expresión:

$$b_f = (h - h_0) - T_0 (S - S_0) \quad (4)$$

(Querol Aragón, García Torrent *et al.*, 2011).

Donde:

h = entalpía⁵ del propano en las condiciones de operación del sistema $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

⁵ La entalpía es una propiedad termodinámica resultado de sumar la energía interna (u) con el producto de la presión (P) y el volumen específico de la sustancia (v), con el propósito de simplificar los cálculos en razón de que en la mayoría de situaciones prácticas dichos

h_0 = entalpía del propano en las condiciones del ambiente (T_0 , P_0) de referencia ($\frac{kJ}{kg}$).

T_0 = temperatura del ambiente de referencia (Grados K). ($\frac{kJ}{kgK}$)

s = entropía⁶ del propano en las condiciones de operación del sistema ($\frac{kJ}{kgK}$).

s_0 = entropía del propano en las condiciones del ambiente (T_0 , P_0) de referencia

Los valores se determinan con las propiedades termodinámicas del gas propano a las temperaturas (T) y presiones (P) de operación⁷ y ambientales, respectivamente (Miyamoto and Watanabe, 2000), siendo:

$$h = 1060 \frac{kJ}{kg} \text{ a } P = 80.000 Pa \text{ y } T = 700 K.$$

$$h_0 = 620 \frac{kJ}{kg} \text{ a } P = 80.000 Pa \text{ y } T = 290 K.$$

$$s = 3,98 \frac{kJ}{kgK} \text{ a } P = 80.000 Pa \text{ y } T = 700 K.$$

$$s_0 = \frac{kJ}{kgK} \text{ a } P = 80.000 Pa \text{ y } T = 290 K.$$

Reemplazando en la ecuación (4):

parámetros (u, v y P) se encuentran involucrados. En algunas situaciones puede interpretarse como la energía que posee una sustancia debido a su interacción molecular y a su desplazamiento. Por tanto, $h = u + Pv$.

⁶ La entropía es una propiedad termodinámica que relaciona la energía térmica con la temperatura y se utiliza para establecer la energía que no es utilizable cuando se realiza un proceso; por tanto, la entropía generada nunca será negativa porque en la naturaleza ningún proceso es completamente reversible, lo que a su vez significa que siempre habrá pérdidas de energía. Toda transferencia de calor siempre genera una transferencia de entropía. El término de entender cuando se asocia a la desorganización o incertidumbre que se genera cuando un sistema cambia de estado y que representa pérdidas de energía. En términos matemáticos la variación de entropía se expresa como $dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)$ siendo δQ la energía recibida de un reservorio de energía a temperatura T.

⁷ El quemador es de tipo atmosférico y, por tanto, la presión de operación corresponde a la presión atmosférica del lugar de referencia.

$$b_f = \left(\frac{1060kJ}{kg} - \frac{620kJ}{kg}\right) - 290 K \left(\frac{3,98kJ}{kgK} - \frac{3kJ}{kgK}\right) = 155,8 \frac{kJ}{kg}$$

Entonces, la **exergía total** (b_c) del gas propano será la suma de la exergía química y la exergía física, así:

$$b_c = b_q + b_f = 49049,37 \frac{kJ}{kg} + 155,8 \frac{kJ}{kg} = 49.205,17 \frac{kJ}{kg} \quad (5)$$

Dicho valor significa que en una combustión completa de propano hasta llegar al equilibrio con el ambiente de referencia (T_0 , P_0) se podrá producir un trabajo máximo de 49205,17 kJ por cada kilogramo consumido de combustible. Resultado que en la práctica nunca se obtendrá por efecto de las irreversibilidades.

Se observa que la exergía química es la más importante por el orden de magnitud, lo que significa que el mayor trabajo útil del gas propano se obtiene de su reacción química de combustión y no de las condiciones físicas del proceso.

La transferencia de exergía del gas propano por unidad de tiempo (\dot{B}_c) se puede calcular teniendo en cuenta el consumo de gas propano del quemador (\dot{Q}) cuyo valor es $6,16 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ que en términos de flujo másico (\dot{m}), a partir de la densidad (ρ) del gas propano líquido⁸ (Fenimore, 2008) de $500 \frac{kg}{m^3}$, corresponde a:

$$\dot{m}_{C_3H_8} = \rho \times \dot{Q} = 500 \frac{kg}{m^3} \times 6,16 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} C_3H_8 = 0,0308 \frac{kg}{s} C_3H_8 \quad (6)$$

Por tanto, el flujo de exergía (\dot{B}_c) del gas propano que ingresa al quemador es:

$$\dot{B}_c = \dot{m} \times b = 0,0308 \frac{kg}{s} \times 49205,17 \frac{kJ}{kg} = 1.516 kW \quad (7)$$

⁸ La medición del consumo de gas propano en la planta se efectúa en estado líquido, por lo cual se utiliza la densidad en tales condiciones. Una vez el gas entra en contacto con el aire atmosférico cambia su estado de líquido a gaseoso.

4.2. FLUJO DE EXERGÍA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DEL QUEMADOR

Una vez se inicia la combustión del gas propano en el interior del quemador por la mezcla con aire atmosférico, se generan los gases de combustión que se dirigirán al secador del subproducto a través de una tubería de conducción. Dichos gases estarán compuestos por el gas propano y el aire de mezcla necesario para la combustión.

El oxígeno requerido para la combustión del flujo másico de gas propano se establece con la relación estequiométrica de la combustión considerando combustión completa:



Es decir, una mol de propano (C_3H_8) cuyo peso es 44,097 kg requiere 160 kg de oxígeno (O_2) cuyo peso es 32 kilogramos por mol. Así pues, el flujo másico de propano requerirá la siguiente proporción de oxígeno:

$$\dot{m}_{O_2} = 0,0308 \frac{kg}{s} \times \frac{160 \text{ kg } O_2}{44,097 \text{ kg } C_3H_8} = 0,111 \frac{kg}{s} O_2 \quad (9)$$

En razón de que el aire contiene 20% de oxígeno (O_2) entonces la cantidad de aire requerido será:

$$\dot{m}_{Aire} = \frac{0,111 \frac{kg}{s} O_2}{0,2 \frac{O_2}{Aire}} = 0,558 \frac{kg}{s} Aire \quad (10)$$

La combustión es un proceso químico que requiere un alto contenido de oxígeno, si se quiere evitar la producción de monóxido de carbono (CO), producto gaseoso tóxico y altamente contaminante, formado durante la combustión incompleta que se presenta naturalmente si el proceso se lleva a cabo con aire. Debido a que el aire es una mezcla de 80% N_2 y 20% O_2 , se requiere que el sistema evaluado opere con un exceso de aire de 50% para evitar la formación de monóxido de carbono; de este modo el flujo de aire requerido será de $0,837 \frac{kg}{s}$. Por tanto, los gases de combustión del quemador corresponderán a la suma de los dos flujos así:

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{C_3H_8} + \dot{m}_{Aire} = 0,0308 \frac{kg}{s} C_3H_8 + 0,837 \frac{kg}{s} Aire = 0,8678 \frac{kg}{s} gases \quad (11)$$

La transferencia de exergía que acompaña al quemador es la propia transferencia de calor que ocurre en su interior. Se puede obtener a partir de la ecuación simplificada de calor aportado a una sustancia conociendo su calor específico:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (12)$$

Siendo \dot{m} el flujo másico de los gases de combustión, C_p el calor específico⁹ considerando al aire como gas ideal y ΔT la diferencia de temperaturas de los gases.

Por tanto,

$$\dot{Q} = 0,8678 \frac{kg}{s} * 1,035 \frac{J}{kgK} * (700 - 290)K = 368,25 \text{ kW}$$

4.3. FLUJO DE EXERGÍA DE LOS GASES QUE SALEN DEL SECADOR

Con el concepto de flujo de exergía aplicado a un volumen de control y que corresponde a la diferencia entre el flujo de exergía de salida y de entrada de los gases de combustión, se puede determinar la exergía de salida de dichos gases ya que la de entrada corresponde con el flujo de exergía a la salida del quemador.

La expresión se escribe de la siguiente forma:

$$\dot{B}_{s2} - \dot{B}_{s1} = \dot{m} [h_2 - h_1 - T_0(S_2 - S_1)] \quad (13) \text{ (Moran and Shapiro, 2004).}$$

Siendo:

\dot{B}_{s2} = flujo de exergía de los gases a la salida del secador (kW).

\dot{B}_{s1} = flujo de exergía de los gases a la entrada del secador (kW).

\dot{m} = flujo másico de los gases de combustión ($\frac{kg}{s}$).

⁹ Para el trabajo desarrollado se utilizó el calor específico de $1.035 \frac{J}{kgK}$.

- $h_2 =$ entalpía de salida de los gases de combustión $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.
- $h_1 =$ entalpía de entrada de los gases de combustión $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.
- $T_o =$ temperatura ambiente de referencia (K).
- $s_2 =$ entropía de salida de los gases de combustión $\left(\frac{kJ}{kgK}\right)$.
- $s_1 =$ entropía de entrada de los gases de combustión $\left(\frac{kJ}{kgK}\right)$.

Resolviendo:

$$(h_2 - h_1) = 60,84 \frac{kJ}{kg} \text{ . (Howell and Buckius, 1990).}$$

$$T_o (s_2 - s_1) = - 43,12 \frac{kJ}{kg}$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{s_2} &= \dot{B}_{s_1} + \dot{m} [h_2 - h_1 - T_o (s_2 - s_1)] \\ \dot{B}_{s_2} &= 368.25 \text{ kW} + 0,8678 \frac{kg}{s} \\ &[-60,84 \frac{kJ}{kg} + 43,12 \frac{kJ}{kg}] = 352.87 \text{ kW} \end{aligned}$$

Con esta última expresión se han obtenido los flujos exergéticos del proceso evaluado teniendo como condiciones de referencia la presión de y la temperatura de de la Sabana de Bogotá. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Flujos exergéticos del proceso.

Proceso		Flujo exergético (kW)
Combustible de entrada	\dot{B}_C	1516
Quemador	\dot{Q}	368.25
Secador	\dot{B}_{s_2}	352.87

Fuente: Elaboración propia.

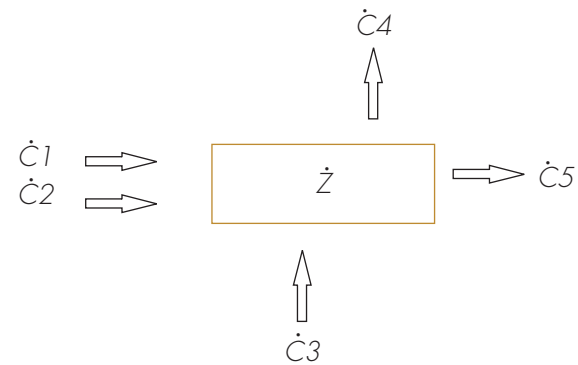
4.4. DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS UNITARIOS

A partir del cálculo de los flujos de exergía se fijan sus costos desde el origen del combustible hasta las condiciones de fabricación, operación y mantenimiento de los equipos involucrados. La

ventaja de considerar la exergía en la asignación de costos es que a través de su evaluación se cuantifican los verdaderos potenciales energéticos que contrastan con la estructura actual de los procesos, en razón de la falta de aprovechamiento.

El análisis exergetico - económico de un elemento cualquiera que produzca un trabajo, transfiera calor o realice un proceso cualquiera en la naturaleza, parte de una expresión simple que se puede representar en la siguiente figura.

Figura 3. Diagrama de costos de una unidad productiva.



$$\sum_{i=1}^n \dot{C}_{i_{productos}} = \sum_{i=1}^n \dot{C}_{i_{insumos}} + \dot{Z} \quad (14)$$

Es decir, los costos de producir por unidad de tiempo serán iguales a los costos de los insumos por unidad de tiempo más los costos de fabricación, operación y mantenimiento (\dot{Z}). Para la figura 3:

$$\dot{C}_4 + \dot{C}_5 = \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_3 + \dot{Z}$$

Dichos costos son el producto del costo por unidad de exergía (C_u) expresado en $\frac{COP}{kWh}$ para el caso colombiano y el flujo o transferencia exergética de tal manera que:

$$\dot{C} = C_u \dot{B} \quad (15)$$

Así, los costos de los productos 3 y 4 del ejemplo serían:

$$\dot{C}_4 + \dot{C}_5 = C_{u1} \dot{B}_1 + C_{u2} \dot{B}_2 + C_{u3} \dot{B}_3 + \dot{Z}$$

Y el costo unitario del producto 4:

$$C_{u4} = \frac{C_{u1}\dot{B}_1 + C_{u2}\dot{B}_2 - C_{u3}\dot{B}_3 + \dot{Z} - C_{u5}\dot{B}_5}{\dot{B}_1}$$

Del caso particular que se está analizando es posible entonces, con la teoría anterior, determinar el costo unitario del combustible, de la operación del quemador, de la operación del secador y de los gases finales de salida.

Previa evaluación detallada con las áreas de contabilidad, auditoría y mantenimiento de la compañía, de los costos involucrados en cada caso, y asociando los costos energéticos a los exergéticos como una primera aproximación, se logró establecer los parámetros de valoración de costos que a continuación se presentan.

Cuadro 3. Costos unitarios evaluados.

Elemento	Costos	Parámetro	Valor
Gas propano ¹⁰	2.944,37 COP / gal	Cc	109,2 COP / kWh ¹¹
Construcción del quemador	89.500.000 COP	\dot{Z}_q1	82.870,3 COP / h ¹²
Operación y mantenimiento del quemador	12.000.000 COP / Año	\dot{Z}_q2	2.150,5 COP / h ¹³
Construcción de la tubería de conducción de gases	44.670.000 COP	\dot{Z}_t1	82.722,2 cop / h ¹⁴
Operación y mantenimiento de la tubería	3.000.000 COP / Año	\dot{Z}_t2	537,63 cop / h
Construcción del secador	67.580.000 COP	\dot{Z}_s1	125.148.1 cop / h ¹⁵
Operación y mantenimiento del secador	15.000.000 COP / Año	\dot{Z}_s2	2.688,1 cop / h

Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ Precio de compra promedio de los dos últimos años.

¹¹ Calculado en un poder calorífico del gas propano de 92000 Btu/gal. Energá, G y (2014). "Canasta energética colombiana" tomado de: <http://gasyenergia.com/datos-tecnico/canasta-energetica>.

¹² Cotización Industrias Wasvelt Ltda. Entrega a 90 días, trabajo 12 horas diaras. Incluye instalación.

¹³ El sistema opera 18 horas diarias durante 310 días al año.

¹⁴ Cotización Industrias Wasvelt Ltda. Entrega a 45 días, trabajo 12 horas diarias. Incluye instalación.

¹⁵ Cotización Industrial Wasvelt Ltda. Entrega a 45 días, trabajo 12 horas diarias. Incluye instalación.

Costo unitario de los gases de combustión – quemador (C_{ug1})

Despreciando el flujo de exergía con que entra el aire para la combustión por sus bajas condiciones exergéticas en términos de orden de magnitud y costo, la expresión para determinar el valor del costo unitario de los gases de combustión producidos en el quemador se simplifica a:

$$C_{ug1} \dot{Q} = C_c \dot{B}_c + \dot{Z}_q$$

Es decir, el costo de producción de los gases de combustión ($C_{ug1} \dot{Q}$) en el quemador corresponde a los costos del combustible por unidad de tiempo ($C_c \dot{B}_c$) más los costos de fabricación, operación y mantenimiento del quemador (\dot{Z}_q).

Por tanto,

$$C_{ug1} = \left(\frac{109,2 \frac{COP}{kWh} \times 1516kW}{368,25kW} \right) + \left(\frac{82,870 \frac{COP}{h} + 2.150,5 \frac{COP}{h}}{368,25kW} \right) = 680,42 \frac{COP}{kWh}$$

Costo unitario de los gases de combustión – salida secador (C_{us})

Con los criterios anteriores y la potencia de secado del equipo (Q_s) de 60 kW que se constituye en un producto, se efectúa el mismo análisis así:

$$C_{us} \dot{Q}_s + C_{ug2} \dot{B}_{s2} = C_{ug1} \dot{Q} + \dot{Z}_s$$

Por tanto¹⁶,

$$C_{us} = 680,42 \frac{COP}{kWh} \left[\frac{368,25kW - 352,87kW}{60kW} \right] + \left[\frac{125,148,1 \frac{COP}{h} + 2668,1 \frac{COP}{h}}{60kW} \right] = 2.305,68 \frac{COP}{kWh}$$

Con la información de los costos unitarios se obtienen los costos por unidad de tiempo, haciendo uso de la ecuación (15). En el cuadro 4 se presentan los resultados.

Cuadro 4. Costos por unidad de tiempo.

Elemento	Operación	Costos por unidad de tiempo COP/h
Gas propano	$C_c \dot{B}_c$	165.547,2
Quemador	$C_{ug1} \dot{Q}$	250.564,6
Secador	$C_{us} \dot{Q}_s$	138.280
Gases de salida del secador	$C_{ug2} \dot{B}_{s2}$	240.099

Fuente: Elaboración propia.

¹⁶ Los costos unitarios de los gases de escape se consideran iguales. Por tanto, $C_{ug1} = C_{ug2}$.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. BALANCE DE EXERGÍA

Con las exergías de flujo calculadas se puede hacer el balance exergético para establecer la destrucción de exergía durante el proceso,¹⁷ así:

Cuadro 5. Balance de flujos exergéticos.

Proceso		Flujo neto de entrada (kW)	Flujo cedido (kW)	Flujo destruido (kW)	Participación
Combustible de entrada	\dot{B}_c	1516	—	—	100%
Energía entregada a los gases	\dot{Q}	—	368.25	—	24.2%
Exergía cedida en el secador	\dot{B}_{s2}	—	352.87	—	23.27%
Exergía destruida	\dot{B}_p	—	—	794,88	52,4%

Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene una participación porcentual de destrucción de exergía elevada superior a 50%, que obedece principalmente a las siguientes razones:

1. Las temperaturas de operación del proceso son bajas frente a las temperaturas de la combustión del gas propano, de manera que la elección del combustible no es la más adecuada. Tendría que evaluarse otro combustible más adecuado para el calentamiento de los productos del proceso.
2. El aporte exergético en el quemador es bajo frente al flujo exergético del combustible. Por entenderlo de otra manera podría decirse que el gas propano tendría la capacidad de

llevar teóricamente los gases de combustión hasta un valor de 1977 K y que a su vez con el descenso a la temperatura de referencia entregaría la máxima capacidad de trabajo para el consumo dado.

3. No hay un mayor aprovechamiento del flujo exergético de salida de los gases de escape que finalmente están siendo transportados hacia la atmósfera.

5.2. OTROS ENERGÉTICOS

La evaluación anterior se efectuó con seis combustibles sin considerar las condiciones técnicas que demandaría la combustión particular para determinar si existía alguna diferencia significativa de flujos exergéticos; a continuación se indican los resultados.

¹⁷ No se tienen en cuenta las pérdidas de calor hacia el ambiente, ya que el sistema se encuentra muy bien aislado de tal manera que el valor es bajo.

Cuadro 6. Balance con otros combustibles.

Combustible		Exergía (PEMEX, 2004) (kJ/kg)	Flujo neto de exergía (kW)	Dstrucción de exergía
Gasolina ¹⁸	C_8H_{18}	46.650	1684	66.68%
Diesel	$C_{12}H_{29}$	45.650	1.557,2	67.03%
Etanol ¹⁹	C_2H_6O	27.154	1.590,3	65.07%
Butano	C_4H_{10}	48.262,2	1.648,2	67.47%
Metanol	CH_4O	22.408	1.753,8	68.49%
Metano	CH_4	52.144,9	1.545,5	18.40%

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo uso de una hoja de cálculo se determinaron los flujos exergéticos del proceso. La herramienta se parametrizó para establecer los flujos máxicos de aire requeridos para la combustión, los flujos exergéticos de los combustibles en función de su poder calorífico y aplicación, los parámetros de operación del quemador, la participación de los flujos en el balance de exergía y la destrucción de exergía.

Los resultados entregaron una destrucción de exergía que osciló entre 18.4% y 68.5% para el metano y el metanol, respectivamente. Aunque la destrucción que presentó el gas propano (52,4%) es muy alta, también se observa que los demás combustibles tienen un comportamiento muy similar entre ellos, más desfavorable, cobrando fuerza la idea de elegir un energético de acuerdo con el propósito y no solamente por el poder calorífico, y asimismo evaluar un nuevo sistema de secado de subproductos.

Se ratifican las dificultades energéticas del proceso para la aplicación particular por las diferencias entre los parámetros de operación del quemador y los parámetros de operación del secador. Sin embargo, se debe evaluar como alternativa válida

mientras no se modifique el proceso, el uso de gas natural cuyo componente más importante es el metano, con 81.86% en volumen (Fenosa, 2014). La figura 4 resulta de la herramienta de cálculo y resume los flujos exergéticos calculados.

5.3. COSTOS EXERGÉTICOS

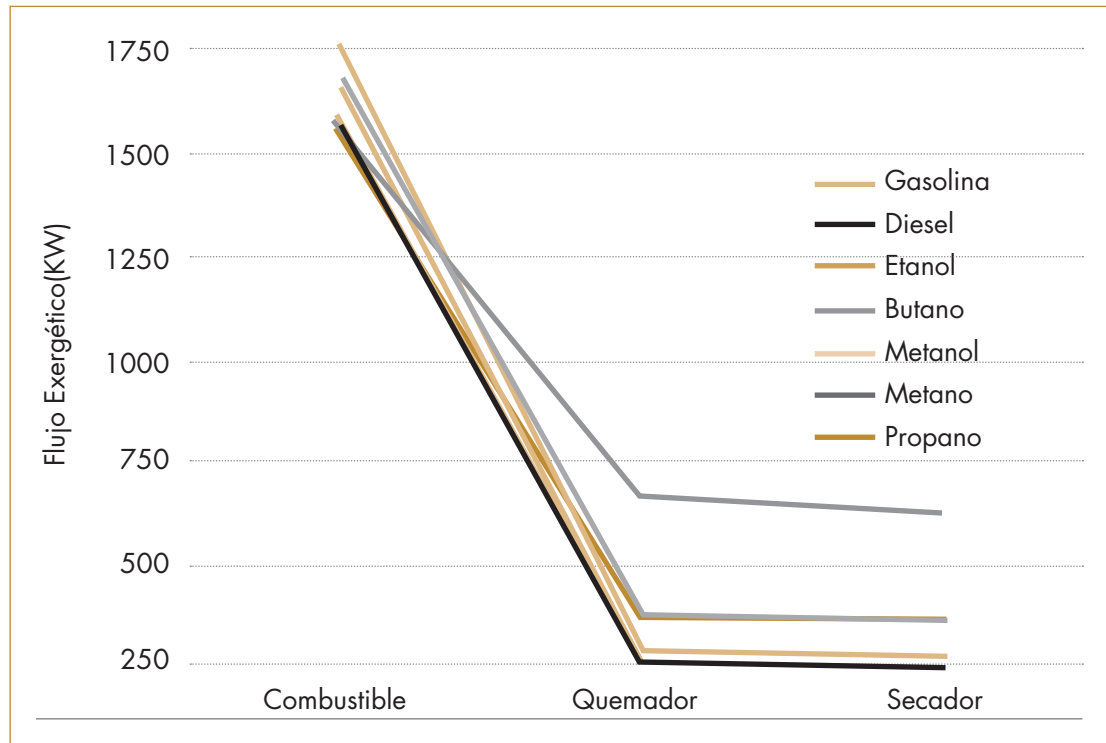
Los costos con la tarifa exergética del gas propano por el consumo de 58,64 gal/h ($6,16 \times 10^{-5} \frac{m^3}{2}$) y los costos de fabricación, operación y mantenimiento (Z), sin considerar los flujos exergéticos, dan un valor de 468.774,68 COP/h, en contraste con la suma de los flujos exergéticos (Cuadro 4) cuyo monto es de 794.490 $\frac{COP}{h}$, lo que representa 40% de diferencia asociado por supuesto a la destrucción de exergía o presencia de irreversibilidades.

El valor diferencial no se percibe desde el punto de vista contable y tampoco se manifiesta en la operación normal de la planta, ya que para hacer la comparación se contabilizaron los costos de fabricación, operación y mantenimiento (Z). Por tanto, la diferencia representa las pérdidas por la falta de aprovechamiento del energético durante el recorrido por el proceso o la errónea selección del proceso mismo y/o del combustible. Es notorio el alto valor que representan (30.22%) los gases de salida del secador (240.099 COP/h) sin que

¹⁸ Considerando el principal consyente de la gasolina, el octano C_8H_{18} .

¹⁹ Ojeda, 2009 # 1.

Figura 4. Flujos exergéticos evaluados con otros combustibles.



Fuente: Elaboración propia a partir de la herramienta desarrollada para la aplicación.

efectivamente estén realizando algún tipo de trabajo.

Observando el cálculo para la determinación del costo unitario de los gases de combustión del quemador se concluye que la diferencia está dada por el valor de Q que opera dos veces en la ecuación, la primera en la relación B_c/Q y la segunda en la relación Z/Q , siendo favorable un valor muy cercano al flujo exergético del combustible, de manera que $\frac{Z}{Q} \approx 1$ para que el primer término sea la tarifa exergética del combustible y en el segundo término los costos Z no tengan alto impacto, situación que dependerá de la generación de los mismos y que no siempre puede ocurrir.

A su vez, los costos posteriores se relacionan con el valor calculado inmediatamente anterior y por tanto la importancia de disminuir los primeros. Pero también aparece el flujo de calor transmitido por el secador (60 kW) que se distancia del flujo

exergético de entrada (368.25 kW) y del que se puede llegar a la misma conclusión anterior.

6. CONCLUSIONES

El análisis exergético se constituye en una sólida herramienta para entender la dinámica energética de los procesos de la naturaleza y de los procesos artificiales. Sus aplicaciones son ilimitadas en el sentido de que toda acción microscópica o macroscópica demanda un consumo energético valioso.

El verdadero potencial de ahorro energético de un sector industrial no se puede valorar únicamente a partir de la sustitución de energéticos como consecuencia del comportamiento del mercado, o por la sustitución de tecnologías por el efecto de nuevos desarrollos, sino a través de un balance exergético que determine las condiciones máximas

de operación a partir del propósito de cada acción o proceso.

Mediante el análisis termoeconómico es posible hacer la cuantificación de intangibles contables y físicos representados en la destrucción de exergía causada por múltiples factores como: errónea elección de un combustible, de un mecanismo, de un lugar de operación, fallas de operación en los procesos, erróneos parámetros de operación, etc.

A partir de la primera ley de la termodinámica se estableció el precepto básico de la transformación de energía: no se crea, no se destruye, se transforma en calor, en trabajo, aumenta o disminuye la energía interna; la segunda ley direcciona los procesos e integra una nueva propiedad termodinámica denominada entropía, asociada al desorden y a las condiciones de irreversibilidad de los procesos reales. El análisis exergético complementa las leyes anteriores considerando el propósito y cómo a través de su desarrollo se destruye la exergía pese a la conservación de la energía.

La metodología desarrollada para el análisis termoeconómico del caso tiene validez para cualquier proceso industrial porque contempla la valoración exergética del uso de los recursos. Si la valoración fuera de carácter sectorial la metodología sería la misma, solo que tendría que apoyarse en las estadísticas de consumo energético por sector y se haría necesario evaluar la exergía física y química de todos los recursos involucrados. Como punto de partida sería recomendable valorar la exergía química de los hidrocarburos producidos en Colombia.

Las herramientas de cálculo favorecen las evaluaciones termoeconómicas de los procesos, fácilmente la teoría exergética puede articularse a través de ecuaciones simples. En el caso particular el desarrollo es válido para un proceso de combustión externa con secado directo. Sin embargo, actualmente se consiguen en el mercado herramientas robustas como el Aspen Process Economic Analyzer (APEA), que con la información básica de operación realiza un análisis profundo de la destrucción exergética así como de la

El verdadero potencial de ahorro energético de un sector industrial no se puede valorar únicamente a partir de la sustitución de energéticos como consecuencia del comportamiento del mercado, o por la sustitución de tecnologías por el efecto de nuevos desarrollos, sino a través de un balance exergético que determine las condiciones máximas de operación a partir del propósito de cada acción o proceso.

valoración de alternativas de diseño, operación y cambios tecnológicos.

REFERENCIAS

- Administration, E. I. (2014). Primary Energy Overview. *Monthly Energy Review*, Energy Information Administration: 3.
- Congreso de la República de Colombia (2001). Ley 697. Recuperado de: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley/2001/ley_0697_2001.html.
- Energía, G. y. (2014). "Canasta energética colombiana". Disponible en: <http://gasyenergia.com/datos-tecnico/canasta-energetica>.
- Energy Information Administration, EIA (2007). *International Outlook 2005 / International Energy Outlook 2007*. Recuperado de: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>
- Evans, R. B. (1960). Thermodynamic availability as a resource and tool for system Optimization. *Thermodynamic and Economic Considerations in the Preparation of Fresh Water from the Sea*, Report, 59-34, 1960.
- Fenimore, S. (2008). *Ferrellgas, One Liberty Plaza*.
- Fenosa, G. N. (2014). El gas natural. Recuperado en 2014, de: <http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/hogar-el-gas-natural/1297102453941/que-es.html>
- Howell, J. R. and R. O. Buckius (1990). *Principios de termodinámica para ingenieros*. McGrawHill.
- Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia (2010). Resolución 180919. Recuperado de: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=39780>.
- Miyamoto, H. and A. Watanabe (2000). A thermodynamic property model for fluid phase propane. *Int. J. Thermophys* 21: 1045-1072.
- Moran, M. J. and H. N. Shapiro (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*, Reverté S.A.
- Ojeda, K. A., et al. (2009). Evaluación de sostenibilidad de la producción de biocombustibles de segunda generación mediante la aplicación de análisis exergético. *Prospectiva* 7, N° 2: 19-26.
- PEMEX (2004). *Análisis de exergía del sector petrolero mexicano*. PEMEX: 106- 122.
- Presidencia de la República de Colombia (2003). Decreto 3683. Recuperado de: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=11032>.
- Producir el millón de barriles de crudo es la meta en 2011 (2011, 31 de octubre). *Portafolio*. Recuperado de: <http://www.portafolio.co/negocios/producir-el-millon-barriles-crudo-es-la-meta-2011>.
- Querol Aragón, E., et al. (2011). *Termoeconomía y optimización energética*. U. P. d. Madrid.
- Tribus, M., & Evans, R. B. (1960). Economic and thermodynamic aspects of sea water Conversion. Proc. Conference on Water Research at the University of California.
- UPME (2008). Consideraciones en la planeación del sistema involucrando cogeneración, autogeneración y energías alternativas. 14 Congreso MEM. Santiago de Cali.
- Valero, A. (1987). A General Theory of Exergy Saving. ASME.
- Zsargut, J. (2007). *Standard Chemical Exergy*. E. P. o. I. stosowania, Wydawnictwo Politechniki Shlaskej.