

Valoración exergetica y termoeconómica de los sistemas de vapor. Una herramienta informática aplicada en el marco de la gestión de energía.

Vanessa Hurtado^{*,a}, Ángel Almarza^b

^a*Departamento de Térmica y Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia- Venezuela.*

^b*Departamento de Computación, Estudios Básicos. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia-Venezuela.*

Resumen.-

La importancia de hacer un uso adecuado de la energía como recurso plantea la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar no sólo la eficiencia de su empleo sino profundizar en lo que ocurre con la utilidad de esa energía en el proceso al cual se involucra, facilitando la gestión de dicho recurso en aras de evaluar, optimizar e incluso rediseñar procesos. En ese sentido, se diseñó y desarrolló una herramienta informática para la valoración exergetica y de parámetros termoeconómicos de la generación de vapor, por ser ésta ampliamente utilizada a la hora de alimentar energéticamente a diversos procesos. La herramienta en cuestión, arroja un reporte de resultados detallado, facilitándole al usuario el análisis de los flujos exergeticos involucrados, para el posterior establecimiento de relaciones entre la exergía útil y la destruida en el proceso.

Palabras clave: Valoración exergetica, Sistema de vapor, Gestión de energía.

Exergetic and thermoeconomic steam systems assessment. A computer tool applied in the framework of the management of energy.

Abstract.-

The importance of proper use of energy as a resource raises the need to have tools to evaluate not only the efficiency of its use but also further on what happens with that energy utility in relation to the process which engages, facilitating the management of the resource in order to evaluate, optimize and even redesign processes. For this purpose, an informatic tool was designed and developed for the exergetic and parameters thermoeconomic assessment of steam generation, in view of its common use as energy source in several processes. The designed tool provides a detailed report to analyze the exergetic flows involved in the process to facilitate the establishment of relationships among useful and destroyed exergy on it.

Keywords: Exergetic assessment, Steam system, Power management.

Recibido: Abril 2014

Aceptado: Agosto 2014

1. Introducción

La energía, en líneas generales se perfila como un recurso de carácter fundamental para el desarrollo de cualquier proceso industrial. Dada su

importancia, resulta clave contar con herramientas que permitan gestionar su uso y aplicación de forma eficiente y desde una perspectiva técnica; lo cual requiere incorporar por una parte un estudio acerca de la calidad de dicho recurso, esto es, cómo se comporta la utilidad potencial del mismo en base a la naturaleza irreversible de los procesos reales, permitiendo localizar y cuantificar el despilfarro o pérdida [1] en base al segundo principio de la termodinámica, sin dejar

* Autor para correspondencia

Correo-e: vaneshurt@gmail.com (Vanessa Hurtado)

de lado los aspectos que, en términos económicos, se relacionan con el diseño y operación de los procesos, lo cual conlleva la combinación de la exergía y la economía para aplicar un enfoque termoeconómico, que se centra en estudiar los mecanismos por medio de los cuales se degrada la calidad de la energía [2].

Así, basados en el hecho de que es necesario gestionar a este recurso como a cualquier otro dentro de las organizaciones [3] y que para ello se requiere un esquema gerencial que debe apoyarse en las herramientas que, desde un enfoque técnico, permitan estimar la eficiencia y los costos relativos a las pérdidas para lograr así tomar las decisiones pertinentes y adecuadas, se propone el diseño y desarrollo de una plataforma por medio de la cual se pueda realizar el estudio exergético, en específico de los sistemas de generación de vapor, tomando en consideración parámetros de orden termoeconómico.

2. Desarrollo de la investigación

La investigación realizada es de carácter no experimental, de tipo proyectivo y bajo la modalidad de proyecto factible [4]. La misma se desarrolló según las siguientes fases:

Fase 1.

Determinación y desarrollo de los modelos matemáticos relacionados con el caso de estudio: atendiendo a las características del sistema sometido a evaluación exergética, esto es específicamente el o los generadores de vapor, según sea el caso, operando en condiciones estacionarias o estables, sin tomar en consideración la distribución del mismo, se determinaron los modelos matemáticos correspondientes para la conformación de los módulos de cálculo de la herramienta en cuestión.

Así, en lo que refiere al análisis exergético, se entiende que la exergía, es una propiedad que representa el máximo trabajo a obtenerse teóricamente como producto de la interacción mutua entre un sistema y un ambiente de referencia [1], teniendo en consideración que la salida de trabajo será máxima cuando el proceso ocurre en condiciones reversibles, y el sistema alcanza al

final del mismo el estado muerto, esto es, cuando haya alcanzado el equilibrio termodinámico con los alrededores [5]. En tal sentido, para determinar la exergía, se requiere en primer lugar la definición del estado muerto, que se denotará con el subíndice cero, y salvo que se especifique de otro modo, será igual a $T_0 = 25^\circ\text{C}$ y $p_0 = 101,325\text{kPa}$ (que son los valores de referencia estándar). Así, la exergía de flujo específica, en unidades del sistema internacional (kJ/kg), vendrá dada por (1):

$$a_f = \underbrace{h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{C^2}{2}}_{\text{Contribución termomecánica}} + gz + a^q \quad (1)$$

Donde los términos subrayados representan la contribución o componente termomecánica, mientras que el término a^q , representa la exergía química, significando que el contenido del sistema que se estudia, puede reaccionar químicamente con las especies presentes en el ambiente de forma que se produzca un trabajo adicional, esto es, la exergía química cuantifica el máximo trabajo factible en virtud de la diferencia de composición entre el sistema y su entorno [6]. Es importante señalar que, en el caso donde se evalúa una diferencia de exergías de flujo entre estados con la misma composición, la contribución química se anula y queda únicamente la contribución termomecánica, sin embargo, sí en el caso de estudio se presentan reacciones químicas, es necesario contabilizar explícitamente la contribución química correspondiente.

Habiendo especificado el estado muerto y considerando la definición de exergía, se tomará como punto de partida para la valoración exergética, la aplicación del balance de exergía, que responde al principio de decremento de la misma, entendiendo que dicha propiedad no se conserva, sino que se destruye a causa de las irreversibilidades presentes. Así, la expresión correspondiente al balance de exergía en un volumen de control, incluyendo la transferencia de la misma por masa, calor y trabajo, se presenta de acuerdo con (2).

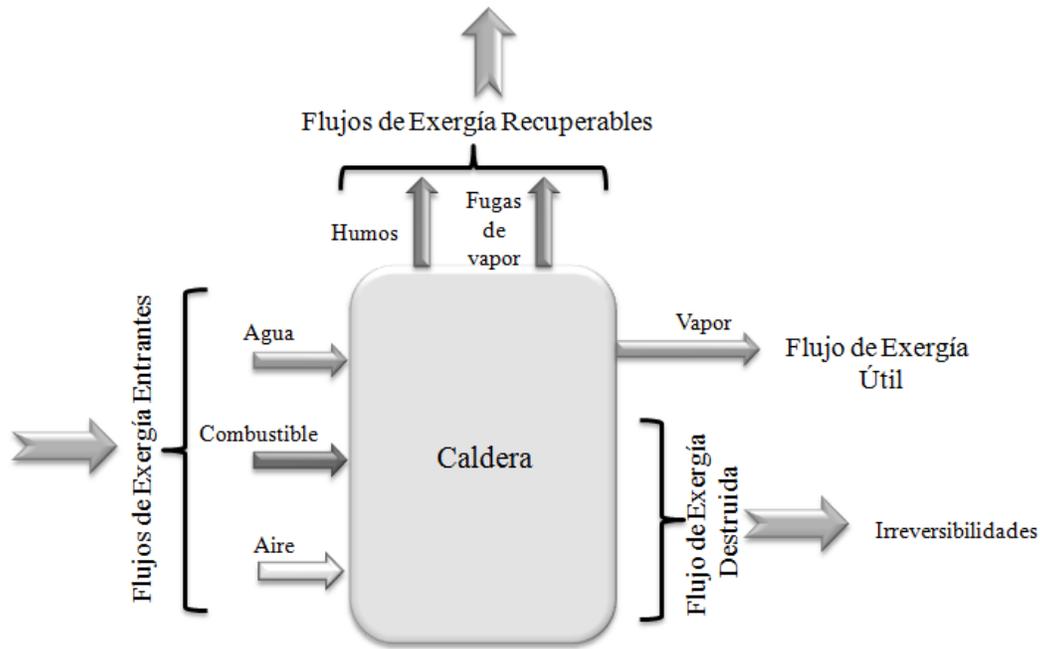


Figura 1: Modelo de evaluación de flujos exergéticos en la caldera.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{VC}}{dt} = & \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j \\ & - \left(\dot{W}_{VC} - p_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right) \\ & + \sum_e \dot{m}_e a_{fe} - \sum_s \dot{m}_s a_{fs} - \dot{A}_d \quad (2) \end{aligned}$$

De donde para el caso que nos ocupa, es decir un proceso en estado estacionario, los términos $\frac{dA_{VC}}{dt}$ y $\frac{dV_{VC}}{dt}$ son iguales a cero, llegando a simplificarse si el proceso se considera adiabático y sin consumo ni generación de potencia, como se indica en (3).

$$0 = \sum_e \dot{m}_e a_{fe} - \sum_s \dot{m}_s a_{fs} - \dot{A}_d \quad (3)$$

Así, tomando un modelo como el que se muestra en la Figura 1, donde se ven reflejados los flujos de exergía involucrados en el proceso, se plantean las ecuaciones para evaluar la exergía de cada una de las corrientes involucradas.

En el caso del combustible, se despreciarán los efectos del movimiento y la gravedad para la estimación de la contribución termomecánica,

mientras que, la contribución química, se determina en kJ/kmol, para un hidrocarburo $C_a H_b$, tomando una reacción idealizada de la sustancia, donde el combustible reacciona con el oxígeno proveniente del aire para formar dióxido de carbono y agua en fase líquida [1], según el siguiente modelo (4), en el que a_i^{-q} es la exergía química molar estándar a 298 K y 1 atm.

$$\begin{aligned} a_C^{-q} = & \left[h_C + \left(a + \frac{b}{4}\right) h_{O_2} - a h_{CO_2} - \frac{b}{2} h_{H_2O(l)} \right] (T_0, p_0) \\ & - T_0 \left[\dot{s}_C + \left(a + \frac{b}{4}\right) \dot{s}_{O_2} - a \dot{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \dot{s}_{H_2O(l)} \right] (T_0, p_0) \\ & + a a_{CO_2}^{-q} + \left(\frac{b}{2}\right) a_{H_2O}^{-q} - \left(a + \frac{b}{4}\right) a_{O_2}^{-q} \quad (4) \end{aligned}$$

Donde la entalpía específica y la entropía específica de cada componente se estiman según (5) y (6), respectivamente, considerando en esta última que las especies químicas en cuestión están presentes en una mezcla de gases ideales

$$\dot{h} = \dot{h}_f^o + [\dot{h}(T_0) - \dot{h}(T_{ref})] \quad (5)$$

$$\dot{s}_i(T, p_i) = \dot{s}_i^o(T) - \dot{R} \ln \left(\frac{y_i P}{p_{ref}} \right) \quad (6)$$

Tomando en cuenta la función de Gibbs, la (4) se presenta de forma condensada como lo indica (7):

$$a_C^{-q} = \left[\dot{g}_C + \left(a + \frac{b}{4} \right) \dot{g}_{O_2} - a \dot{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \dot{g}_{H_2O(l)} \right] (T_0, p_0) + a a_{CO_2}^{-q} + \left(\frac{b}{2} \right) a_{H_2O}^{-q} - \left(a + \frac{b}{4} \right) a_{O_2}^{-q} \quad (7)$$

En el caso de los humos de combustión, la exergía de flujo incluye las contribuciones termomecánica y química. La cuales se determinarán por mol de mezcla, considerando que la misma se comporta como una mezcla de gases ideales y despreciando los efectos del movimiento y la gravedad.

Así la contribución termomecánica queda como (8).

$$h - h_0 - T_0 (s - s_0) = \sum_i N_i \left[\dot{h}(T) - \dot{h}(T_0) - T_0 (s^0(T) - s^0(T_0) - R \ln \left(\frac{y_i p}{y_i p_0} \right)) \right] \quad (8)$$

Donde, N_i y y_i representan los moles y la composición molar, respectivamente, de los componentes de la mezcla. Mientras que, la contribución química, en las mismas unidades, se tomará como la suma de dos aportes, por un lado el que corresponde a la formación de sustancias presentes como gases en el ambiente y por otro, el aporte debido a la formación de monóxido de carbono presente en una mezcla (combustión incompleta). En cuyos casos se considerará al ambiente como una mezcla de gases ideales con un análisis molar que consiste en: $y_{N_2}^a = 0,7567$, $y_{O_2}^a = 0,2035$, $y_{H_2O}^a = 0,0303$, $y_{CO_2}^a = 0,0003$.

Así, la exergía química en kJ/kmol de mezcla, para una mezcla de gases ideales a T_0 y p_0 compuesta por solo sustancias presentes como gases en el ambiente se expresa con (9).

$$a^{-q} = \dot{R}T_0 \sum_i y_i \ln \left(\frac{y_i}{y_i^a} \right) \quad (9)$$

Mientras que, la contribución por monóxido de carbono considerando, una mezcla de gases ideales a T_0 y p_0 se obtiene a partir de (10).

$$a_{CO}^{-q} = \left[\dot{g}_{CO} + \frac{1}{2} \dot{g}_{O_2} - \dot{g}_{CO_2} \right] (T_0, p_0) + \dot{R}T_0 \ln \left(\frac{y_{CO} (y_{O_2}^a)^{\frac{1}{2}}}{y_{CO_2}^a} \right) \quad (10)$$

Para el caso de la corriente de agua de alimentación y la de vapor generado, se estimará la contribución termomecánica, despreciando los efectos del movimiento y la gravedad. Viniendo la contribución química expresada como indica (11).

$$a_{H_2O}^{-q} = \left[\dot{g}_{H_2O(l)} - \dot{g}_{H_2O(g)} \right] (T_0, p_0) + \dot{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \quad (11)$$

En el caso del aire de suministro al sistema, la componente química dada por la (9) será nula, por lo cual se estimará únicamente la componente termomecánica.

Habiendo efectuado el balance de exergía, resulta relevante como parte del análisis propuesto la estimación de la eficiencia exergética, entendida como una medida de cuan efectivo desde el punto de vista termodinámico es el uso la energía según (12).

$$\eta_{exer} = 1 - \frac{\dot{A}_d}{\sum \dot{E}x_{entra}} \quad (12)$$

En lo que refiere al apartado termoeconómico, se tomará un análisis de costo exergético que tiene como objetivo determinar los costos de los productos e irreversibilidades (exergía destruida) generados en los procesos de conversión de energía [7]. Así, el balance económico establece que los costos de los flujos de salida son iguales a la suma de los costos de los flujos de entrada más los costos anualizados de la construcción, mantenimiento y operación del equipo en cuestión. En tal sentido, la evaluación del costo del vapor a alta presión producido en una caldera [1] [7], se expresa como sigue de acuerdo (13).

$$\dot{C}_{vapor} + \dot{C}_{humos} = \dot{C}_{combustible} + \dot{C}_{agua} + \dot{C}_{aire} + \dot{Z}_c \quad (13)$$

Siendo \dot{C} el costo del flujo respectivo y \dot{Z}_c el costo asociado a la construcción y operación de la caldera, expresados en unidad monetaria por unidad de tiempo (esto es, Bs por hora, \$ por hora, etc.). Los costos \dot{C} , serán evaluados en función de la transferencia de exergía asociada a la corriente, ya que justamente la exergía mide

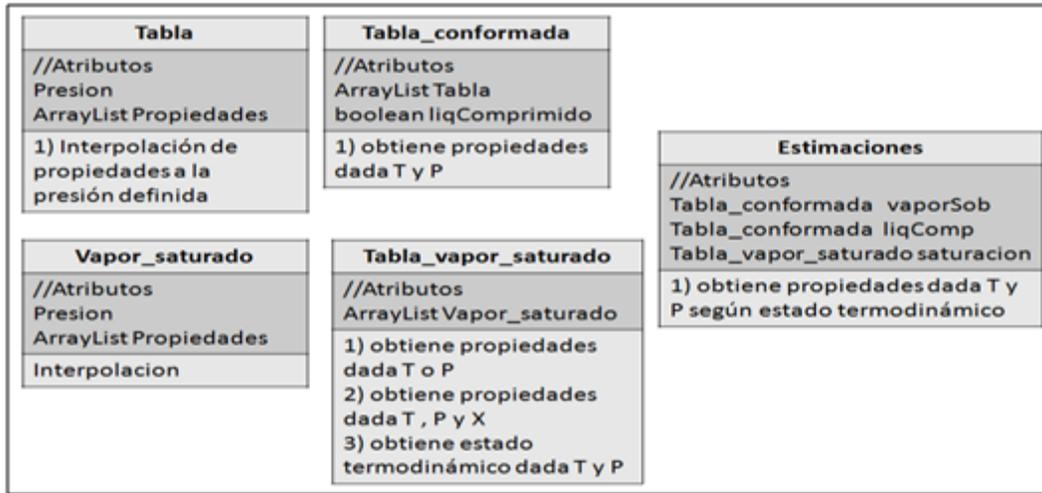


Figura 2: Ejemplo de estructura de clases propuesta.

el verdadero valor termodinámico del trabajo, el calor y demás interacciones entre el sistema y su entorno, tomando en consideración el efecto de las irreversibilidades. Entonces, se puede estimar a partir de (14).

$$\dot{C} = c\dot{A}_f \quad (14)$$

Donde c es el coste por unidad de exergía (en céntimos por kWh, por ejemplo) y \dot{A}_f es la transferencia de exergía por unidad de tiempo.

En el caso particular de la caldera, el balance de costos, se simplificará considerando que el agua de alimentación y el aire entran a la caldera con exergía y costos despreciables, tomando en cuenta además que los productos de combustión van directamente a la atmósfera con costo igualmente despreciable

Fase 2.

Establecimiento de las características y atributos de diseño de la herramienta a proponer: a efectos de realizar el diseño de una aplicación multiplataformas, se establece una estructura orientada a objetos para el diseño de clases permitiendo su implementación final en lenguaje Java SE utilizando como entorno integrado de desarrollo NetBeans 8.0. La Figura 2 muestra parte de la estructura de clases del módulo de estimaciones, a partir del cual se obtienen los parámetros y propiedades requeridas.

- Control de datos de entrada de las corrientes de proceso
- Desarrollo de los cálculos y manejo de excepciones.
- Herramientas de análisis. Diseño de gráficos y cálculos de eficiencia del proceso. Estimaciones termo económicas.

En lo referente al diseño de la interfaz gráfica de usuario, se busca minimizar la cantidad de datos de entrada que suministre el usuario para lo cual se toma en consideración la estimación de propiedades a partir de parámetros tabulados que forman parte de la herramienta.

Fase 3.

Validación: se efectuó empleando datos de procesos reales a partir del cual se realiza la comparación de los resultados obtenidos con una hoja de cálculo y los obtenidos con la herramienta propuesta.

3. Discusión de Resultados.

Atendiendo a los modelos matemáticos presentados se desarrolló una herramienta con una estructura gráfica que permite la introducción de los datos de entrada, usando como ejemplo los de la Tabla 1.

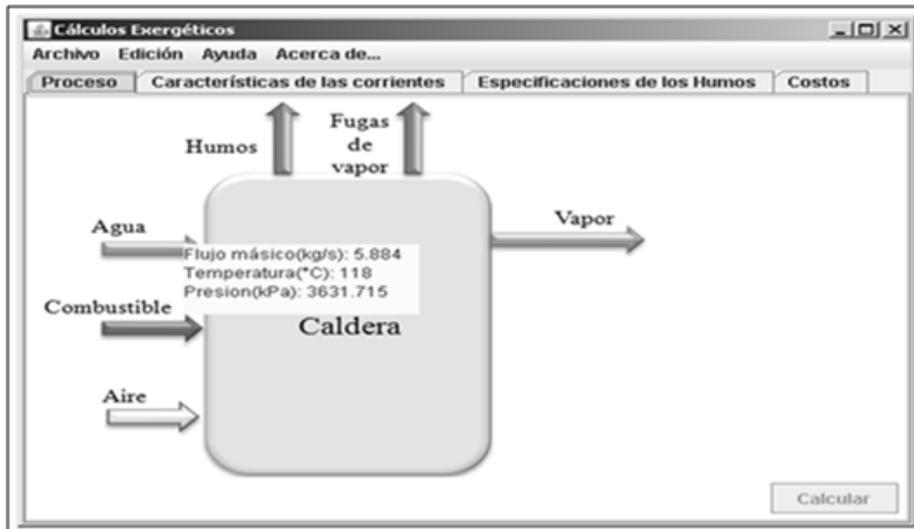


Figura 3: Interfaz gráfica de la herramienta.

	Flujo(kg/s)	Presión (kPa)	Temperatura(°C)	Tipo de Combustible
Agua	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Metano ▼
Combustible	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Vapor	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Humos	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Fugas	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

Limpiar

Aceptar Cancelar

Figura 4: Pantalla a través de la cual se introducen los datos de entrada.

Así, la Figura 3 muestra la interfaz de usuario según el proceso en estudio, permitiendo la identificación de cada una de las corrientes. En ese sentido, en la pantalla “características de las corrientes”, el usuario puede seleccionar el combustible en cuestión y deberá introducir el flujo másico (kg/s), la presión (kPa) y la temperatura (°C) según se muestra en la Figura 4.

Destacando que, como especificación de los humos se requiere conocer además de los datos descritos, su composición molar, para lo cual se dispone de la pestaña “Especificaciones de los Humos”, según se observa en la Figura 5.

Por otra parte la estimación del costo unitario

del vapor (\$/kWh) y el costo por unidad de tiempo (\$/h), requiere el suministro del costo unitario del combustible y el costo asociado a la construcción y operación de la caldera. Se dispone de un convertidor monetario que permite introducir y obtener los resultados en bolívares, dólares o euros según lo requiera el usuario.

Una vez introducida la data, el software estima para cada corriente la exergía específica en kJ/kg, la exergía de flujo en kJ/s, así como, la exergía destruida en el proceso en kJ/s, la eficiencia exergética en porcentaje y el costo exergético unitario y por unidad de tiempo según el reporte de la Figura 6.



Figura 5: Interfaz que permite introducir la composición de los humos.

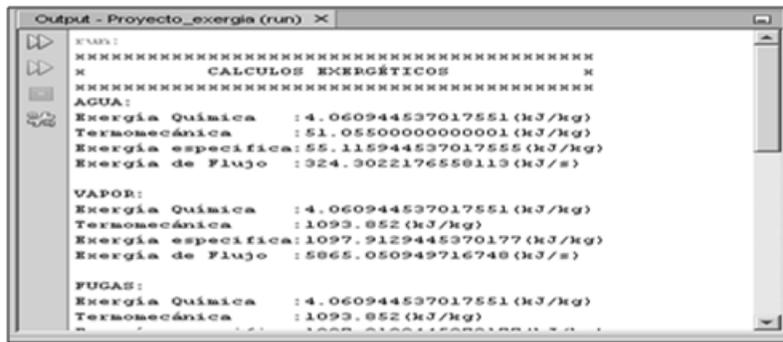


Figura 6: Reporte de resultados obtenido a partir de la herramienta.

Tabla 1: Datos de entrada empleados en la herramienta.

	Flujo másico (kg/s)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
Agua	5,884	3631,715	118
Combustible	0,365	101,325	25
Aire	7,159	101,325	25
Vapor	5,342	3296,335	330
Humos	7,524	101,325	251
Fugas (si aplica)	0,542	3296,335	330

Composición molar de los Humos	
y[CO ₂]:	0,080112
y[CO]:	1,427 132 × 10 ⁻⁴
y[O ₂]:	0,073455
y[N ₂]:	0,685779
y[H ₂ O]:	0,160510

En cuanto a los resultados obtenidos empleando la herramienta desarrollada no se evidencia desvia-

ción significativa con respecto a las estimaciones realizadas a través de una hoja de cálculo convencional en Excel como se refleja en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

4. Conclusiones.

El desarrollo de esta herramienta, implica contar con un elemento técnico que facilita la gestión de la energía como recurso importante, permitiendo la estimación de la eficiencia exergética del proceso de generación de vapor de una forma rápida, y a partir de datos que pueden ser obtenidos fácilmente del proceso que se quiera analizar, sin necesidad que el usuario determine las propiedades relativas a los modelos utilizados dado que el software cuenta con las tablas de propiedades pertinentes para su uso. Así mismo, el

Tabla 2: Resultados obtenidos a través de hoja de cálculo convencional en Excel.

	Exergía Química (kJ/kg mezcla)	Termomecánica (kJ/kg mezcla)	Exergía Específica (kJ/kg mezcla)	Flujo (kg/s)	Exergía de Flujo (kJ/s)
AGUA	4,061	51,055	55,116	5,884	324,302218
VAPOR	4,061	1093,852	1097,913	5,342	5865,05095
FUGAS	4,061	1093,852	1097,913	0,542	595,068816
METANO	51980,000	0	51980,000	0,365	18972,7
AIRE	0	0	0	7,159	0
HUMOS:					
Mezcla de gases presentes en el amb.	633,081583	803,017281	1437,3918	7,524	10814,9359
Aporte de Monóxido	1,292939				

Tabla 3: Resultados obtenidos a través de la herramienta diseñada.

	Exergía Química (kJ/kg mezcla)	Termomecánica (kJ/kg mezcla)	Exergía Específica (kJ/kg mezcla)	Flujo (kg/s)	Exergía de Flujo (kJ/s)
AGUA	4,060944	51,055000	55,115944	5,884	324,302217
VAPOR	4,060944	1093,852	1097,912944	5,342	5865,050949
FUGAS	4,060944	1093,852	1097,912944	0,542	595,068815
METANO	51980,0	0	51980,0	0,365	18972,7
AIRE	0	0	0	7,159	0
HUMOS:					
Mezcla de gases presentes en el amb.	633,081582	803,0172805	1437,391803	7,524	10814,935927
Aporte de Monóxido	1,292939				

reporte de resultados obtenidos es suficientemente detallado como para que el usuario pueda analizar los flujos exergéticos involucrados, y establecer relaciones entre la exergía útil y la destruida en el proceso, lo cual favorece la toma de decisiones a la hora de optimizar el proceso o incluso en el caso que se requiera efectuar un diseño.

Paralelamente, el apartado correspondiente al costo unitario del vapor y al costo por unidad de tiempo, otorga una perspectiva realista al concepto de exergía y le brinda al usuario la oportunidad de conocer por un lado el costo en términos de transferencia de exergía y por otro lado, en términos monetarios, el costo del producto en el proceso.

Referencias

- [1] M. Moran, y H. Shapiro. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Editorial Reverté. España, 2005.
- [2] J. Costa. *Aplicación de la Termoeconomía a la Ecología Industrial de Kalundborg*. Trabajo de Grado

de Master en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2011.

- [3] V. Hurtado. *Propuesta de un sistema de gestión para la Conservación de la energía basado en los Potenciales de ahorro en la industria Manufacturera*. Trabajo de Grado, Maestría en Administración de Empresas, Mención Gerencia, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2010.
- [4] FEDEUPEL, *Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales*, Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Caracas, Venezuela, 2011.
- [5] Y. Cengel y M. Boles. *Termodinámica*. Editorial Mc Graw Hill. México, 2012.
- [6] J. Mariani. *Apuntes de Termotecnia IV. Termoeconomía I*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2013.
- [7] S. De Oliveira. *Exergy. Production, Cost and Renewability. Series Green Energy and Technology*. Editorial Springer, 2013.