

Límites en el Uso de Balances de Exergía en los Sistemas de Cogeneración

Jorge R. Pisa¹, Carlos Agüero¹ y Roberto L. Andina¹

(1) Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán

Resumen

El balance exergético de un proceso de cogeneración de Fuerza Motriz (o Energía Eléctrica) y vapor para procesos industriales de calefacción (calentamiento, evaporación, cocimiento, destilación, etc), resulta útil cuando se trata de optimizar las instalaciones. No obstante, para evaluar los probables beneficios, es necesaria la comparación de los balances energéticos globales del proceso.

En este trabajo, se toman como ejemplos dos casos:

a) Análisis de las pérdidas de exergía debidas a la caída de presión en la tubería que conduce vapor desde la caldera hasta la turbina y la incidencia de la reducción de las mismas en las necesidades energéticas del sector de calefacción.

b) Análisis de un sistema de evaporación de múltiples efectos con extracciones de vapor para calefacción de jugo.

De este estudio se concluye que considerar solamente el balance exergético para valorar los beneficios de las modificaciones propuestas en estos casos, puede conducir a confusiones en la interpretación de los resultados o resultar un trabajo superfluo.

Palabras claves: costos exergéticos, fuerza motriz, calor.

Limits in the Use of Exergy Balances in Cogeneration Systems

Abstract

The exergetic balance of a cogeneration process of driving force (or electric power) and steam for the industrial processes of heating (heating, evaporation, boiling, distillation, etc), is useful when the purpose is to optimize the facilities. However, it is necessary the comparison of the whole energy balances of the process in order to evaluate the probable benefits.

Two cases are taken as examples in this work:

a) Exergy loss analysis due to the pressure drop in the pipe that carries steam from the boiler to the turbine and the incidence of exergy reduction on the energy needs of the heating sector.

b) Analysis of a system of evaporation of multiple effects with extractions of vapor for juice heating.

It is concluded from this study that considering just the exergy balance to value the benefits of the modifications proposed in these cases, could lead to confusion in the interpretation of the results or result in a superfluous work.

Key words: exergetic costs, driving force, heat.

Introducción

Actualmente se habla mucho de "cogeneración", o sea la generación simultánea de fuerza motriz y energía para calefacción de procesos lo que nos ha llevado a pensar que podría resultar útil recordar que los balances exergéticos puros a veces no son los más adecuados para el análisis

de ciertos problemas de uso y transformación de energías en los sistemas de cogeneración.

Concepto y su aplicación

Todos los procesos naturales son irreversibles. **Baehr** (1965), **Haug** (1966).

Sabemos que en los procesos de transformación de energía las irreversibilidades producen una degradación de la misma, reduciendo de ese

modo su capacidad de producir un trabajo útil. El concepto de exergía nos permite evaluar cuantitativamente esa degradación.

El balance de exergía de un sistema, como el de figura 1 que entrega trabajo técnico nos indica:

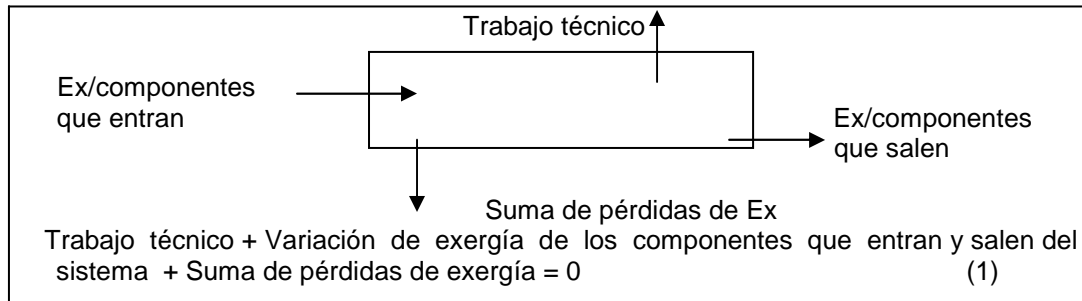


Fig. 1 Balance de exergías

Los componentes son: I) Fluido motriz (combustible, vapor, gases calientes, etc.); II) Fluido procesado (Producto diluido, producto concentrado, productos con diferentes temperaturas o fases, etc.).

Esta ecuación solo puede resolverse cuando previamente se hizo un balance energético del sistema, del que se obtienen los parámetros termodinámicos necesarios para el cálculo de las exergías correspondientes y que además permite comprobar que estén satisfechos los requerimientos de energía del proceso.

El balance exergético de un proceso de transformación de energías es una excelente herramienta crítica, porque al evaluar cuantitativamente las irreversibilidades nos indica donde tenemos las mayores pérdidas, las que potencialmente podrían recuperarse como energía mecánica o eléctrica (EM, EE), o eventualmente como una reducción del fluido motriz aportado.

El concepto de exergía específicamente nos ayuda a definir las mejoras a introducir en un proceso para alcanzar un mayor aprovechamiento de la energía motriz o primaria y por lo tanto es de gran utilidad en los análisis de optimización en sistemas de transformación de energías, fundamentalmente de calor en trabajo.

La EM o EE concretamente recuperable, o la reducción efectiva de fluido motriz aportado pueden ser cuantificados para un dado proceso de cogeneración directamente a partir de la comparación de los balances energéticos de dos esquemas factibles del mismo proceso. El primero, inicial o propuesto y el segundo el que incluye las mejoras detectadas como posibles al analizar el primero.

Estos parámetros también se pueden determinar a partir de la comparación de los balances exergéticos correspondientes a los

dos esquemas mencionados, de la siguiente manera:

- a) La variación del consumo del fluido motriz, la obtenemos calculando la variación de la exergía motriz aportada a los sistemas, referida a la exergía específica de dicho fluido.
- b) La EM o EE que se recupera, o pierde respectivamente, se evalúa calculando el aumento o disminución del trabajo técnico obtenido.

Precauciones a tener en cuenta

El querer extender el uso del concepto de exergía a aplicaciones que no son las específicas, si bien nos permite resolver el problema, a veces nos introduce en trabajos engorrosos e innecesarios. También algunas simplificaciones, como por ejemplo la de asociar el flujo de exergía con potencias eléctricas equivalentes, nos pueden llevar a análisis superficiales que podrían conducirnos a calcular beneficios económicos que no siempre son fácilmente alcanzables, como veremos a continuación:

Caso A:

Si del análisis del balance exergético de un proceso de cogeneración surge la posibilidad de reducir una pérdida de exergía, potencialmente hay una ganancia en EE equivalente a la reducción de esa pérdida, pero nada se puede decir respecto del beneficio económico que resultaría de dicha reducción, mientras no se constate la factibilidad energética de la nueva alternativa y se puedan comparar los resultados, lo que como dijimos requiere la resolución de los balances de

energías de ambas propuestas, de donde según vimos obtenemos los parámetros necesarios para completar el estudio técnico y económico, sin que sea necesario el trazado de los balances exergéticos de ambas alternativas.

Consideremos un caso concreto: Analicemos el efecto de la reducción de la caída de presión en

la cañería que conduce el vapor desde la caldera hasta la turbina en una instalación simplificada de cogeneración, como la de figura 2, típica de un ingenio azucarero. **Agüero** (2006).

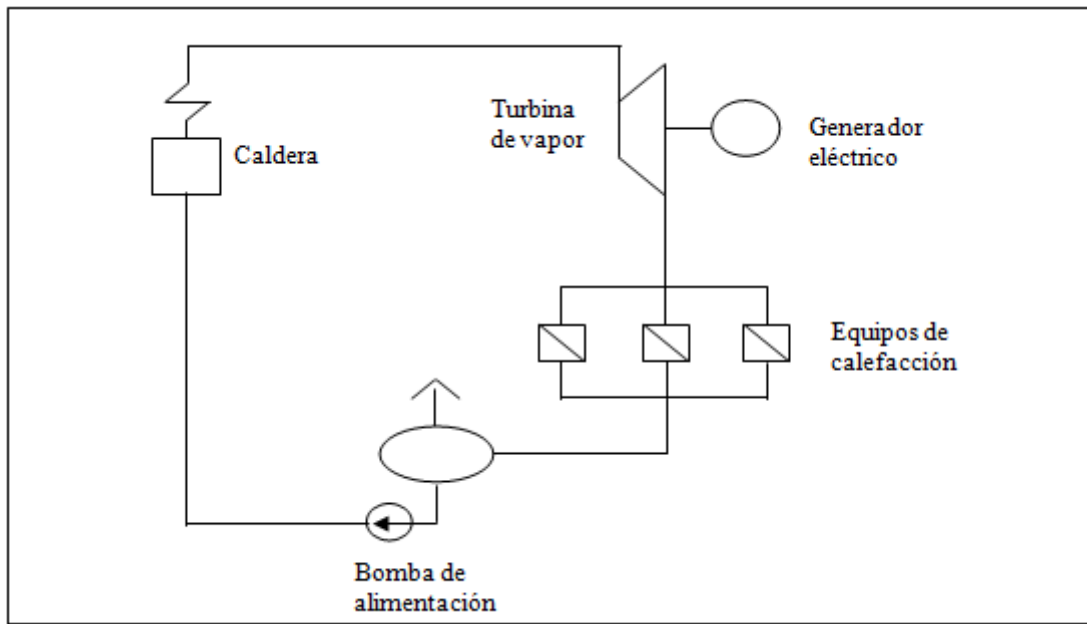


Fig. 2 Esquema de la instalación básica de una fábrica de azúcar

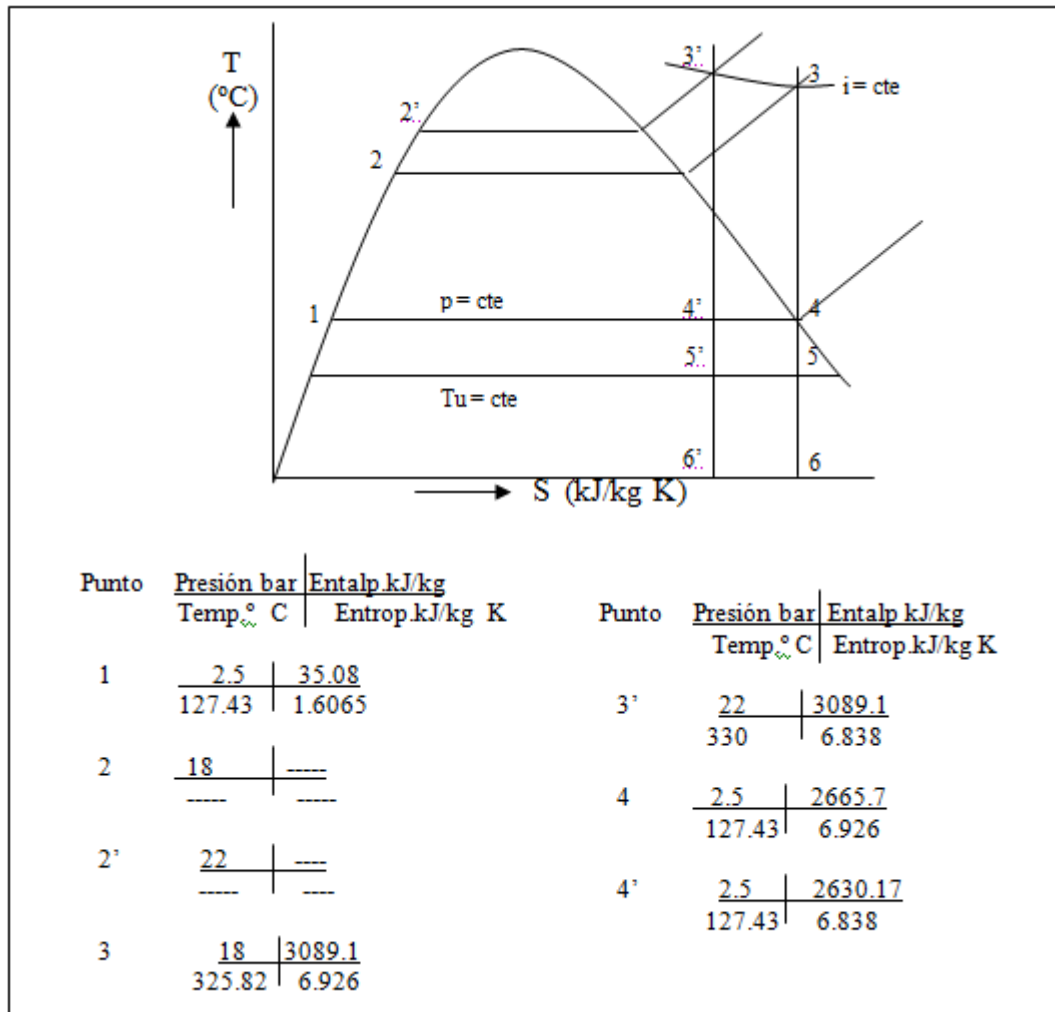


Fig. 3 Esquema del diagrama T – S

El análisis puramente exergético nos indica que la reducción de esa caída de presión, representa potencialmente una ganancia en EE igual a la reducción de la pérdida de exergía debida a esa caída de presión, $(T_u \times S)$, lo cual es correcto. Pero veremos que se requiere un análisis energético global del proceso de cogeneración para saber como hacer efectivo este beneficio. Suponemos para simplificar el estudio, que la transformación en la turbina es isoentrópica, los equipos son ideales o sea tienen rendimientos termodinámicos del 100 % y que la única irreversibilidad es la que corresponde a la caída de presión en la cañería objeto del análisis. En el diagrama T-S, como el de figura 3, se ve fácilmente que la reducción en la caída de presión en la cañería, (paso de 3 a 3'), produce un incremento del trabajo en la turbina igual al área (4', 4, 6, 6'), por cada kg de vapor que pasa por ella. Pero al analizar globalmente el proceso, advertimos que aparece un déficit en la parte de calefacción igual a la misma área. Para cubrirlo tenemos diferentes opciones:

Podríamos transformar toda la EE que hemos ganado en la turbina en calor con lo que no habrá ningún beneficio económico.

Lo mismo ocurrirá si decidiéramos producir ese calor a partir de una caldera, generando vapor a las condiciones a la que funcionaría el equipo de calefacción, ya que consumiríamos la misma energía expresada ahora en combustible, con lo que la ganancia sería nula.

Por último al mismo resultado llegaríamos si decidiéramos producir un plus de vapor que pase por la turbina y permita entregar el primitivo flujo de calor al equipo de calefacción.

El incremento en el flujo de vapor sería de:

$$\Delta vapor = (i_4 - i_1) / (i_{4'} - i_1) = 1,01696 \text{ kg vapor/kg vapor}$$

El incremento de EE resulta:

$$1.01696 \times (3089.1 - 2630.17) - (3089.1 - 2665.7) =$$

$$= 43.31 \text{ kJ/kg.}$$

El incremento de aporte de calor en la caldera:

$$0.01696 \times (3089.1 - 535.08) = 43.31 \text{ KJ/kg.}$$

Se ve que por el adicional de EE que se obtiene, en todos los casos analizados se debe aportar en la caldera la misma cantidad de calor en combustible. O sea que ninguno implica una mejora en el aprovechamiento energético.

Únicamente podremos alcanzar un beneficio si aportamos el déficit del calor de calefacción a partir de energía que no tiene un costo adicional en combustible. Por ejemplo mediante un turbocompresor que recomprima el vapor vegetal del calefactor, consumiendo para eso solo una parte de la EE adicional que se había obtenido (Trabajo de compresión: área (4', 4, 5, 5')). Quedando de este modo satisfechos todos los requerimientos energéticos del proceso con una ganancia de EE igual al área (5, 6, 6', 5') por cada kg de vapor, sin que sea necesario incrementar el aporte de combustible.

Vemos que el balance exergético solo, no completa el análisis del proceso y por lo tanto del mismo no se puede deducir la magnitud del beneficio económico que se podría obtener, puesto que el beneficio por la mayor generación de EE, no solo debe confrontarse con la inversión específica para reducir la pérdida de exergía, sino también con la necesaria para permitir que el sistema pueda seguir desarrollándose.

Un caso similar se presenta al comparar las pérdidas de exergía durante el calentamiento de un fluido en una etapa o en varias con menores saltos de temperatura. Si la energía para cada etapa se obtiene directamente a partir de un combustible, el consumo del mismo sería prácticamente igual en ambos casos. Al igual que en el ejemplo anterior, el ahorro de combustible lo obtendremos en la medida que usemos para las diferentes etapas, energías que no tengan costo externo.

Como fuentes de energía que no tienen costo en combustible podemos indicar por ejemplo, el uso de la energía acumulada en el sistema de referencia (anergia), revaluada mediante un turbocompresor o una bomba de calor. También a partir de energías que en los procesos por el aumento de entropía debido a las irreversibilidades, quedan disponibles para ser reusadas, como ser el caso de los vapores vegetales en un múltiple de evaporación.

Caso B:

Analicemos ahora un ejemplo que se refiere a la otra situación planteada: Deseamos calcular la

variación de consumo del fluido motriz (vapor en este caso), de dos esquemas de calentamiento y evaporación de una misma cantidad de jugo para un ingenio azucarero.

Tomamos los esquemas de figura 13 y figura 14 del boletín N° 137 publicado por la Estación Experimental Obispo Colombres (EEOC) con el título de "El Concepto de Exergía y su Aplicación a la Industria Azucarera", Vallejo (1982), que corresponden precisamente al problema que deseamos analizar. En ellos se evalúan la reducción del consumo de vapor motriz y las pérdidas totales de exergía para dos esquemas de calentamiento y evaporación de jugo cuando se calientan previamente o no, los jugos primarios y secundarios antes de mezclarlos con los jugos recirculados, usando los vapores vegetales del múltiple. En los esquemas mencionados, están indicados los flujos de vapor y jugo con sus respectivas entalpías que cierran el balance energético y las exergías correspondientes calculadas con los parámetros anteriores; con estas últimas se evalúan las pérdidas totales de exergía de ambos esquemas planteados.

En las figura 4 y figura 5, se resumen los valores más importantes de cada uno de los esquemas. De ellas se obtienen los consumos de vapor, que para la figura 4, que corresponde al esquema de figura 13 del boletín, es de 1.416 kg, y para la figura 5, correspondiente al de la figura 14, de 1.2794 kg. con lo cual es: $G_v = 0.137 \text{ kg.}$, quedando así el problema resuelto.

Este valor, como dijimos, también puede obtenerse mediante el balance exergético. A partir del conocimiento de las pérdidas de exergía y de las exergías de los jugos, condensados y vapores vegetales, resolviendo la ecuación (1) podemos calcular la exergía requerida del vapor motriz para cada esquema. Conforme a lo expresado anteriormente, con los datos de figura 4, resulta:

$$\begin{aligned} \text{Exergía del vapor motriz} &= \\ 354.90 + 473.82 + 163.09 + 212.04 - 322.90 &= \\ 880.95 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Con los datos del esquema de figura 5, resulta:

$$\begin{aligned} \text{Exergía del vapor motriz} &= \\ 354.71 + 429.87 + 134.36 + 199.90 - 322.90 &= \\ 795.94 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Siendo la exergía específica del vapor motriz, (igual en ambos casos), $ex = 622.69 \text{ kJ/kg}$, resulta:

$$\begin{aligned} \Delta G_v &= (880.95 - 795.94) / 622.69 = 0.1365 \text{ kg.}, \\ \text{Igual resultado que el obtenido anteriormente.} \end{aligned}$$

Evidentemente obtener este resultado a partir del análisis exergético, es más complicado, además como dijimos anteriormente, para conocer las exergías y las pérdidas correspondientes, hay que resolver previamente el balance energético, a partir del cual, como lo hemos visto, la solución del problema es inmediata. O sea que este método exergético,

para el caso del problema analizado, carece de toda practicidad.

Pensamos que las situaciones planteadas aclaran el objetivo de estas notas, que bajo ningún concepto tienden a desvirtuar este importante concepto de exergía, sino que simplemente trata de "acotar" su campo de aplicación.

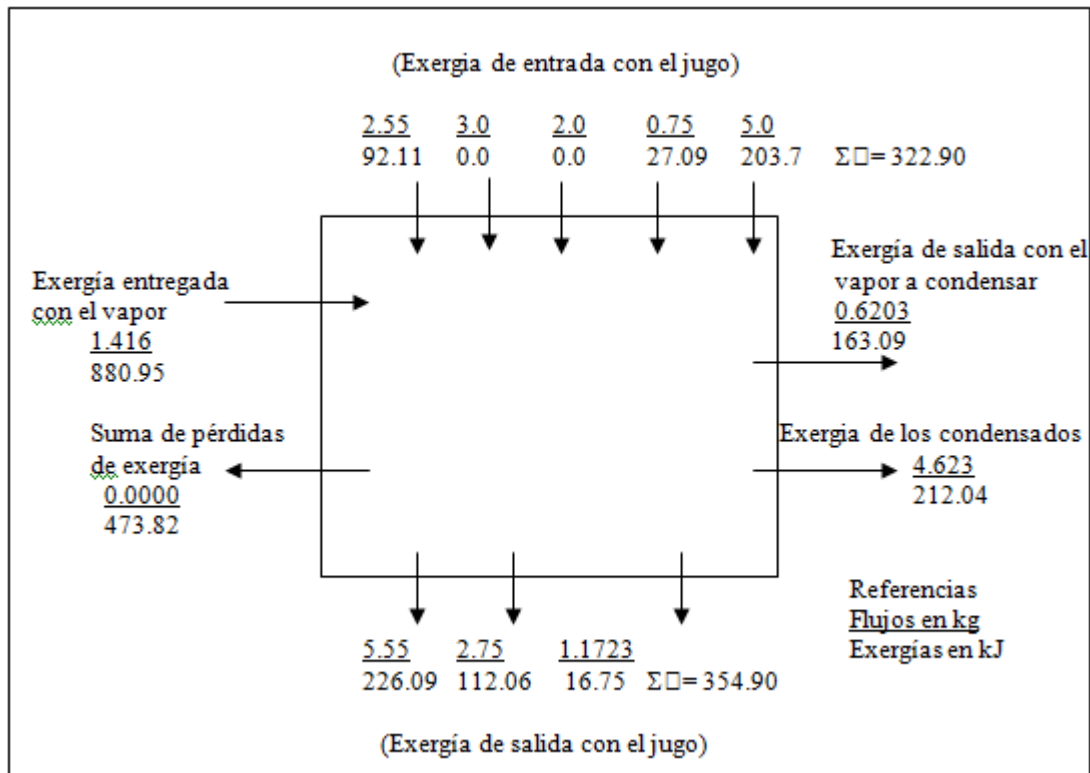


Fig. 4 Resumen de valores del esquema de figura 13

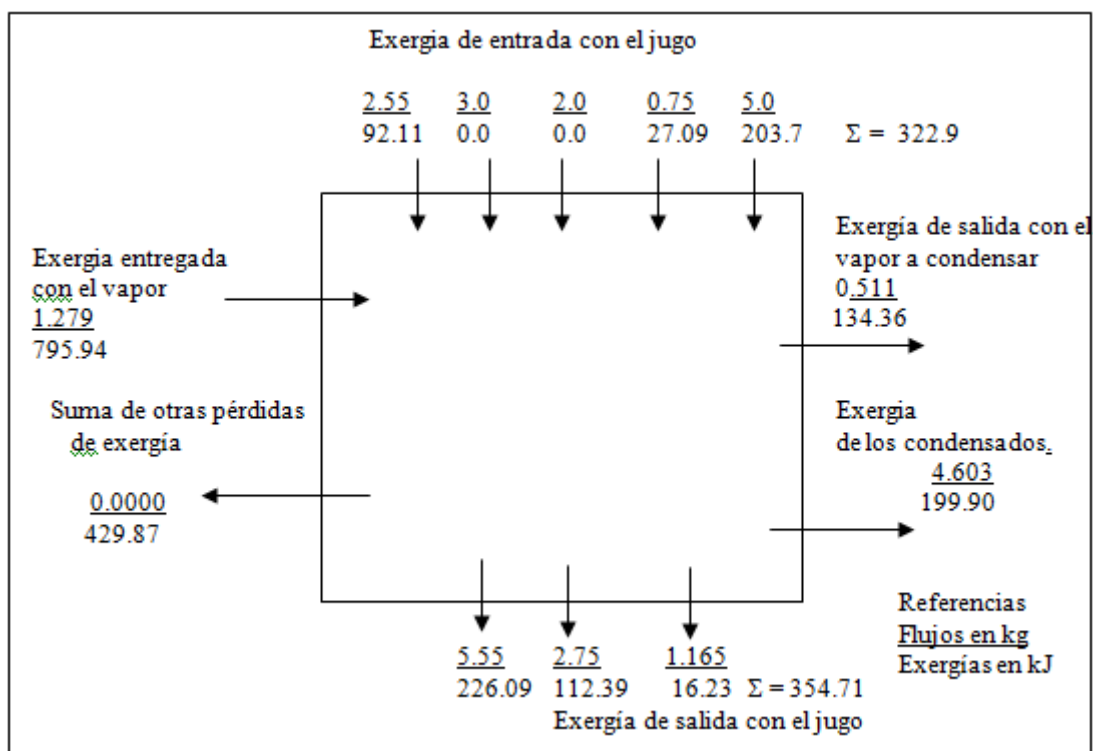


Fig. 5 Resumen de valores del esquema de figura 14

Referencias

Agüero, C. J., Pisa, J. R., Andina, R. L. (2006) "Consideraciones sobre el aprovechamiento racional del bagazo de caña como combustible", Revista cet de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la U.N.T., N° 27, pp. 15-21.

Baehr, H. D. (1965) *Tratado Moderno de Termodinámica*, José Montesó, Barcelona, España.

Haug, C. J. (1966) "Análisis de las transformaciones energéticas y de las pérdidas de energía por medio de la exergía con referencia a la Industria Azucarera", Publicación de la Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas Y Tecnología, Departamento de Mecánica.

Vallejo, E. V. (1982) "El concepto de exergía y su aplicación a la Industria Azucarera", Publicación de Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombes", N° 137, Tucumán, Argentina.

Este artículo fue escrito durante el 2º semestre del año 2009, en el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán.

Jorge R. Pisa

Ingeniero Mecánico, egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de esa Universidad desde el año 1976. Actualmente es Profesor Asociado de la Cátedra "Generadores e Instalaciones de Vapor" del Dpto. de Mecánica. Desarrolló 15 años de actividad profesional en el Ingenio La Fronterita, en el área energética. Realiza trabajos a terceros en el sector industrial azucarero, citrícola y del tabaco. E-mail: jpisa@herrera.unt.edu.ar.

Carlos J. Agüero

Ingeniero Mecánico, egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de esa Universidad desde el año 1965. Actual Profesor Asociado, semidedicación, de la Cátedra "Turbinas de Vapor (Turbomáquinas)" del Dpto. de Mecánica. Desarrolló actividad profesional en la Industria Azucarera de Tucumán en el área de mediciones, ensayos y balances térmicos y también en control automático de procesos. Jefe del Departamento de Instrumentación y Control Automático de la Cía. Azucarera Concepción S.A. hasta Mayo de 2005. E-mail: caguero@herrera.unt.edu.ar

Roberto L. Andina

Ingeniero Mecánico, egresado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán en el año 1975. Ejercicio de la docencia universitaria desde 1977 hasta la fecha en las asignaturas siguientes: Profesor Adjunto de "Generadores e Instalaciones de Vapor", "Turbinas de Vapor" y "Laboratorio de Máquinas II y III" del Dpto. de Mecánica de esta Facultad y Jefe de Trabajos Prácticos en "Diseño de Instalaciones Térmicas" del Dpto. de Mecánica de la Facultad Regional Tucumán de la UTN. En la actividad profesional, se desempeña en asesoramientos técnicos en la Industria del Noroeste Argentino, con participación en diferentes proyectos de instalaciones térmicas. E-mail: randina@herrera.unt.edu.ar