

ENFOQUE EXERGÉTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LA ENERGÍA EN LA INDUSTRIA

G. CARRILLO*, C. CÁRDENAS**, W. BONILLA***

* Ingeniero Electricista – UIS, Ph.D. Ing. Industrial UPCO, Madrid. Profesor UIS.
Grupo de Investigación en sistemas de energía eléctrica – GISEL-UIS.
gilberto@uis.edu.co

** Ingeniero Electricista – UIS. Magíster en Ingeniería (Área Ing. Eléctrica) UIS. Especialista en Gerencia para Ingenieros – UPB.

carloscardenas@genecol.biz
*** Ingeniero Electricista – UIS.
wibo22@hotmail.com

Fecha Recepción: 26 de Septiembre de 2006
Fecha Aceptación: 18 de Octubre de 2006

RESUMEN

En este artículo se propone una metodología para realizar auditorías exergéticas como soporte a un plan de uso racional y eficiente de la energía (URE). Como herramienta de validación de la metodología se presenta su aplicación en un sistema de bombeo del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), Colombia.

Palabras claves: *Uso racional y eficiente de la energía (URE), Sistema de bombeo, Auditoría exergética, Costo exergético, Procesos irreversibles*

INTRODUCCIÓN

Debido al alto costo de la energía eléctrica y al deterioro del medio ambiente se deben tomar acciones que disminuyan el uso inadecuado de los recursos naturales. Para esto, entre muchas otras acciones, se deben identificar y tratar de corregir las ineficiencias en los procesos productivos.

De lo anterior surge la necesidad de proveer un conocimiento más estricto del consumo de energía, y por ello, adoptar e implementar un procedimiento o metodología sistemática. La cual consiste en diagnosticar, evaluar y analizar los flujos de energía en los elementos del sistema en estudio desde la óptica del *análisis termoeconómico*. Este trabajo prevé mostrar la *termoeconomía* como una herramienta para cuantificar el impacto energético en los sistemas de bombeo y evaluar el uso eficiente de la energía mediante un balance exergético.

La estructura del artículo se ha determinado de la siguiente forma: primero, se muestran algunos conceptos asociados a la termodinámica; luego se presenta la metodología adoptada para la auditoría exergética; acto seguido, se describe la implementación de la misma; posteriormente, se establecen algunas recomendaciones; y por último, se describen algunas conclusiones.

CONCEPTOS

Auditoría exergética

Actividad de evaluación que inspecciona los flujos de exergía involucrados en cada una de las partes de cualquier sistema o proceso, dependiendo del nivel de agregación requerido, con el fin de conocer la forma en que se administra la energía y qué parte de ésta es útil^[1].

Balance exergético

El balance de exergía permite localizar las pérdidas o irreversibilidades^[1,2,3]. Un primer paso, en la investigación de los posibles ahorros de energía es estudiar donde aparecen las irreversibilidades y relacionarlas con el efecto que tienen en el consumo de recursos^[4].

Eficiencia en la teoría de producción

Al resultado final de un proceso productivo se le llama producto, y a los recursos disponibles, insumos^[3].

Si se tiene el propósito de producción de un proceso (producto P) y los recursos disponibles consumidos (insumo F), ambos valorados por su exergía, entonces se cumplirá la ecuación 1:

$$F - P = I > 0 \quad (1)$$

Donde I representa la cuantificación de la irreversibilidad del proceso en términos de exergía destruida.

El rendimiento termodinámico viene dado por la ecuación 2:

$$n_i = \frac{P_i}{F_i} \leq 1 \quad (2)$$

Exergía

Máxima cantidad de trabajo que un subsistema puede hacer sobre sus alrededores hasta alcanzar el equilibrio termodinámico en forma reversible^[4].

Nivel de agregación

Se interpreta como la colección de equipos y sus relaciones, que constituyen el sistema total. El nivel de agregación depende del tipo y profundidad del análisis y de la cantidad de medidas disponibles, permitiendo separar la irreversibilidad total del sistema en tantas componentes como equipos se consideren^[2].

Pérdidas

Son los flujos que salen de un componente y del sistema (sin ser objeto de producción o posible utilización en posteriores procesos). Están eliminadas sin necesitar un consumo adicional de recursos^[2].

Residuos

Son los materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado ningún valor comercial, en el contexto en el que son generados^[2].

Subproductos

Son los flujos físicos que pueden ser útiles en otros procesos debido a su contenido de exergía, pero que no son el principal propósito de producción del sistema^[1,2].

Sistema

Entidad compuesta por un conjunto de componentes y las relaciones entre ellos y con su entorno. Se le representa por un grafo dirigido, abierto y de longitud finita, donde cada flujo conecta un par de equipos^[4].

Termoeconomía

Conexión entre termodinámica y economía, sienta las bases teóricas de una ciencia del ahorro de energía, y obtiene así modelos que recogen la limitación que supone no disponer de una cantidad ilimitada de recursos, busca criterios generales que permitan evaluar la eficiencia y el costo de los productos en sistemas de alto consumo de energía^[1,2].

Teoría del costo exergético

El denominado costo exergético no corresponde a dinero, sino a una cuantificación energética expresada en la forma en que se hace la contabilidad de costos. En los procesos energéticos complejos, la estructura del sistema juega un papel predominante a la hora de estudiar su eficiencia y sus costos^[1,2].

ANÁLISIS TERMOCÓNOMICO

A continuación se presentan los pasos para realizar un análisis termoeconómico, a partir de la teoría de costo exergético.

1. Formación de la matriz de incidencia: Esta matriz muestra las relaciones entre los n componentes de un sistema a través de m flujos, la cual se conoce como matriz $[A]$. Sus elementos representan los flujos que entran y salen de los equipos de la siguiente forma:

$$a_{ij} = 1 \text{ si el flujo } i \text{ entra al elemento } j \quad (3.a)$$

$$a_{ij} = -1 \text{ si el flujo } i \text{ sale del elemento } j \quad (3.b)$$

En estado estacionario permite expresar los balances de materia, energía y exergía de la siguiente manera, ver ecuaciones 4, 5 y 6:

$$[A]*[M] = 0 \text{ (Flujo de materiales)} \quad (4)$$

$$[A]*[H] = 0 \text{ (Flujo de energía)} \quad (5)$$

$$[A]*[B] = I \text{ (Flujo de exergía)} \quad (6)$$

Donde M , H y B son vectores ($m \times 1$) que contienen la masa, energía y exergía de cada uno de los flujos. El elemento i -ésimo del vector I ($n \times 1$) representa la exergía destruida en dicho componente debido a irreversibilidades asociadas. A partir de matrices de incidencia 4, 5 y 6 se pueden encontrar otras matrices para los flujos insumos $A_{i(n \times m)}$ y los flujos

productos $A_{p(n \times m)}$, tales que cumplen las ecuaciones 7, 8 y 9:

$$[A_f] - [A_p] = A \quad (7)$$

$$[A_f] * [B] = F \quad (8)$$

$$[A_p] * [B] = P \quad (9)$$

Siendo F y P vectores $(n \times 1)$, cuya componente i -ésima contiene la exergía del insumo F_i y de producto P_i , respectivamente.

2. Asignación de costo exergético: Se denomina costo exergético (B^*) de un flujo físico, a la cantidad necesaria de exergía para producirlo. El costo exergético unitario corresponde al costo exergético de un flujo por unidad de exergía como se observa en la ecuación 10, así:

$$K_{i^*} = \frac{B_{i^*}}{B_i} \quad (10)$$

De forma general, el sistema de ecuaciones para determinación de los costos exergéticos se puede observar en las ecuaciones 11, 12, 13 y 14:

$$[Aa] * [B^*] = [Y^*] \quad (11)$$

$$[B^*] = [Aa]^{-1} * [Y^*] \quad (12)$$

$$[Aa] = \begin{pmatrix} A \\ \frac{ae}{ax} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$[Y^*] = \begin{pmatrix} -Z \\ \frac{we}{0} \end{pmatrix} \quad (14)$$

El vector $Y^*(m \times 1)$ contiene los valores de las asignaciones de recursos externos. Este vector puede expresarse tanto en términos de exergía y económicos ^[1,2].

3. Costos exergoeconómico: El cálculo del costo económico de los flujos constituye un problema de capital importancia, por cuanto está ligado de manera directa con la repercusión de los costos de producción a las distintas componentes que

constituyen el proceso productivo, y en consecuencia, a la asignación correcta de los costos de los productos finales.

El costo exergoeconómico de un flujo se considera como la suma de dos contribuciones: la primera que procede del costo monetario de la exergía de los recursos de la planta, su costo exergético, y la segunda que engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo asociado a su obtención, tales como costos de amortización, operación y mantenimiento ^[1,2].

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ADOPTADA PARA AUDITORÍA EXERGÉTICA

La estrategia más común para inspeccionar, diagnosticar y evaluar el uso y control eficaz de la energía eléctrica ha sido a través de las *auditorías energéticas*. No obstante, al momento de identificar oportunidades de ahorros más detalladamente se hace necesario recurrir a alternativas diferentes que ofrezcan mayor grado de análisis, por esto se ha acudido a la teoría exergética. Es importante tener presente que la realización de una *auditoría exergética* se expone como una etapa previa para la elaboración de un Programa URE (P-URE).

A continuación se presenta la implementación de la metodología al proceso productivo correspondiente a un sistema de bombeo del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB. Teniendo como objetivo diagnosticar el estado de funcionamiento del sistema; y seguidamente, proponer alternativas de solución:

1. Recolección de información técnica y características del sistema: En esta etapa se recolecta la información necesaria acerca del proceso, tal como: planos, ciclo de operación, programas de mantenimiento, operarios, tiempo en operación de los equipos y contrato de tarificación de la energía eléctrica.

2. Identificación de los centros energéticos del proceso: Con base en la información anterior y los requerimientos del cliente se determina claramente cada uno los elementos que transforman, distribuyen y consumen energía.

En la Figura 1 se muestra el diagrama general de conexión del sistema de bombeo1, caso de este artículo. El cual consta de un transformador de

1 Sistema de bombeo Bosconia en la ciudad de Bucaramanga- Colombia

energía eléctrica, conductores de cobre aislado, tres unidades de bombeos (cada una compuesta por un motor mas una bomba), este sistema surte de agua a dos tanques de almacenamiento ubicados en diferentes puntos geográficos y diferentes características, para efecto de este artículo se ha optado por nombrarlos *tanque A2* y *tanque B3*.

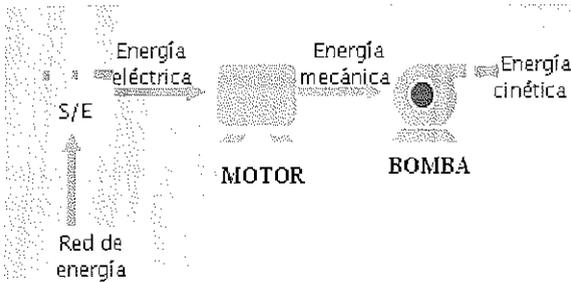


Figura 1. Diagrama general de conexión de sistema de bombeo.

5. Identificación de los flujos del sistema: De la Figura 2 se obtienen los flujos en cada uno de los elementos, teniendo en cuenta lo establecido en las ecuaciones 3a y 3.b. Con base en esto se forma la matriz de incidencia, base fundamental para el tratamiento termoeconómico [5].

6. Realización de mediciones de flujos exergéticos: Acorde a las necesidades y requerimientos técnicos se realizan las mediciones (ver detalle de medidas en [5]) de las variables en los elementos en diferentes puntos, en la Tabla 1 se observa cada componente y las variables medidas para este caso.

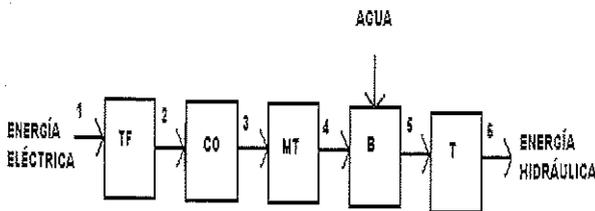
Una vez realizadas las mediciones se procede a realizar los cálculos de los valores de exergía.

Tabla 1. Variables identificadas para medición exergía.

COMPONENTES DEL SISTEMA	VARIABLE MEDIDAS
Transformador y conductores	Tensión, corriente, factor de potencia y potencia activa de entrada y salida
Motor	Potencia activa de entrada, potencia mecánica de salida
Bomba	Caudal y presión a la salida (potencia hidráulica)
Tubería	Caudal a la salida (potencia hidráulica)

3. Obtención del esquema de producción: A partir de la Figura 1 se obtiene el diagrama causal del proceso en general, tal como se observa en la Figura 2 donde 1, 2, 3, 4, 5, 6 y TF, CO, MT, B, T hacen referencia a los flujos de exergía y elementos de la siguiente manera:

- Flujo 1: Flujo de entrada del sistema global (*insumo*)
- Flujo 6: Flujo de salida del sistema global (*producto*)
- Los flujos internos de insumo son: 2, 3, 4 y 5
- Los flujos internos producto son: 2, 3, 4, 5 y 6



TF: transformador; CO: conductor; MT: motor; B: bomba; T: tubería

Figura 2. Diagrama causal.

4. Desagregación del sistema en los elementos necesarios: En la Figura 2 se observa la desagregación del proceso en cinco etapas, en las cuales se identificaron: transformador, conductores, motor, bomba y tubería.

7. Identificación las pérdidas exergéticas del sistema: En la Tabla 2 se muestran las irreversibilidades⁴ [3,5], de los elementos que componen las unidades de bombeo. Estas irreversibilidades son calculadas para ciclos determinados de operación para los tanques, esto con el fin de identificar el elemento con mayor irreversibilidad para un mismo ciclo de operación.

8. Cálculo de los costos exergéticos de los flujos: Para diferentes condiciones de trabajo se determinan los costos exergéticos de cada unidad (MW-h), obteniéndose los resultados de la Tabla 3, teniendo en cuenta los siguientes eventos.

$$4 I_{in} = \left(\frac{I_e}{T_{oi}} \right) * T_{o.promedic}$$

I_{in} = Es la irreversibilidad para un tiempo de operación promedio
 I_e = Es la irreversibilidad para el tiempo de operación del elemento motor o bomba.

2 Cota de altura hasta la salida de la tubería del tanque A: 345,2 m
 3 Cota de altura hasta la salida de la tubería del tanque B: 376,4 m

Tabla 2. Irreversibilidades de cada unidad de bombeo.

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)					
	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3	
	Bombeo tanque A	Bombeo tanque B	Bombeo tanque A	Bombeo tanque B	Bombeo tanque A	Bombeo tanque B
Motor	5,68	1,72	3,21	1,24	5,59	1,48
Bomba	8,08	1,57	7,71	1,56	7,27	1,18

▪ **Primero, durante el bombeo al tanque A**
 El tiempo de operación no es el mismo para todas las unidades debido a que cada unidad debe satisfacer la demanda requerida para el suministro de agua en el transcurso del día. Se toman los costos exergéticos calculados a partir del análisis termoeconómico y se recalculan para un tiempo de operación promedio diario por tanque de destino, con el fin de identificar la opción mas económica para un mismo tiempo de operación.

Tabla 3. Costo exergético de cada unidad hacia tanque A.

UNIDAD DE BOMBEO	COSTO EXERGÉTICO DE CADA UNIDAD B_{in} (MW-h)
1	47,89
2	45,76
3	49,17

En la tabla 3 se observa que el mayor costo exergético se presenta cuando se bombea con la unidad 3 y el menor costo exergético con la unidad 2 lo cual indica un menor consumo de energía.

▪ **Segundo, durante el bombeo al tanque B**
 De manera similar, se obtienen los costos exergéticos^{5 [3,5]} para el bombeo hacia el tanque B, y con un tiempo promedio de operación diario menor, lográndose los resultados de la Tabla 4:

Tabla 4. Costo exergético de cada unidad.

UNIDAD DE BOMBEO	COSTO EXERGÉTICO DE CADA UNIDAD B_{in} (MW-h)
1	11,40
2	10,92
3	11,54

$$5 B_{in} = \left(\frac{B_i}{T_{oi}} \right) * T_{o.promedio}$$

B_{in} = Es el costo exergético para un tiempo de operación promedio
 B_i = Es el costo exergético calculado para el tiempo de operación de cada unidad

En la Tabla 4 se observa que el mayor costo exergético se sigue presentando durante el bombeo con la unidad 3.

9. Valoración económica de costos exergéticos: Consiste en llevar el costo de la exergía a unidades monetarias (dólares).

En la tabla 5 se muestra cada uno de los costos en pesos colombianos asociados a las unidades de bombeo. Los valores en negrilla hacen referencia a los costos más bajos para el bombeo.

Tabla 5. Costos económicos para diferentes situaciones de bombeo.

UNIDAD	COSTOS ECONÓMICOS, US	
	Unidad nueva	
	Bombeo al tanque A	Bombeo al tanque B
Unidad 1	3 700	880
Unidad 2	3 536	840
Unidad 3	3 800	890

10. Planteamiento propuesta para URE: Con el análisis exergético se identifican las oportunidades de ahorro a nivel de procedimiento y de tecnología. En los literales a) y b) se describe la estrategia procedimental y tecnológica para hacer uso eficiente de la infraestructura existente.

a) A nivel de procedimiento

A partir de la valoración económica se tiene que la unidad con menor costo económico es la 2, y la de mayor costo económico la 3. Con relación a este resultado se propone: utilizar la **unidad 2** para bombear al tanque A y al tanque B. Se deja la **unidad 1** como reserva porque al emplearla, se incurre en el menor costo económico después de la **unidad 2**. Por cada día en que se utilice la **unidad 1** como reserva, se debe sumar su costo económico al costo mensual que se tendría si la **unidad 2** opera al costo mensual que se tendría si la **unidad 2** operará sola.

b) A nivel de tecnología

Esto muestra la oportunidad de ahorro de energía en la operación del sistema, si se hace un reemplazo de los elementos con mayor irreversibilidad por elementos nuevos tal como se muestra en la Tabla 6. Las irreversibilidades se calculan para condiciones nominales y un tiempo promedio de operación de 14,3 horas para el tanque A y 3,4 horas para el tanque B.

Tabla 6. Irreversibilidades en la bomba

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)	
	Bombeo tanque A	Bombeo tanque B
Motor	1,15	0,34
Bomba	5,84	1,22

A continuación se presenta la propuesta⁶ para cada unidad donde la disminución de exergía destruida se calcula como la diferencia en por ciento de la irreversibilidad del elemento existente con la del elemento propuesto.

Propuesta unidad 1

Al reemplazar el motor y la bomba de la unidad 1 se tendrá una menor irreversibilidad en esta parte del proceso, contribuyendo a elevar la eficiencia global y a un ahorro de energía, en la Figura 3 se observa el porcentaje de disminución de pérdidas.

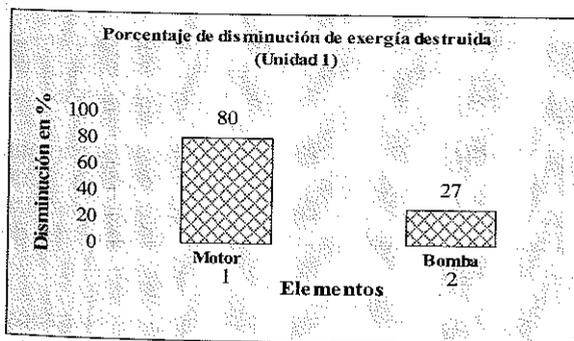


Figura 3. Ahorro de energía si se cambia el motor y la bomba de la unidad 1.

Propuesta unidad 2

Al reemplazar solamente la bomba existente se obtendría los datos mostrados en la Figura 4.

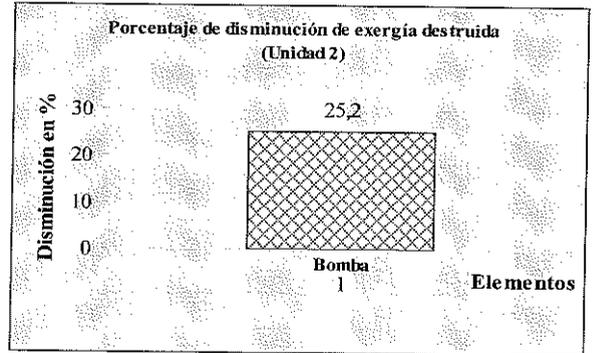


Figura 4. Ahorro de energía si se cambia la bomba de la unidad 2.

Propuesta unidad 3

Al reemplazar el motor y la bomba existente los porcentajes de ahorros que se obtendrían se puede observar en la Figura 5.

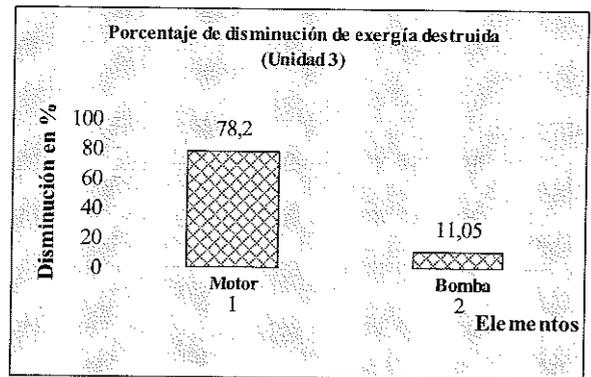


Figura 5. Ahorro de energía si se cambia el motor de la unidad 3.

Se recomienda la propuesta *unidad 1*, ya que es la de mayor opción de ahorro. Además, se obtiene mayor eficiencia en una de las unidades que, actualmente, presenta el mayor impacto en irreversibilidad sobre el proceso. Se recomienda utilizar la *unidad 2* como reserva por presentar menor irreversibilidad.

11. Evaluación financiera: en esta etapa se debe realizar una evaluación que permita la toma de decisiones para la puesta en marcha del P-URE. No obstante, en este caso por motivos a que los precios

⁶ Estas propuestas están dadas para cuando solo una unidad opera todos los días supliendo la demanda de los dos tanques.

de los equipos no son oficiales, esta sólo es un primer acercamiento.

En la Tabla 7 se presentan los ahorros (en U\$) anuales y el tiempo de recuperación respectivo para cada una de las opciones de cambio de tecnología.

Tabla 7. Ahorro anual de cada propuesta planteada en el P-URE.

PROPUESTAS	AHORRO ANUAL (U\$)	TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN
Propuesta unidad 1	238,400	1,9 años
Propuesta unidad 2	63,425	3,6 años
Propuesta unidad 3	195,840	2,3 años
Propuesta unidad 1 y 3	217,120	4,1 años
Propuesta unidad 1 y 2	150,900	4,5 años
Propuesta unidad 2 y 3	129,630	5,2 años

OBSERVACIONES

- Los elementos: transformador, conductores, y tubería presentan una irreversibilidad que se mantiene con la misma tendencia para las diferentes condiciones de bombeo.
- La irreversibilidad de esos elementos siempre está presente y es menor a la que se encuentra en los motores y bombas sin importar la condición de bombeo lo que significa un menor impacto en el costo exergético global y de los flujos.
- El análisis de costo exergético indica que existe oportunidad de ahorro de energía eléctrica, a través de cambio de procedimiento. La tabla 7 muestra el porcentaje de ahorro en el costo exergético de operación.

CONCLUSIONES

- En términos generales, ahorrar energía es tarea de todos y de todos los días. Porque de no hacerlo quizás mañana ya no exista energía que ahorrar. Los resultados que se obtengan de cada empresa, en cada hogar, con cada usuario, contribuirán a asegurar un mejor futuro, particular y colectivo.
- Se logró expresar los flujos de exergía en MW-h lo cual es útil para mostrar que al igual que en sistemas químicos, térmicos y mecánicos se puede realizar aplicaciones de la teoría

termoeconómica a sistemas eléctricos volviendo versátil esta metodología.

- Los resultados obtenidos, muestran el análisis de exergía como una herramienta de diagnóstico sobre el uso inadecuado de la energía en procesos de conversión de energía.
- El análisis exergético se muestra como una herramienta susceptible para aplicación de argumentos propios para diferentes procesos productivos.
- Se estableció que los equipos eléctricos presentan mayor eficiencia que los mecánicos, lo que se traduce en una menor irreversibilidad de estos y un mayor impacto de los equipos mecánicos sobre la eficiencia total del proceso al aportar más irreversibilidad.

ABSTRACT

This paper proposes a methodology oriented to perform energetic audits as support of a rational and efficient use of energy plan (RUEP). The validity of the proposed methodology is demonstrated with its application to a pumping system in Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), Colombia.

Keywords: Rational and efficient use of energy, pumping system, exergetic auditing, exergetic cost and irreversible processes.

BIBLIOGRAFÍA

- VALERO, A. (2000). Bases termoeconómicas del ahorro de energía. Departamento de termodinámica y fisicoquímica. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. Universidad de Zaragoza.
- VALERO & TORRES. (2000). Termoeconomía. Curso de Doctorado. Departamento de termodinámica y fisicoquímica. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. Universidad de Zaragoza.
- CAMPOS AJC, (2004). Eficiencia energética. Barranquilla: Departamento de ingeniería mecánica, 2004. <http://www.uniatlantico.edu.co/inge>
- GÖRAN, W. Exergy flows in industrial processes. Physical resource theory group, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, S-412 Göteborg, Sweden.
- BONILLA, W.; CARRILLO, G.; y CÁRDENAS, C. (2006). Propuesta para un uso racional y eficiente

de la energía en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en el sistema subestación alimentadora sistema de bombeo de la planta Bosconia. Proyecto de de grado. Universidad Industrial de Santander.