

Optimización de un sistema energético simple por análisis multiobjetivo (mo)

Optimization of an energetic simple system for multiobjective analysis (mo)

Marlon J. Bastidas B.¹, Raúl Bermúdez Márquez², José Evelio Mazo³

1. Director GEAB – CIDI. *mjbastid@unalmed.edu.co.*

2. Profesor Titular,

3. Investigador GEAB. Universidad Popular del Cesar.
Sede Sabanas del Valle, Valledupar

Recibido 10/10/09, Aceptado 10/11/09,

RESUMEN

Se presenta una metodología reciente para optimización de un sistema energético complejo introduciendo factores externos, basada en el desarrollo de fronteras Pareto –óptimas a partir de algoritmos evolutivos multiobjetivos (AEMO) empleados en la resolución de problemas energéticos reales de optimización no lineal. Se incluyen objetivos termoeconomico, tecnológico y ambiental a los cuales se les asigna un peso para evaluar la función de aptitud, formada por una suma de promedios de cada objetivo. El sistema energético complejo es formado por un ciclo combinado (subsistema I) y un gasificador (subsistema II).

El desempeño de los pesos en cada objetivo es modelado por reglas heurísticas, mientras que las modificaciones de las variables de decisión se basan en aplicaciones aleatorias. La metodología expuesta, permite evaluar funciones objetivo formadas por costos del combustible, costos variables de operación y costos de mantenimiento, los cuales están incluidos en la ecuación de capital de inversión. Las metas en la optimización del sistema global son minimizar los costos del producto, minimizar los residuos de la combustión y maximizar la eficiencia exergetica.

Palabras clave: Multiobjetivo, Optimización, Termoeconomía.

ABSTRACT

An optimization methodology for complex energy system introducing external factors based on the newly developed Pareto-based multiobjective evolutionary algorithms (MOEA) using for solving a real-world power systems multiobjective nonlinear optimization problem is presented. The thermoeconomic, technology and environment objectives are included in this methodology and is assigned weights to each objective for evaluated the fitness an average sum. The complex energy system is integrated by a combined-cycle power plant (subsystem I) and a gasifier (subsystem II).

The performance at weights of each objective is modeled by heuristic rules whereas the modification of decision variables is based on the application of random approaches. The methodology allows evaluate objective functions conformed by the fuel costs, the operation variable costs and maintenance costs, these are included in the capital investment equation. The goals in the optimization of this global system are to minimize product costs, minimize combustion residuals and maximize exergetic efficiency.

Key words: Multiobjective, Optimization, Thermoeconomic.

NOMENCLATURA

<i>A</i>	Diferencia de costos exergéticos (Objetivo tecnológico) [U\$]	<i>Símbolos griegos</i>	
<i>C</i>	costos [U\$]	ϵ	eficiencia exergética
<i>c</i>	costo por unidad de exergía [U\$/GJ]	η	eficiencia energética
\dot{E}	rata de flujo de exergía [MW]	β	factor de capital de recuperación
<i>fit</i>	fitness	γ	coeficiente que expresa la parte de los costos fijos de operación y mantenimiento, el cual depende la inversión neta de un componente de la planta
<i>h</i>	entalpía específica [kJ/kg]	ω	constant usada en el cálculo de la variable nivelizada de los costos de operación y mantenimiento
<i>PC</i>	Poder calorífico [kJ/kg]	τ	número de horas anuales de operación de la planta a capacidad nominal [hr]
<i>I</i>	Inversión		
m_T	rata de flujo másico [kg/h]		
<i>m</i>	exponente de la ecuación de inversión. Equation (5)		
<i>n</i>	exponente en la ecuación de inversión. Equation (5)		
<i>Ob</i>	objetivo	<i>Subíndices</i>	
<i>p</i>	precio por unidad de exergía [U\$/GJ]	<i>ac</i>	compresor de aire
<i>P</i>	presión [bar]	<i>CH</i>	química
<i>R</i>	ingresos [U\$] and	<i>gt</i>	turbina de gas
<i>Re</i>	costos restantes [U\$]	<i>p</i>	bomba
<i>rp</i>	relación de presión	<i>st</i>	turbina de vapor
<i>s</i>	entropía específica [kJ/kgK]	<i>PH</i>	física
<i>T</i>	Temperatura [°C]	<i>k</i>	componente de la planta
<i>X</i>	variable de decisión (fracción de combustible)	<i>o</i>	sistema convencional
<i>w</i>	pesos	<i>Superíndices</i>	
<i>Y</i>	composición de cenizas en el combustible	<i>OM</i>	operación y mantenimiento
<i>Z</i>	costo de capital asociado al componente de la planta [U\$]	<i>CI</i>	capital invertido

Introducción

Los desarrollos teóricos de optimización de sistemas energéticos en los últimos años están demarcados en la exergoeconomía, teniendo en cuenta que los análisis relacionados con los costos económicos de generación exergética, son más apropiados para un caso real que los obtenidos de un simple análisis energético [1]. El término compuesto Termoeconomía, propuesto por Evans y Tribus en 1962, tiene como propósito esencial estudiar la relación entre la termodinámica y la economía, mencionar las bases teóricas de una nueva disciplina de ahorro energético y obtener modelos que permitan recoger criterios generales para evaluar la eficiencia y el costo de sus productos, en sistemas con un consumo intensivo de energía. En los noventa se presentaron trabajos con una metodología termoeconómica bien argumentada, que favoreció su reconocimiento científico [2, 3].

La teoría termoeconómica, propició la presentación de nuevos trabajos y se desarrollaron diferentes aplicaciones a partir de esta. Una vez se comprobara que la teoría ter-

moeconómica permitiera resultados razonables, empezó a aplicarse en diferentes tipos de tecnologías de generación energética; especialmente al sistema general - CGAM [1, 4, 5]. Hasta ahora, se han implementado herramientas de optimización en los sistemas de generación de energía (SGE), a partir de conceptos que provienen de la termodinámica y la economía; sin embargo, consideramos que el análisis MO puede complementar la optimización, dado que permite incluir variables del entorno a un sistema energético complejo [6, 7].

A nivel exergoeconómico, en los últimos 25 años se han desarrollados metodologías de contabilidad de costos que optimizan y evalúan los sistemas con un enfoque de costo promedio o ejemplificando con costos marginales [1, 8]. Se ha intentado plantear metodologías MO, para la optimización de sistemas energéticos, pero siempre conducen a óptimos locales, sin embargo se han hecho planteamientos que muestran la necesidad de utilizar varios criterios de evaluación para la escogencia de un sistema energético óptimo entre varias posibilidades [9, 10]. En la optimización de sistemas energéticos se han asignado pesos para

objetivos económico y ambiental, pero haciendo que este último objetivo adquiriera valores equivalentes a costos económicos [15], es decir, no hay una representación real del impacto ambiental por la generación de residuos. Si el decisor es ambientalista, es relevante conocer el impacto ambiental por reducción física de los residuos que su equivalente económico. Otro importante punto de discusión es como introducir en el modelo, el análisis del impacto ambiental. Lazzaretto and Toffolo [15] analizaron el impacto económico por generación de NOx y CO, pero hay indicadores LCA (siglas en inglés: Life Cycle Assessment) para medir el impacto ambiental de sistemas energéticos. Los LCA han sido utilizados ampliamente en procesos de conversión de energía, donde la medida del impacto ambiental se relaciona con el consumo de combustible, así como la construcción, mantenimiento y disposición de los componentes de la planta. La metodología LCA, relaciona el impacto ambiental con todos los componentes del proceso de conversión de energía, siendo apropiado para el análisis exergoambiental, la cual es una combinación basada en la metodología del análisis exergoeconómico [16], sin embargo no hay evidencias de casos de optimización de sistemas energéticos donde se estudien aspectos relacionados con sus alrededores.

Este artículo se basa en una metodología para resolver problemas MO utilizando las ventajas de los AG con pesos porque permite incluir un amplio número de variables, inclusive las variables externas dentro del análisis global del sistema energético. El propósito es evaluar, a partir de criterios de optimización, la influencia de los factores externos y la interacción entre el sistema energético y sus alrededores. La variable externa considerada en este trabajo es el tipo de combustible sólido (carbón), abundante

en algunos sectores de Colombia, con el que se completan tres objetivos para estudiarlos teóricamente. En general, por un lado se pretende minimizar la generación de residuos (cenizas); este objetivo puede ser sustituido por el de la minimización de los indicadores LCA o minimización de los gases invernaderos. Por otro lado, simultáneamente se requiere minimizar el costo exergoeconómico y por otro lado maximizar la eficiencia exérgica.

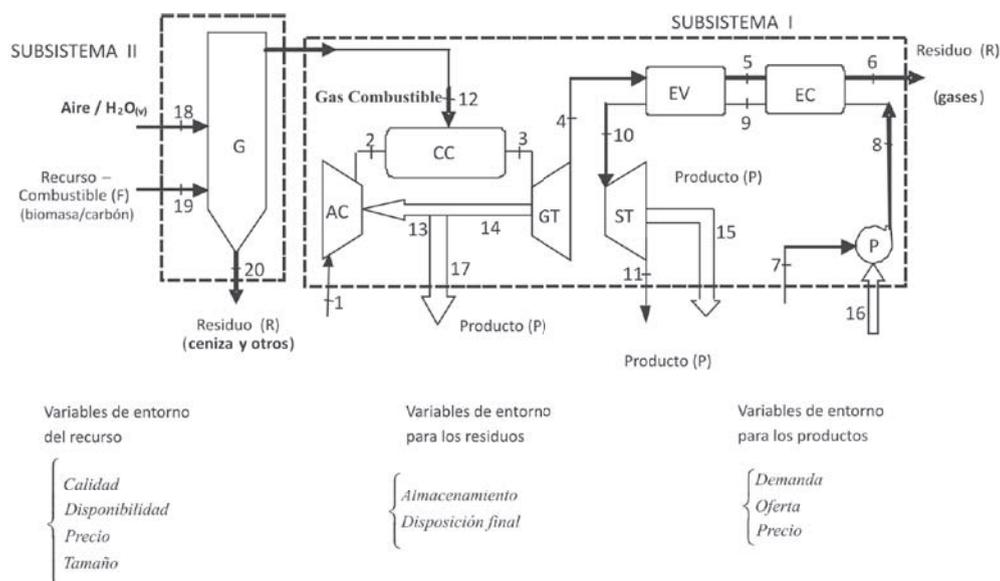
Metodología

La metodología para la optimización de un sistema energético simple por análisis MO, consta de cuatro pasos: descripción del problema térmico MO, descripción de los objetivos del problema, aplicación del modelo matemático para el análisis del sistema térmico integrado y la aplicación de los algoritmos evolutivos.

Paso 1. Descripción del problema térmico MO

Inicialmente se hace una descripción del problema MO el cual parte de un sistema, tal como se muestra en la Figura 1. Este sistema está formado por un subsistema I, planteado por P.K. Sahoo para su aplicación metodológica, que genera 50 MW y 15 lb/s de vapor saturado a 22,5 psig [1]. El subsistema II, es un gasificador que suministra de gas sintético al subsistema I. En este caso se hace una modificación al sistema de Sahoo, el cual emplea como recurso gas natural, reemplazado en este caso por el gas sintético obtenido, procurando mantener las propiedades exérgicas del gas natural, de tal manera que los recursos empleados sean equivalentes. Para el subsistema II, se tomaron datos del documento Gasification Alternatives for Industrial Applications, del departamento de energía de EU [12].

Figura 1. Planta de cogeneración (Subsistema I) integrada a un gasificador (Subsistema II)



Si se analiza en la parte inferior de la Figura 1, se puede notar que se incluyen aspectos relacionados con las variables del entorno del sistema, esto con el fin de evaluar las condiciones del medio que afectan los recursos, los productos y los residuos, y a su vez evaluar cómo afectan estos al sistema de manera global. Por ejemplo, para el caso que el recurso sea carbón, como es este caso, habrá factores que condicionan el suministro, tales como la calidad, la disponibilidad, el precio, el tamaño y la ubicación del proveedor. Para el análisis del sistema energético, se hacen los siguientes supuestos:

- El sistema de cogeneración opera en estado estable.
- Se asume que el combustible utilizado es carbón procedente de cualquier región de Colombia.
- Se asume que el aire y los gases de combustión se comportan como gases ideales.
- La combustión es ideal y las pérdidas de la cámara de combustión (CC) se asume 2% del poder calorífico del combustible. Los demás componentes de la planta operan sin pérdidas de calor.
- Las pérdidas de presiones del lado del agua y del aire en el recuperador de calor y generador de vapor (HRSG), son del 5 y 2% respectivamente de la presión total de entrada. Las pérdidas de presión en tuberías se asume despreciable.
- El estado de referencia o condiciones medio ambientales, se asume que son de 1 bar y 25 °C.
- La temperatura de salida esta por encima de la temperatura de punto de rocío de los gases de combustión.

Paso 2. Descripción de los objetivos en el problema MO

Comúnmente, la optimización de los sistemas energéticos está sujeta a minimizar el costo exergético unitario del producto, obtenido por la suma de los costos del combustible y de los costos de los equipos del sistema nivelados a un año. En este trabajo, se conservan los criterios de minimización del costo exergético unitario, pero se incluye el precio exergético unitario del producto en el mercado de energía Colombiano, lugar escogido como escenario del problema. La inclusión del precio en el modelo tiene como finalidad determinar el comportamiento de las variables de diseño del modelo en casos de ingresos fijos altos y/o bajos, pero también se puede utilizar en un futuro para ingresos variables o inciertos. Los ingresos se representan con la Ecuación 1, donde se muestran dos parámetros principales, uno es el precio exergético unitario del producto y el otro es la exergía generada en un tiempo τ .

$$R_k = p_{p,k} \cdot \dot{E}_{p,k} \cdot \tau \quad (1)$$

Como la eficiencia exergética es el cociente entre la exergía del producto y la exergía del recurso (combustible) o lo

que es lo mismo $\dot{E}_p = \varepsilon \dot{E}_F$, la Ecuación 1, se puede escribir como sigue:

$$R_k = p_{p,k} \cdot \varepsilon \cdot \dot{E}_{F,k} \cdot \tau \quad (2)$$

De donde

$$\dot{E}_F = \dot{m}_T \cdot \sum_{i=1}^n PC_i \cdot X_i \quad (3)$$

En la Ecuación 3, i es la cantidad de combustibles que intervienen en la alimentación del sistema. La Ecuación 2 para maximizar, depende de la eficiencia exergética y el precio del producto, siempre que la exergía del recurso se mantenga fija, es decir, que para alcanzar valores altos de los ingresos es necesario que la eficiencia sea alta y/o que el precio también lo sea. Sin embargo, se ha comprobado que si la eficiencia es alta, los costos por compra de equipos también son altos [1], con lo que se aprecia un aumento en los ingresos a costa de un mayor costo por compra de los equipos por reducción del combustible. Esto sugiere que se acoja una función objetivo que integral, que incluya los ingresos y los costos totales, la cual queda representada adecuadamente con la Ecuación 4, ecuación de utilidad u objetivo termoeconómico.

$$U_k = \left(p_{p,k} \cdot \varepsilon_k \cdot \dot{m}_T \cdot \tau \cdot \sum_{i=1}^n PC_i X_i \right) - C \quad (4)$$

Donde los costos totales están formados por el costo de los combustibles y el costo de los j equipos, tal como se muestra en la Ecuación 5.

$$C_T = C_F + \sum_{j=1}^r Z_j \quad (5)$$

En la Ecuación 5, C_F se puede representar en función de costos de los combustibles que participan en el escenario del sistema térmico, esto es:

$$C_F = \dot{m}_T \cdot \left(\sum_{i=1}^n c_{F,i} \cdot PC_{F,i} \cdot X_i \right) \quad (6)$$

Con la maximización de las utilidades, se garantiza que se minimicen los costos, tal como ha sido el interés fundamental de la optimización de los sistemas energéticos a través de los años. La maximización de las condiciones de diseño o eficiencia del sistema en estudio, se puede reforzar con la diferencia entre dos sistemas evaluados simultáneamente, empleando la ecuación de inversión introducida en los noventa y sustentada por algunos autores en los noventa [3, 5].

El *objetivo tecnológico* es la diferencia del costo exergetico entre el sistema convencional (subíndice o) y el sistema integrado (gasificador y sistema de cogeneración – subsistemas I+II). Este objetivo permite minimizar el costo exergetico del sistema evaluado (Bastidas et.al., 2008b), el cual se basa en las siguientes supuestos:

- El capital total invertido, el cual está asociado con el componente k de la planta y es calculado para un periodo de operación, es aproximadamente igual a la siguiente relación [3, 4]:

$$I_k = B_k \cdot \left(\frac{\epsilon_k}{1 - \epsilon_k} \right)^{n_k} \cdot E_k^{m_k} \quad (7)$$

Las constantes B , n y m de la Ecuación 7, dependen del componente que se esté considerando. La Ecuación 7 se asume válida con un rango de certeza en la opción o condición de diseño para cada componente. El último término de la ecuación representa el efecto del tamaño sobre el valor de la inversión sobre el equipo k . Cuando se tiene alguna información disponible sobre las diferentes condiciones de diseño del componente k , se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados para calcular los valores de B , n y m .

Los costos anuales de operación y mantenimiento (excluyendo los costos de combustible) atribuidos al componente k de la planta, puede ser aproximadamente igual a:

$$Z_k^{OM} = \gamma_k I_k + \omega_k \tau \dot{E}_{P,k} + R_{e_k} \quad (8)$$

Los supuestos anteriores, conducen a la expresión del costo total anual (costos de capital invertido y costos O&M, excluyendo los costos de combustibles) atribuidos al componente k .

$$Z_k = Z_k^{CI} + Z_k^{OM} = (\beta_k + \gamma_k) I_k + \omega_k \tau \dot{E}_{P,k} + R_{e_k} \quad (9)$$

Combinando las Ecuaciones 3, 7, 8 y 9 y excluyendo los costos de combustible, se calcula la siguiente relación para la diferencia de costos (ΔZ^{TOT}), la cual expresa la diferencia del costo total entre el sistema convencional y el sistema integrado

$$-A_k = \Delta Z^{TOT} = Z_k - Z_{k,o} + \tau (c_{F,k} \dot{E}_k - c_{F,k,o} \dot{E}_{F,k,o}) \quad (10)$$

A partir de la Ecuación 10, se obtiene la Ecuación 11 o *función objetivo tecnológica*, la cual interpreta la diferencia entre los costos de inversión del sistema estu-

diado y los costos de inversión de un sistema con las mismas condiciones físicas pero con eficiencia exergetica menor.

$$-A_k = \Delta I^{CI} + \Delta I^{O\&M} + \left(m_T - m_{T,o} \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n c_{F,i} \cdot PC_{F,i} \cdot X_i \right) \cdot \tau \quad (11)$$

Donde

$$I^{CI} = \left[(\beta_k - \gamma_k) \cdot B_k \cdot \left(\frac{\epsilon_k}{1 - \epsilon_k} \right)^{n_k} \cdot E_k^{m_k} - (\beta_{k,o} - \gamma_{k,o}) \cdot B_{k,o} \cdot \left(\frac{\epsilon_{k,o}}{1 - \epsilon_{k,o}} \right)^{n_{k,o}} \cdot E_{k,o}^{m_{k,o}} \right] \quad (12)$$

$$I^{O\&M} = (\omega_k - \omega_{k,o}) \tau \cdot \dot{E}_{P,k} + (R_{e_k} - R_{e_{k,o}}) \quad (13)$$

Finalmente, otro aspecto importante es incluir en el modelo los residuos físicos generados por la generación de exergetica, por lo tanto se tiene en cuenta la minimización de cenizas producto de la combustión de carbón, a través de la Ecuación 14 u *objetivo ambiental*.

$$m_{zn} = m_T \cdot \tau \cdot \left(\sum_{i=1}^n Y_i \cdot X_i \right) \quad (14)$$

El signo negativo en el *objetivo tecnológico*, indica que los valores de costos totales para el equipo o sistema de menor tecnología, son supuestamente mayores al evaluado, de esta manera se puede reflejar un ahorro positivo en los resultados; sin embargo, en la evaluación utilizando datos del trabajo planteado por Sahoo integrado con el gasificador, de mejor eficiencia exergetica que el sistema de cogeneración, en ocasiones no reflejaba este comportamiento supuesto. El *objetivo ambiental*, corresponde a la masa total de residuos, generados durante las horas en un año de operación. El tiempo de vida útil del sistema, según Sahoo, es de 20 años, por lo tanto los costos de inversión son anualizados a una tasa de 10% [1].

El primer factor del término de la derecha de la Ecuación 4 o función *objetivo termoeconómica*, corresponde a los ingresos obtenidos en un año de operación, en este término, se incluye le precio exergetico unitario del producto (\bar{p}), el cual se estima como un promedio, debido a que se pueden presentar productos de diferentes calidades (vapor y electricidad), como ocurre en un sistema de cogeneración. En los factores restantes de la ecuación, se presentan los costos generados por el combustible o recurso, el cual incluye el costo exergetico unitario del recurso (c_r); los costos generados por la inversión en función de los costos de operación y mantenimiento constantes (β , γ); los costos de operación y mantenimiento variables (ω) y otros costos (R_e) [3]. En los costos de inversión en equipos y de opera-

ción y mantenimiento, están incluidos los generados por los equipos de limpieza y de captura de CO₂ [12, 13]. Las variables de funcionamiento del sistema están formadas por la exergía del recurso (E_r), la exergía del producto (E_p), la masa total de recurso (m_T), las fracciones (X) y el poder calorífico (PC) de la mezcla de diferentes combustibles (i); los parámetros m , n y B son obtenidas de la ecuación de distribución de los costos de inversión [3] y k , para el caso estudiado, es el sistema energético completo, pero puede representar cada equipo que conforman el sistema.

Paso 3. Aplicación de las ecuaciones del análisis MO al sistema integrado

Antes de evaluar el comportamiento de los objetivos para el sistema energético, se hace el correspondiente análisis exergético del subsistema II, teniendo en cuenta que el subsistema I ha sido ampliamente evaluado por varios autores [1], para este caso se toman los datos del problema resuelto por Sahoo del subsistema I, y algunas referencias para obtener los valores necesarios para el subsistema II [12]. Los valores del análisis exergético del subsistema II, se muestran en la Tabla 1, que complementan los obtenidos por Sahoo en el subsistema I. En la tabla, las columnas identifican las propiedades termodinámicas de cada corriente (SP) del sistema, el flujo másico (m), la temperatura T , la presión P , la entalpía h , la entropía s , la exergía física \dot{E}_{PH} , la exergía química \dot{E}_{CH} y la exergía total \dot{E}_T .

El análisis consiste en evaluar el comportamiento de las ecuaciones con respecto a algunas variables, considerando lo siguiente:

- El gas natural de la corriente 12 de la Figura 1, en el análisis de Sahoo, es reemplazado por gas sintético obtenido del gasificador (subsistema II).
- La cantidad de exergía de la corriente 12, permanece constante e igual a la aportada por el gas natural, los otros flujos de la misma corriente y de las corrientes 18, 19 y 20 dependen del flujo de exergía de la corriente 12.
- El sistema a evaluar es el sistema integrado (SI), con respecto a un sistema convencional (subsistema I). Para ello, se identificaron las variables y parámetros del subsistema I, con un subíndice o, indicando que este es el sistema convencional.

Las ecuaciones para el análisis MO, requieren de varios parámetros consignados en la Tabla 2. Los valores de β , γ , β_o y γ_o , se tomaron del ejemplo planteado por Tsatsaronis y Pisa [4]; los valores de ω , ω_o , R_e y R_{eo} , fueron asumidos inicialmente y posteriormente evaluados para diferentes cambios en las variables; los valores de B , B_o , m , m_o , n y n_o no se evaluaron para dos condiciones de operación del siste-

ma integrado, aplicando un algoritmo de búsqueda y las recomendaciones de Bejan et al. [3].

La Tabla 3 muestra la calidad (contenido de cenizas/PC) y los costos de los combustibles (carbón), de acuerdo al lugar de origen en Colombia. El costo de los combustibles y de los equipos fueron tomados del año 2004, pero se ajustaron de acuerdo al IPC para el 2008.

Los rangos permitidos par las variables de decisión consideradas para el sistema de cogeneración son los siguientes: $9 \leq r \leq 15$, $0.75 \leq \eta_{ac} \leq 0.9$, $1450 \leq T_3 \leq 1550$, $0.75 \leq \eta_{gt} \leq 0.92$, $0.75 \leq \eta_{st} \leq 0.92$, $30 \leq P_{st} \leq 75$ y $0.75 \leq \eta_p \leq 0.90$; donde r_p ($= P_2/P_1$) es la relación de presión del compresor de aire, η_{ac} es la eficiencia isentrópica del compresor, T_3 es la temperatura de los gases de combustión que entran a la turbina, η_{gt} es la eficiencia isentrópica de la turbina de gas, η_{st} es la eficiencia isentrópica de la turbina de vapor, η_p es la eficiencia isentrópica de la bomba y P_{10} es la presión de entrada a la turbina de vapor [1]. Las variables de decisión consideradas arriba, están asociadas a la Ecuación 7, como una alternativa simple para la optimización formulada por Lozano et al. [17], donde los autores formulan ecuaciones para modelos físicos y económicos para cada equipo de un sistema de cogeneración. De los alrededores de todo el sistema, sólo se tiene en cuenta la composición óptima de la mezcla de combustibles como variables de decisión, donde $\sum X_i = 1$, mientras fueron asumidos fijos los precios de venta de la electricidad y el vapor.

Paso 4. Aplicación de los algoritmos evolutivos

La presencia de múltiples objetivos en un problema, además de requerir de un método de resolución no convencional, da lugar a un grupo de soluciones óptimas conocidas ampliamente como soluciones óptimas de Pareto [14].

Los métodos evolutivos como la programación evolutiva, las estrategias evolutivas y los algoritmos genéticos (AG) son los más utilizados para estos casos [1, 7, 14]. En lo particular empleamos AG, con el que se construye el grupo de soluciones óptimas a partir de la asignación de pesos de importancia para cada función objetivo. En la figura 2, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético por pesos, en el que se identifican cada paso requerido para que se alcance la optimización para el caso particular de este trabajo. Los AG's son una representación simple de la evolución biológica, en la que un par de padres de una población de individuos demarcados en una generación (selección), dan origen a un par de hijos con características de los padres (cruzamiento). Los individuos que forman la próxima generación se escogen por torneo, en el que gana el que tenga mejor aptitud (fitness) frente a los criterios del evaluador, con lo que la optimización va evolucionando hacia mejores valores en las próximas generaciones. Antes

Tabla 1. Propiedades de estado y exergía del sistema correspondiente a la Fig. 1.

SP	m_T (kg/s)	T (K)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	\dot{E}_{PH} (MW)	\dot{E}_{CH} (MW)	\dot{E}_T (MW)
1	73,83	298,1	1,01	-164,5	6,7844	0,0	0,0	0,0
2	73,83	515,8	10,13	60,5	6,8520	19,7	0,0	19,7
3	98,79	1.500,0	9,62	-83,3	8,3686	108,3	0,1	108,4
4	98,79	1.002,5	1,13	-721,9	8,4865	41,7	0,1	41,9
5	98,79	726,8	1,07	-1.054,6	8,1141	19,8	0,1	20,0
6	98,79	598,0	1,02	-1.203,8	7,9034	11,3	0,1	11,4
7	15,00	298,1	1,01	104,9	0,3672	0,0	0,0	0,0
8	15,00	299,6	50,00	115,6	0,3864	0,1	0,0	0,1
9	15,00	525,8	49,00	1.098,2	2,8151	4,0	0,0	4,0
10	15,00	710,3	82,02	3.289,4	6,7999	19,0	0,0	19,0
11	15,00	400,6	2,50	2.716,5	7,0525	9,3	0,0	9,3
12	24,93	298,1	10,13	-4.672,8	2,1875	0,0	127,5	127,5
18	21,40	547,0	28,75	-978,4	7,0108	8,4	0,0	8,4
19	6,11	298,1	1,01	28.337,7	0,0000	0,0	173,1	173,1
20	2,57	450,0	1,01	22.623,7	5,4077	54,0	0,0	54,0

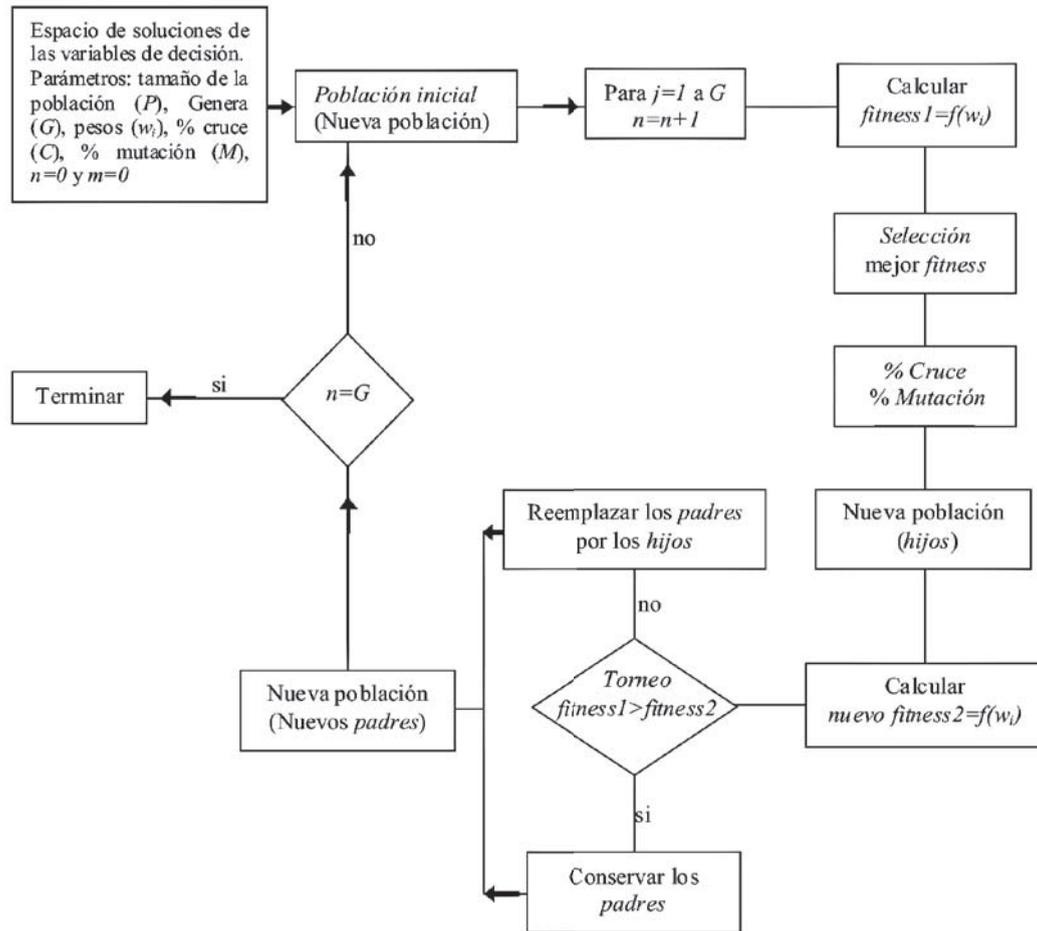
Tabla 2. Parámetros requeridos por los objetivos del problema.

Parámetro	β	β_o	γ	γ_o	B	B_o	m	m_o	n	n_o
Valor	0.182		1.092		19.2E3	180	0.47	1.06	0.29	0.32
Referencia	[4]		[4]		[1, 4]		[1, 4, 8]		[1, 4, 8]	

Table 3. Carbón de algunos sitios de Colombia.

Lugar de origen	PC (kJ/kg)	Cenizas (%)	Costo 2008 U\$/1000 kg
Antioquia y Caldas	28482.75	9.12	37.19
Valle del Cauca	22436.64	30.40	28.30
Boyacá	28011.32	11.55	26.42
Cundinamarca	27408.44	10.19	26.80
Cesar	18759.25	5.28	46.73
Guajira (Cerrejón)	28833.62	8.30	47.18
Cordoba	25328.72	17.00	25.73
Santander	30260.67	16.35	44.88

Figura 2. Diagrama de flujo del AG con fitness en función de pesos de importancia.



de la evaluación del fitness, se estima un porcentaje pequeño de mutación con el que hay un probable cambio de alguna característica del individuo.

En nuestro caso, el fitness está constituido por la suma ponderada de los objetivos a los cuales se les asigna un peso según la preferencia del evaluador, tal como se representa en la ecuación 4.

$$Fitness = U * w_1 + Ah * w_2 + m_R * w_3 \quad (4)$$

Donde $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, es la suma de los pesos asignados a cada objetivo.

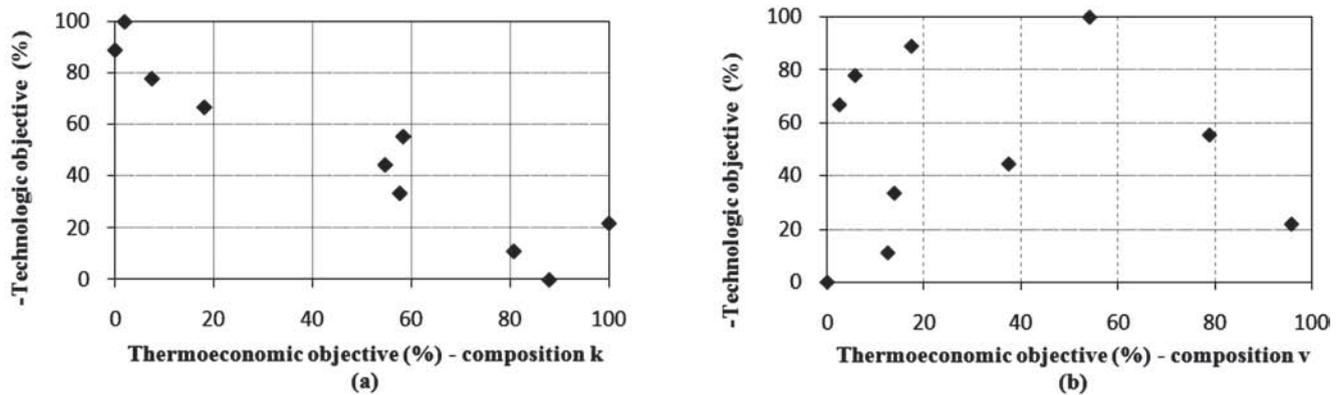
Presentación y análisis de resultados

La optimización consiste en maximizar las funciones objetivo termoeconómica y tecnológica y minimizar la función objetivo ambiental del sistema energético, analizando la variación de la composición de combustible para un óptimo global del sistema asumiendo fijo el modelo físico del sistema energético, la tasa de producción de exergía y el precio de la exergía

en el Mercado de energía. El AG fue programado en Borland C++, el cual fue obteniendo puntos óptimos empleando los siguientes parámetros: 200 generaciones, 100 individuos, 5% de probabilidad de mutación y 80% de probabilidad de cruzamiento. Para cada proceso de optimización, los pesos asignados a los objetivos fueron cambiados pero conservando la suma total de uno ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$).

La Figura 3a muestra que cuando la composición de la mezcla de combustible es constante, hay una relación inversa entre las funciones objetivo consideradas, mientras que si la composición es variable este comportamiento es incierto, tal como se muestra en la Figura 3b donde se observa que para cada proceso de optimización para diferentes pesos se obtiene una configuración variable de la composición del combustible en la mezcla. En todos los casos, se considera el precio de la exergía producida y el modelo físico de cada componente constante. La principal diferencia entre estos diagramas es que para la composición de la mezcla de combustibles constantes no hay un punto óptimo intermedio, mientras que para una composición de mezcla de combustible variable hay un punto óptimo

Figura 3. Objetivo termoeconómico vs tecnológico a composición (a) constante y (b) variable.



aproximadamente en 60% del objetivo termoeconómico y 100% en el objetivo tecnológico.

A cada objetivo se le asigna un peso de importancia, el cual demarca la tendencia del fitness, tal como se muestra en la Tabla 4. Las condiciones de operación del sistema energético permanecen fijas en un caso óptimo para todas las iteraciones; así para cada optimización de pesos diferentes para cada una de las funciones objetivo, se obtiene un punto óptimo global. En la mayoría de los casos aparece el quinto combustible con altas composiciones en la mezcla, por lo que es un referente con mayores posibilidades para tener un sistema óptimo integrado, este combustible es originario de Cesar – Colombia y tiene buena calidad.

También hay combinaciones representativas de mezclas, tales como las que presentan la mezcla de los combustibles quinto y sexto (Cesar y Guajira), en las corridas óptima dos, seis, siete y ocho. Las soluciones para estas corridas tiene pesos bajos para el objetivo termoeconómico,

excepto en la corrida óptima seis donde se le asigna un valor de 50. Para pesos altos al objetivo ambiental, se observa una predominancia del carbon cinco en la mezcla (Cesar), considerando que este este combustible tiene un alto PC y bajo contenido de cenizas, pero con costos altos con respecto a otros carbones utilizados teóricamente en este trabajo.

Pesos bajos en el objetivo tecnológico, hace que se obtenga un punto óptimo con alto contenido de carbon procedente del Cesar en la mezcla de combustibles, tal como se muestra en la corrida óptima tres y nueve de la Tabla 4. En otras corridas óptimas la composición de los combustibles es uniforme (corridas óptimas uno, cuatro y cinco), en estas corridas el objetivo ambiental se le asignó pesos bajos, excepto para la corrida uno.

La Figura 4, muestra la influencia de los pesos en la optimización del problema MO con AE, en el que se configura la frontera Pareto-óptima a partir de la obtención del fitness.

Figura 4. Curva de Óptimos de Pareto a partir de pesos.

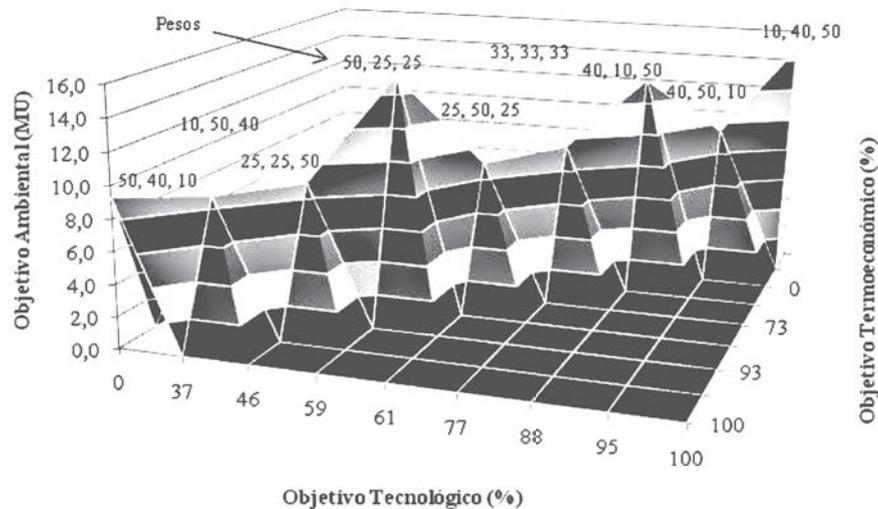


Tabla 4. Resultados de las variables de decisión (composición del carbón) para pesos diferentes.

Corrida óptima	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Weights Composition	Th=10 T=40 E=50	Th=10 T=50 E=40	Th=40 T=10 E=50	Th=40 T=50 E=10	Th=50 T=40 E=10	Th=50 T=25 E=25	Th=25 T=50 E=25	Th=25 T=25 E=50	Th=33 T=33 E=33
X_1	0.034	0.000	0.002	0.230	0.147	0.000	0.004	0.002	0.000
X_2	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
X_3	0.141	0.001	0.000	0.187	0.145	0.000	0.000	0.000	0.001
X_4	0.141	0.000	0.000	0.028	0.145	0.001	0.005	0.000	0.000
X_5	0.278	0.515	0.995	0.301	0.170	0.436	0.494	0.561	0.996
X_6	0.124	0.482	0.000	0.066	0.101	0.562	0.491	0.436	0.002
X_7	0.141	0.001	0.001	0.000	0.145	0.000	0.003	0.000	0.000
X_8	0.141	0.001	0.000	0.187	0.145	0.000	0.002	0.000	0.000
$R(\$/h)$	13189.72	12271.66	9754.36	13373.33	13694.97	12682.20	12359.60	12017.29	9742.56
$-A (\$/h)$	132.99	154.79	158.93	137.66	129.16	154.25	154.20	155.10	158.98
$m_{ash} (Tn/h)$	7.33	4.69	3.71	6.75	7.67	4.86	4.75	4.58	3.67
Properties	Base case				Optimum case (fixed)				
r_p	10.00				14.46				
$\eta_{ac} (\%)$	85.00				81.50				
$T_3 (K)$	1500.00				1419.90				
$\eta_{gt} (\%)$	85.00				87.70				
$\eta_{st} (\%)$	80.00				76.80				
$P_{st} (bar)$	50.0				59.8				
$\eta_p (\%)$	85.00				86.60				

Tal como se explicó anteriormente, el objetivo ambiental condiciona los otros objetivos. El mejor valor se muestra cuando los pesos son de 25 para el objetivo termoeconómico, 50 para el tecnológico y 25 para el ambiental, donde se obtiene valores medios para cada objetivo.

Conclusiones

La evaluación de las ecuaciones globales del problema multiobjetivo, sin llegar a valores de optimización presentan alta variabilidad frente a pequeños cambios en la eficiencia, tienen comportamiento no lineal y está sujeta a la inclusión de variables por el efecto del entorno, lo que sugiere considerar un método no convencional para una optimización que permita encontrar diferentes alternativas de solución y no caer en óptimos locales. La inclusión del objetivo ambiental, desde el punto de vista de generación de residuos, muestra implicaciones importantes en

la optimización como la inclusión de nuevas variables de decisión, tales como la fracción, la calidad y cantidad de los combustibles disponibles.

La necesidad de incluir nuevas variables en los modelos de optimización de energía, no representa complicaciones serias para los métodos heurísticos, los cuales son versátiles con gran capacidad de maniobrabilidad, dando la oportunidad de incluir algunos aspectos del entorno. De cualquier manera, queda el reto de incluir factores inciertos que se manejan en ambientes reales, para tener mayores proximidades en los resultados de la optimización.

Bibliografía

- [1]. P. K. Sahoo, "Exergoeconomic Analysis and Optimization of a Cogeneration System Using Evolutionary Programming," Applied thermal engineering. 2007. pp.

- [2]. A. Lozano, A. Valero, "Theory of the Exergetic Cost," *Energy*. Vol. 18. No. 9. 1993. pp 939 - 960.
- [3]. A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, "Thermal Design and Optimization," Jhon Wiley and Sons, Inc. New York. 1996.
- [4]. G Tsatsaronis, "Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems," Great Britain. 1993.
- [5]. G. Tsatsaronis, J. Pisa, "Exergoeconomic Evaluation and Optimization of Energy Systems – Application to the CGAM Problem," *Energy*. 1994.
- [6]. R. Garduno-Ramirez, K.Y. Lee, "Multiobjective Optimal Power Plant Operation Through Coordinate Control with Pressure Set Point Scheduling," *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 16. No. 2. 2001.
- [7]. B. Galvan, D. Greiner, G. Winter, "Una Comparativa de Algoritmos Evolutivos Multicriterio en Diseños de Sistemas de Seguridad". Segundo Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. MAEB03, 2003.
- [8]. A. C. Caputo, P. M. Pelagagge and P. Salini, "Heat Exchanger Design Based on Economic Optimisation," *Applied Thermal Engineering*. Vol 28. 2008. pp. 1151-1159.
- [9]. K. Deb, Associate Member, IEEE, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 6. 2002. pp. 182-197.
- [10]. V. Manzur, "Fuzzy Thermoeconomic Optimization of Energy-Transforming Systems," *Applied Energy*. Vol 84. 2007. pp. 749-762.
- [11]. C. Giannantoni, A. Lazzaretto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, S. Tonon and S. Ulgiati, "Multicriteria Approach for the Improvement of Energy Systems Design," *Energy* Vol. 30. 2005. pp. 1989-2016.
- [12]. National Energy Technology Laboratory (NETL). *Gasification Alternatives for Industrial Applications*. United States Department of Energy. EUA. 2007.
- [13]. L. Duan and Y. Yang, "Comparative Study on Different IGCC Systems with Quasi-Zero CO2 Emission," *Int. J. of Thermodynamics*. Vol. 10 (No. 2). 2007 pp. 61-69.
- [14]. S. Alvarado and C. Gherardelli, "Input-Output Exergo-Economic Optimization of Multicomponent- Multiproducts Systems Methodology," *Energy*. Vol. 19. No. 2. 1994. pp 251-258.
- [15]. Lazzaretto A. and Toffolo A.. *Energy. economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design*. *Energy* No. 29 . 2004. pp. 1139–1157.
- [16]. Meyer L.. Tsatsaronis G.. Buchgeister J.. Schebek L. *Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems*. *Energy*. No. 34 . 2009. pp. 75–89.
- [17]. Lozano. A and Valero. A.. "Theory of the Exergetic Cost". *Energy*. Vol. 18. No. 9. 1993. pp. 939 - 960.