

## **Enfoque multicriterio para la selección preliminar de la mejor tecnología para la producción de electricidad a partir del carbón mineral**

CÉSAR A. YAJURE R.<sup>1</sup> Y YAISMIR A. GUZMÁN G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central de Venezuela. Escuela Básica de Ingeniería.  
e-mail: cyajure@gmail.com

<sup>2</sup>Ministerio del Poder Popular para la Ingeniería Eléctrica.  
e-mail: yaismir80@gmail.com

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta un enfoque multicriterio para la selección preliminar de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral como energía primaria, utilizando tanto criterios técnicos como criterios ambientales. Como técnica de soporte para la toma de decisión se utilizó la técnica de sobre-clasificación Promethee, en sus versiones I y II, mientras que para obtener los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios se utilizó la técnica de las comparaciones pareadas presente en el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Para ilustrar el enfoque propuesto se estudia un caso propuesto en anteriores investigaciones, en el que se consideran de igual forma dos opciones, es decir, con uso y sin uso de tecnología para captura y almacenaje de dióxido de carbono. Los criterios utilizados en el estudio fueron: impacto ambiental en términos de la cantidad de kilogramos de dióxido de carbono emitidos, los costos totales en dólares por kilovatio instalado, el consumo de carbón en kilogramos por hora, y la tasa calórica.

*Palabras Clave:* Multicriterio, Promethee, carbón mineral, energía eléctrica, impacto ambiental.

### **ABSTRACT**

This paper presents a multicriterio approach for the preliminary selection of the best technology for the production of electricity from mineral coal as primary energy, using both technical and environmental criteria. As a technique for supporting the decision making, outranking method Promethee is used, in its versions I and II, while the weights for relative importance of each one of the criteria paired comparisons in the method of Analytic Hierarchy Process (AHP) was used. To illustrate the proposed approach, there is a case used in previous investigations, in which likewise are considered two options, that is, by use and without use of technology for capture and storage of carbon dioxide. The used criteria were: environmental impact in terms of the quantity of kilograms of carbon dioxide emitted, the total cost in dollars per installed kilowatt, coal consumption in kilograms per hour and the heat rate.

*Keywords:* Multicriteria, Promethee, mineral carbon, electrical energy, environmental impact.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cada día se hace más evidente la importancia de la selección adecuada de las fuentes primarias para la producción de energía eléctrica, debido a una serie de factores tales como: altos precios en el mercado internacional, escasez relativa de las fuentes, impacto ambiental, alta demanda a nivel mundial, entre otros. Adicionalmente, el desarrollo de los países está asociado a su consumo energético, es decir, mientras mayor es el desarrollo de un país mayor es su consumo energético, y por lo tanto mayor será su demanda de energías primarias.

Las fuentes de energía típicas a nivel mundial incluyen carbón mineral, combustibles fósiles provenientes del petróleo, y gas natural. Sin embargo, cada día se están utilizando con mayor frecuencia las fuentes de energía renovables, tales como la eólica, solar, biomasa, entre otras.

De acuerdo con los autores en [8], a nivel mundial la demanda de carbón mineral es la que mayor incremento porcentual ha experimentado en los últimos años, a excepción de las energías renovables, aportando 29% de la demanda mundial de energía en el año 2007, mientras que en el año 2004 el aporte fue del 26%. En cuanto a los combustibles líquidos derivados del petróleo, estos representaron el 36% de la energía mundial consumida en el 2007, y el Gas Natural representó el 24% de la energía mundial consumida.

El carbón mineral es una fuente de energía que está presente de manera abundante en muchos países, principalmente en uno de los países más desarrollados como es los Estados Unidos, o en uno de los países con mayor tasa de crecimiento anual como la República Popular de China. Por esta razón, ha sido ampliamente utilizado como energía primaria para la producción de energía eléctrica, desde hace varias décadas, y para ello se han creado una variedad de tecnologías, con las cuales se busca principalmente aumentar la eficiencia y disminuir el impacto ambiental, sin dejar de tomar en cuenta un criterio que históricamente ha sido preponderante como lo es el costo.

De acuerdo a los autores en [2] el carbón mineral contribuye con el 40% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, y con más del 70% de las emisiones de CO<sub>2</sub> que surgen de la producción de energía eléctrica. Por otra parte, según la Asociación Mundial del Carbón (2012), el carbón mineral proporciona el 41% de la energía eléctrica generada a nivel mundial, por lo que juega un papel preponderante en el suministro de energía, especialmente en los países en desarrollo. Se hace conveniente entonces, crear una metodología multicriterio que permita hacer la selección de la tecnología a utilizar para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral, tomando en cuenta el impacto ambiental de las mismas, así como la eficiencia y los costos.

La presente investigación se dividió en 5 secciones. En la sección II se presentan los conceptos básicos necesarios para comprender el estudio desarrollado, en la sección III se presenta la metodología planteada basada en técnicas de toma de decisiones multicriterio, luego en la sección IV se presentan las conclusiones, para

finalmente presentar las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo de la investigación.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS

### *Toma de Decisiones Multicriterio*

La toma de decisiones consiste en seleccionar una alternativa, dentro de un conjunto de alternativas, considerando uno o varios criterios para realizar tal selección.

Cuando se tiene un problema de selección de alternativas, sujeto a varios criterios, se tiene un problema de toma de decisiones multicriterio. De acuerdo con el autor en [3], tomar decisiones “es el estudio de identificar y seleccionar alternativas basados en los valores y preferencias del tomador de decisiones. Tomar una decisión implica que hay varias alternativas de las cuales seleccionar la preferida, y en tal caso no solo queremos identificar tantas alternativas como sea posible sino también seleccionar aquella que mejor satisfaga nuestras metas, objetivos, deseos, valores, etc.”.

Las situaciones de decisión reales por lo general involucran problemas de toma de decisiones multicriterio, por lo que se han desarrollado métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), de los cuales históricamente han surgido dos escuelas de pensamiento, la escuela norteamericana y la escuela francesa o europea. La primera incluye los métodos basados en la teoría de utilidad, mientras que la escuela europea incluye los métodos de sobre-clasificación.

Dentro de los métodos de sobre-clasificación se tiene el método de organización y jerarquización por preferencias PROMETHEE, el cual fue propuesto por J. Brans y PH. Vincke en 1985, en [1]. A partir de esa investigación se han desarrollado variantes del método, sin embargo, se siguen utilizando las versiones originales Promethee I y Promethee II.

Los autores de [6] plantean que para aplicar el método Promethee se debe, en primer lugar, determinar el desempeño de las alternativas para cada uno de los criterios considerados. Seguidamente, se utilizan funciones de preferencia generalizadas para comparar las alternativas en pares, para cada uno de los criterios. Con la información anterior, se calculan flujos de sobre-clasificación, positivos y negativos, para ser utilizados como medidas de dominancia de las alternativas. Finalmente, basándose en éstos flujos, se obtiene un pre-ordenamiento parcial de las alternativas, en el que adicionalmente se puede observar cuales alternativas son incomparables entre sí. Hasta este punto el método se conoce como Promethee I.

Al combinar los flujos de sobre-clasificación positivos y negativos de cada una de las alternativas, se obtiene lo que los autores en [1] llamaron flujo de sobre-clasificación neto, el cual se utiliza para obtener un pre-ordenamiento total de las alternativas, que es el producto que se obtiene al aplicar Promethee II.

Entonces, Promethee I permite obtener un pre-ordenamiento parcial de las alternativas con información sobre las incomparabilidades entre éstas. Mientras que Promethee II permite obtener una jerarquización completa de las alternativas, pero no se observa información con respecto a las posibles incomparabilidades. Por esta razón, los autores en [6] recomiendan aplicar ambas versiones del Promethee a los problemas de decisión multicriterio considerados.

En cualquier caso, es necesario determinar los pesos de cada uno de los criterios considerados, que reflejen la importancia relativa de dichos criterios. Para la determinación de éstos pesos, los autores en [4] recomiendan utilizar la técnica de las comparaciones pareadas propuesta por Saaty en el método Proceso Jerárquico Analítico (AHP).

### ***Tecnologías para producir carbón***

Para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral se tiene un conjunto de tecnologías, unas más recientes que las otras. Las tecnologías más antiguas son las asociadas al uso de carbón pulverizado, entre las que destacan: combustión de carbón pulverizado utilizando ciclos de vapor en condiciones sub-críticas, super-críticas y ultra super-críticas, y lecho fluidizado en condiciones sub-críticas. Adicional a estas tecnologías asociadas a carbón pulverizado, se tiene la gasificación integrada en ciclo combinado.

### **Tecnologías basadas en carbón pulverizado**

En una unidad de carbón pulverizado, el carbón es molido hasta quedar pulverizado, e inyectado a través de quemadores en el horno junto con el aire de combustión. Las partículas de carbón fino se calientan rápidamente, sufriendo del proceso de pirolisis. El volumen del aire de combustión se mezcla entonces en la flama para quemar completamente el carbón. El gas de ducto desde la caldera pasa a través de las unidades de limpieza para remover partículas tales como SO<sub>x</sub>, and NO<sub>x</sub>. El gas que sale de la sección de limpieza reúne los criterios de límites permitidos de sustancias contaminantes, pues típicamente contiene de 10–15% de CO<sub>2</sub> y esta esencialmente a presión atmosférica.

Se genera vapor saturado seco en los tubos de la caldera del horno, el cual es recalentado en el super-calentador del horno. El vapor super-calentado de alta presión, así obtenido, acciona la turbina de vapor acoplada al generador eléctrico. El vapor de baja presión que sale de la turbina de vapor, es condensado y rebombeado a la caldera para su conversión en vapor.

La operación en condiciones sub-críticas se refiere a una presión de vapor por debajo de los 3200 psi, y una temperatura por debajo de 550°C. Las unidades

operando a condiciones sub-críticas tienen eficiencias entre 33-37% dependiendo de la calidad del carbón, parámetros de diseño y operación, y ubicación de la planta.

Cuando los parámetros se mueven desde las condiciones sub-críticas hasta condiciones super-críticas o ultra super críticas, la eficiencia de las unidades mejora. Esto implica trabajar a valores mayores de temperatura y presión del vapor. La eficiencia de las unidades operando en condiciones super-críticas varía en el rango 37-40%, y valores típicos de presión y temperatura del vapor están alrededor de 3530 psi y 565°C. Cuando se trabaja con temperaturas mayores a los 565°C se tiene entonces las unidades trabajando a condiciones ultra super-críticas, lo cual incrementa la eficiencia al rango de 44-46%.

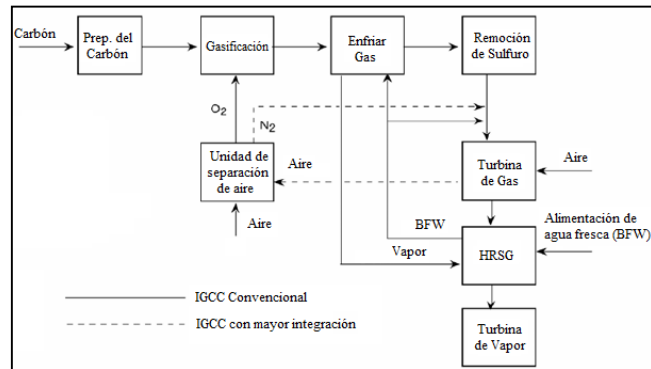
La combustión en lecho fluidizado implica quemar el carbón con aire en un lecho fluidizado, generalmente del tipo circulante. Esta tecnología es más conveniente para combustible de baja calidad y costo, es decir, carbón de bajo valor calórico. Se alimenta el lecho con carbón triturado y caliza, donde la caliza es calcinada y se produce cal. El lecho está compuesto entonces principalmente de cal, con un porcentaje de carbón, y material de carbón recirculando. Opera a bajas temperaturas favoreciendo la baja formación de NO<sub>x</sub> y la captura de SO<sub>2</sub>. El ciclo de vapor puede ser sub-crítico o super-crítico, con eficiencia de las unidades de generación similares a los casos anteriores, que trabajan bajo esas mismas condiciones.

### **Gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC)**

Bajo esta tecnología, en primer lugar se gasifica el carbón para producir una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono conocida como syngas. Este gas sintético, después de ser limpiado, se quema en una turbina de gas, la cual acciona al generador eléctrico. El escape de la turbina va a un generador de calor recuperado (HRSG) para aumentar el vapor que acciona el generador de la turbina de vapor. En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques de una planta que usa este tipo de tecnología.

Esta tecnología de ciclo combinado es similar a la tecnología utilizada en plantas de potencia de ciclo combinado que queman gas natural. El principal componente es el gasificador, del cual existen en la actualidad distintas tecnologías.

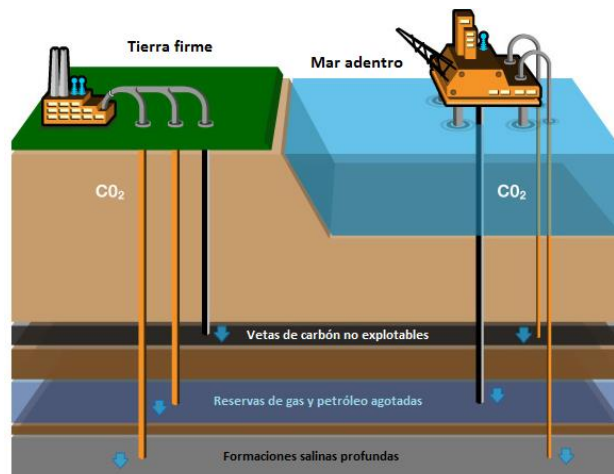
Esta tecnología presenta un mejor desempeño desde el punto de vista ambiental, así como mayores valores de eficiencia, a un costo de inversión mayor. Consume entre un 10% y un 20% menos combustible que una planta convencional de vapor a carbón, y consume aproximadamente 30% menos de agua.



**Fig. 1.** Diagrama de Bloque de una planta IGCC.

### Captura de CO<sub>2</sub> (CCS)

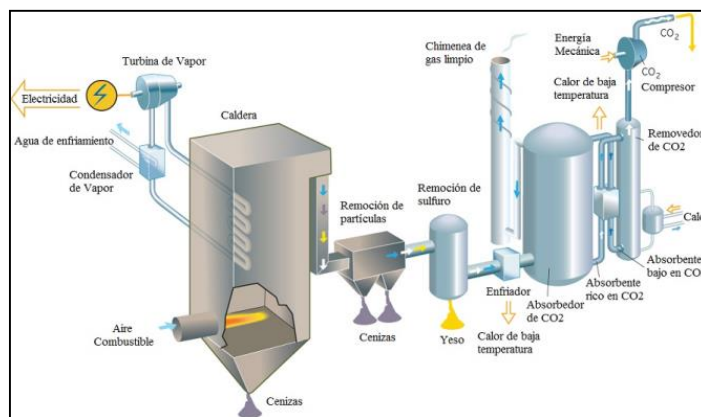
La captura y almacenaje de dióxido de carbono (CCS: Carbon Capture and Storage) es una familia de tecnologías que permite reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hacia el medio ambiente, provenientes de la combustión de combustible, a través de su captura. Luego de capturado, el CO<sub>2</sub> se transporta por medio de barcos o tuberías hasta su sitio de almacenaje bajo tierra, en campos de gas y/o petróleo ya en desuso, o en formaciones salinas profundas. En la figura 2 se muestra un esquema de estas opciones para el almacenaje de dióxido de carbono capturado.



**Fig. 2.** Esquema de alternativas para el CCS.  
Adaptado de [www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org)

En la actualidad, para la captura del dióxido de carbono existen hasta tres diferentes tecnologías. Estas son: pre-combustión, post-combustión, y oxy-fuel. En la

figura 3 se muestra un esquema de producción de electricidad a partir del carbón mineral, en el que se incluye la captura post-combustión del dióxido de carbono.



**Fig. 3.** Esquema de captura de CO<sub>2</sub> pos-combustión  
Adaptado de [www.vattenfal.com](http://www.vattenfal.com)

De la figura 3 se puede observar que luego de la combustión en la caldera, el gas de salida se somete a un proceso de remoción de partículas y de sulfuro, antes de pasar por el absorbedor de CO<sub>2</sub>, y luego por el removedor y el compresor de CO<sub>2</sub>, para que finalmente, el dióxido de carbono resultante sea trasladado y almacenado.

### 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA

#### *Metodología Planteada*

La metodología propuesta consiste en utilizar el método Multicriterio de sobreclasificación Promethee, en sus versiones I y II, para determinar la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral. Los criterios a utilizar son: impacto ambiental en kg de CO<sub>2</sub> emitidos por hora (IA), la tasa calórica (heatrate) en BTU/kWh (HR), el consumo de carbón en kg por hora (CC), y los costos totales en \$ por kW (CT).

Las tecnologías a considerar son: A) Carbón pulverizado ciclo de vapor en condiciones sub-críticas, B) carbón pulverizado ciclo de vapor en condiciones super-críticas, C) lecho fluidizado ciclo de vapor en condiciones sub-críticas, y D) gasificación integrada en ciclo combinado.

Para obtener los pesos de cada uno de los criterios se aplicó la técnica de las comparaciones pareadas propuesta por Saaty en la técnica del Proceso Jerárquico Analítico, tal como se presenta en el trabajo [7].

### *Caso de Estudio*

Los datos de desempeño de cada una de las tecnologías fueron tomados de la investigación desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts [5], en el que se considera como base una planta para generar 500 MW de potencia, con carbón del tipo bituminoso Illinois # 6. Se consideran dos opciones para evaluar el desempeño de cada una de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios: incorporación o no de tecnología para la captura de CO<sub>2</sub> (CCS).

Entonces, los valores de desempeño de las tecnologías consideradas, sin la incorporación de CCS, se presentan en la tabla 1. De igual manera, los valores de desempeño de las tecnologías consideradas, con la incorporación de CCS, se presentan en la tabla 2.

**Tabla 1.** Desempeño de las tecnologías consideradas.  
Sin CCS.

Tecnología	IA (kg/h CO <sub>2</sub> )	HR (BTU/kWh)	CC (Kg/h)	CT (\$/kW)
<b>A</b>	466.000	9.950	208.000	1.280
<b>B</b>	415.000	8.870	184.984	1.330
<b>C</b>	517.000	9.810	297.000	1.330
<b>D</b>	415.983	8.891	185.376	1.430

**Tabla 2.** Desempeño de las tecnologías consideradas.  
Con CCS.

Tecnología	IA (kg/h CO <sub>2</sub> )	HR (BTU/kWh)	CC (Kg/h)	CT (\$/kW)
<b>A</b>	63.600	13.600	284.000	2.230
<b>B</b>	54.500	11.700	243.000	2.140
<b>C</b>	70.700	13.400	406.000	2.270
<b>D</b>	51.198	10.942	228.000	1.890

De las tablas 1 y 2 se puede notar que cuando se incorpora la tecnología CCS en el estudio, bajan los niveles de emisiones contaminantes, pero aumenta el costo de producir la electricidad, tal como era de esperarse.

### *Determinación de los pesos de importancia de los criterios*

Luego de aplicar la técnica de las comparaciones pareadas planteada por Saaty, para lo cual se consultó a un grupo de especialistas en la materia, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3. De la misma se puede observar que el



Impacto Ambiental fue el criterio que se consideró más importante, seguido por la tasa calórica y el consumo de carbón.

**Tabla 3.** Matriz de comparaciones pareadas.

Criterios	IA	HR	CC	CT
IA	1	3	3	5
HR	1/3	1	3	3
CC	1/3	1/3	1	3
CT	1/5	1/3	1/3	1

Seguidamente, aplicando la técnica de los eigenvectores se obtienen los pesos correspondientes a cada uno de los criterios, los cuales se muestran en la tabla 4. Estos pesos de importancia serán parte de los insumos para la aplicación de la técnica Promethee.

**Tabla 4.** Pesos de importancia relativa.

Criterios	Peso
Impacto Ambiental	0,508
Tasa Calórica	0,265
Consumo de Carbón	0,151
Costos Totales	0,075

La consistencia de este análisis se obtuvo aplicando el procedimiento propuesto por Saaty, el cual se basa a su vez en la aplicación de las siguientes expresiones:

$$CR = CI/0,9 \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$A \cdot x = \lambda_{m\acute{a}x} \cdot x \quad (3)$$

Donde:

*CR*: Razón de consistencia

*CI*: Índice de consistencia

*n*: Número de criterios

*A*: Matriz de comparación pareada

*x*: Vector de Eigenvectores

Resultando, una razón de consistencia igual a 0,0734, lo cual según el autor en [7] significa que los expertos hicieron la valoración de las importancias relativas de los criterios de una manera consistente.

### *Aplicación de Promethee*

Una vez obtenidos los pesos de importancia relativa de los criterios aplicando la técnica de las comparaciones pareadas, el siguiente punto consiste en aplicar del método multicriterio Promethee. Para ello se consideran las dos opciones mencionadas anteriormente, con tecnología CCS y sin tecnología CCS.

#### **Sin captura de CO<sub>2</sub>**

En primer lugar se calculan lo que los autores en [1] llamaron Índices de Preferencia, los cuales se presentan en la tabla 5, donde las  $a_i$ , representan cada una de las alternativas consideradas, es decir:

- $a_1$ : Carbón pulverizado condiciones sub-críticas
- $a_2$ : Carbón pulverizado condiciones super-críticas
- $a_3$ : Lecho fluidizado condiciones sub-críticas
- $a_4$ : Gasificación integrada en ciclo combinado

Con éstos índices de Preferencia se calculan los flujos de entrada y salida asociados a cada una de las alternativas. Dichos flujos son los que se obtienen al aplicar Promethee I. Esta información se presenta en la tabla 6.

**Tabla 5.** Índices de Preferencia  $\pi_i(a_i, a_j)$ . Sin CCS.

Alternativas	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
$a_1$		0,075	0,735	0,075
$a_2$	0,925		0,925	1,000
$a_3$	0,265	0,075		0,075
$a_4$	0,925	0,000	0,925	

**Tabla 6.** Flujos de las alternativas. Sin CCS.

Flujo	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
$\phi_i^+$	0,885	2,850	0,416	1,850
$\phi_i^-$	2,115	0,150	2,584	1,150

De la tabla 6 se puede observar que la alternativa  $a_2$  (carbón pulverizado, ciclo de vapor en condiciones súper-críticas) sobre-clasifica a cada una de las otras alternativas, pues cumple con la condición de que su flujo positivo es el máximo y su flujo negativo es el mínimo. De igual manera, se puede ver, que de las tres alternativas sobre-clasificadas por  $a_2$ , la alternativa  $a_4$  sobre-clasifica a las dos restantes. Por último, de las dos alternativas sobre-clasificadas por  $a_4$ , la alternativa  $a_1$  sobre-clasifica a la alternativa  $a_3$ .

Las relaciones parciales así obtenidas se presentan en la figura 4, en la que se puede observar que todas las alternativas son comparables entre sí.



**Fig. 4.** Relaciones parciales, sin CCS.

Con la información presentada en la tabla 6 se pueden calcular los flujos netos, los cuales son los resultados que se obtienen al aplicar Promethee II. Esta información se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7.** Flujos netos sin CCS.

Flujo	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
$\phi_i$	-1,230	2,699	-2,169	0,699

De la tabla 7 se puede observar que la técnica Promethee II permite obtener un orden total de las alternativas consideradas, al jerarquizarlas de acuerdo al mayor valor de flujo neto. En ese sentido, se puede notar que el orden total de las alternativas es el que se muestra a continuación:

- a<sub>2</sub>: Carbón pulverizado condiciones super-críticas
- a<sub>4</sub>: Gasificación integrada en ciclo combinado
- a<sub>1</sub>: Carbón pulverizado condiciones sub-críticas
- a<sub>3</sub>: Lecho fluidizado condiciones sub-críticas

**Con captura de CO<sub>2</sub>**

Los índices de preferencia calculados para el caso estudiado, incluyendo la captura de CO<sub>2</sub>, se presenta en la tabla 8.

**Tabla 8.** Índices de Preferencia  $\pi_i(a_i, a_j)$ . Con CCS.

Alternativas	a1	a2	a3	a4
a1		0,000	0,735	0,000
a2	1,000		1,000	0,000
a3	0,265	0,000		0,000
a4	1,000	1,000	1,000	

Con los índices de Preferencia se calculan los flujos de entrada y salida asociados

a cada una de las alternativas, información la cual está asociada a Promethee I. Esta información se presenta en la tabla 9.

**Tabla 9.** Flujos de las alternativas. Con CCS.

Flujo	a1	a2	a3	a4
$\phi^+$	0,735	2,000	0,265	3,000
$\phi^-$	2,265	1,000	2,735	0,000

De la tabla 9 se puede observar que la alternativa  $a_4$  (Gasificación integrada en ciclo combinado) sobre clasifica a cada una de las otras tres alternativas, puesto que su flujo positivo es el máximo y a la vez su flujo negativo es el mínimo. De las restantes alternativas se puede notar igualmente que  $a_2$  sobre-clasifica tanto a la alternativa  $a_1$  como a la alternativa  $a_3$ . De éstas dos últimas, la alternativa  $a_1$  sobre-clasifica a la alternativa  $a_3$ .

Las relaciones parciales así obtenidas se presentan en la figura 5, en la que se puede observar que todas las alternativas son comparables entre sí.



**Fig. 5.** Relaciones parciales, con CCS.

A partir de los flujos de entrada y salida, se calculan los flujos netos, los cuales son los resultados que se obtienen al aplicar Promethee II. Esta información se presenta en la tabla 10.

**Tabla 10.** Flujos netos con CCS.

Flujo	a1	a2	a3	a4
$\phi$	-1,531	1,000	-2,469	3,000

De la tabla 10 se obtiene un orden total de las alternativas consideradas, puesto que este es el producto que se genera al aplicar la técnica Promethee II, es decir, se jerarquizan las alternativas de acuerdo al mayor valor de flujo neto. En ese sentido, se puede observar que el orden total de las alternativas es el que se muestra a continuación:

- $a_4$ : Gasificación integrada en ciclo combinado
- $a_2$ : Carbón pulverizado condiciones super-críticas
- $a_1$ : Carbón pulverizado condiciones sub-críticas
- $a_3$ : Lecho fluidizado condiciones sub-críticas

#### 4. CONCLUSIONES

La metodología Promethee es una técnica multicriterio útil para la toma de decisiones en presencia de múltiples criterios, por lo general contrapuestos entre sí. En la versión Promethee I se obtiene un orden parcial de las alternativas, y se puede analizar la comparabilidad entre ellas, mientras que con la versión Promethee II, se puede obtener un orden total de las alternativas.

La combinación de dos técnicas multicriterio, AHP y Promethee, resulta útil para determinar la mejor tecnología para obtener energía eléctrica a partir del carbón mineral como materia prima, siendo AHP bastante útil para obtener los pesos de importancia relativa de los criterios.

La valoración de las importancias relativas de los criterios fue realizado de una manera consistente por los expertos consultados.

Al aplicar al caso de estudio la metodología Promethee, se puede determinar que la solución óptima correspondió a la tecnología de carbón pulverizado en condiciones de vapor super-críticas, cuando no se consideró el uso de captura de CO<sub>2</sub>. Por otra parte, al considerar la captura de CO<sub>2</sub>, la alternativa seleccionada correspondió a la gasificación integrada en ciclo combinado.

La selección final de la tecnología debería hacerse entre las alternativas: tecnología de carbón pulverizado en condiciones de vapor super-críticas y gasificación integrada en ciclo combinado, puesto que resultaron ser las óptimas en las variantes consideradas.

En las dos variantes estudiadas, se obtuvo como resultado que la alternativa asociada a Lecho fluidizado con ciclo de vapor en condiciones sub-críticas es la menos apropiada.

Las preferencias del decisor se reflejan en los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios considerados, en los que se observa que para los decisores el impacto ambiental es de primera importancia. Este resultado concuerda con el orden total de las alternativas, en las que la tecnología óptima resultó aquella con el menor impacto ambiental.

#### 5. REFERENCIAS

1. Brans, J.P.; PH. Vincke: A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). Management Science, Vol. 31, No 6, June 1985.

2. Burnard K., Bhattacharya S.: Power Generation from Coal. Ongoing Developments and Outlook. International Energy Agency, Information Paper. Octubre 2011.
3. Harris, R.: Introduction to Decision Making. Virtual Salt. Junio 2012. <http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>.
4. Macharis C, y otros: PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. European Journal of Operational Research. N° 153 (2004), pp. 307–317.
5. Massachusetts Institute of Technology. The Future of Coal. Options for a constrained – coal world. An Interdisciplinary MIT Study, 2007. [http://web.mit.edu/coal/The\\_Future\\_of\\_Coal.pdf](http://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf).
6. Oberchmidt J., Geldermann J., Ludwig J.: Modified Promethee approach for assessing energy technologies. International Journal of Energy Sector Management, Vol. 4 No. 2, 2010, pp. 183-212.
7. Saaty T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, 2008.
8. Spiegel E., McArthur N.: La nueva era del cambio energético. Opciones para impulsar el futuro del planeta. Editorial McGraw Hill, 2010.
9. World Coal Association. Coal – Energy for Sustainable Development. Abril 2012. [www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org).