

Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral.

Comparison of multicriteria methods AHP and Fuzzy AHP in selecting the best technology for the production of electricity from coal.

César Aristóteles Yajure

Facultad de ingenierías, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Correo-e: cyajure@gmail.com

Resumen— En la siguiente investigación se presenta una metodología multicriterio para la selección de la mejor tecnología a utilizar para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral. Se consideran criterios tanto técnico-económicos, como ambientales. Como herramienta de soporte para la toma de decisión se trabajó con el Proceso Analítico de Jerarquización, en su versión tradicional y en su versión difusa, para efectos de comparación. Para ilustrar el enfoque propuesto, se estudia un caso utilizado en anteriores investigaciones, en el que los criterios considerados 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, Carbón Mineral, Energía Eléctrica, Impacto Ambiental.

Abstract— This paper presents a multicriteria approach for the selection of the best technology to use for the production of electricity from mineral coal. It considers both technical-economical and environmental criteria. As a technique for supporting the decision making, Analytical Hierarchy Process is used, in its traditional and fuzzy versions, to compare them. To illustrate the proposed approach, there is a case used in previous investigations, in which the considered 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.

Key Word —Multicriteria, Mineral Coal, Electrical Energy, Environmental Impact.

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un elemento de suma importancia en la sociedad actual, puesto que es una de las variables necesarias para el desarrollo industrial de los países, así como para el bienestar de los pueblos, por lo que se hace conveniente mantener la continuidad en la prestación del servicio eléctrico.

Para la generación de energía eléctrica, se debe seleccionar el conjunto de energías primarias que se utilizará en este proceso de generación. 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 [1], 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, y 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 CO₂, y con más del 70% de las emisiones de CO₂ 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. En [3] los autores presentaron un enfoque multicriterio similar, pero utilizando la técnica de sobre-clasificación Promethee, en la que existe subjetividad para el establecimiento de los pesos de importancia relativa de los criterios utilizados. La metodología planteada entonces, debe ser tal que minimice la subjetividad en el establecimiento de los pesos de importancia relativa de dichos criterios.

La presente investigación se dividió en 5 secciones. En la sección II se presentan los conceptos básicos asociados a los métodos de toma de decisiones multicriterio, así como la metodología difusa planteada, en la sección III se aplica la metodología planteada al caso de estudio, luego en la sección IV se presentan las conclusiones, para finalmente presentar las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo de la investigación.

II. MÉTODOS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Toma de Decisiones Multicriterio

De acuerdo con [4], el análisis multicriterio es un enfoque que permite determinar las preferencias del decisor entre un conjunto de opciones o alternativas. Mientras que el análisis de decisión multicriterio es tanto un enfoque como un conjunto de técnicas, cuya meta es proporcionar un orden global a un grupo de opciones, desde la opción más preferida hasta la opción menos preferida. Las opciones podrían diferir en cuanto al nivel de alcance de los objetivos, y ninguna opción es obviamente la mejor en el alcance de todos los objetivos.

Por otra parte, Harris [5] plantea que tomar decisiones es el estudio de identificar y seleccionar alternativas basados en los valores y preferencias del tomador de decisiones. Se parte de la existencia de varias alternativas, de las cuales se quiere seleccionar la preferida, en el sentido de que sea la que mejor satisfaga nuestros intereses.

Sí en una situación específica se deben tomar decisiones en un ambiente en el que se tienen múltiples y contradictorias evaluaciones, se está tratando con problemas con múltiples criterios, que deben ser considerados de manera simultánea, y que como se acaba de indicar son contradictorios entre sí.

Entonces, se habla de problemas multicriterio, que deben ser abordados por medio de técnicas de soporte para la toma de decisiones.

Proceso Analítico de Jerarquización (AHP)

El Proceso Analítico de Jerarquización (Analytical Hierarchy Process, AHP) es una técnica de soporte para la toma de decisiones multicriterio el cual se basa en la jerarquización, comparación pareada, y en los pesos de importancia, de los criterios considerados. Fue propuesto por Thomas Saaty en 1980, y consiste en convertir evaluaciones subjetivas de importancia relativa, en un conjunto de pesos totales, que servirán posteriormente para hacer la selección de la mejor alternativa.

En [6] Saaty plantea que para tomar una decisión de una manera organizada, se debe descomponer el problema de decisión en una serie de pasos:

- 1) Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento que se genera.
- 2) Estructurar la jerarquía de decisión desde la parte superior con la meta que se busca alcanzar, luego los objetivos desde una perspectiva amplia, para seguir con los niveles intermedios, hasta los niveles más bajos, los cuales usualmente son el conjunto de alternativas.
- 3) Construir un conjunto de matrices de comparaciones pareadas. Cada elemento en un nivel superior se usa para comparar los elementos en el nivel inmediatamente inferior con respecto a él.
- 4) Utilizar las prioridades obtenidas de las comparaciones para pesar las prioridades en el nivel inmediatamente inferior. Continúe este proceso de pesa y suma hasta que se obtengan las prioridades finales de las alternativas en el nivel más bajo de la jerarquización.

Para realizar las comparaciones de pares mencionada en el punto 3 se necesita una escala numérica que indique cuantas veces es más importante un elemento sobre otro elemento, con respecto al criterio o propiedad con el cual están siendo comparados. En la tabla 1 se muestra la escala propuesta por Saaty (2008).

Intensidad de Importancia	Definición
1	Igual Importancia
3	Importancia moderada
5	Fuerte Importancia
7	Muy fuerte o importancia demostrada
9	Importancia extrema
2,4,6,8	
Valores Recíprocos	Si la actividad i tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad j, entonces la actividad j tiene el valor recíproco correspondiente cuando se compara con la actividad i.

Tabla 1. Escala de Comparación del método AHP.

Una vez obtenida la matriz de comparaciones pareadas se procede a obtener los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios utilizando la técnica de los autovectores. Éstos resultados se someten a un procedimiento propuesto por Saaty, y planteado por Triantaphyllou y otros en [7], para determinar su consistencia.

Finalmente, se multiplica cada peso de cada alternativa con cada uno de los criterios correspondientes, para obtener la puntuación de cada alternativa, y así proceder a la toma de decisión.

Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP)

Conjuntos Difusos

Los conjuntos difusos son una generalización de la teoría de conjuntos clásicos que introdujo Zadeh en 1965, como una manera matemática de representar la vaguedad del lenguaje ordinario. Según Javanbarg [8], un conjunto difuso es una clase de objetos con un continuo de grados de membresía, en los que los términos lingüísticos se representan por medio de las funciones de membresía, valoradas en intervalos de los números reales, los cuales traducen la vaguedad e imprecisión del pensamiento humano relacionado con el problema propuesto.

Éstos conjuntos serán un par ordenado compuesto por el elemento y un valor entre cero y uno que indica que tanto pertenece dicho elemento a la clase definida por el conjunto. Entonces, dado un Universo X, la pertenencia o no de un elemento x a un conjunto A específico queda determinada por la función de membresía que se presenta en la ecuación (1).

$$A = \{x, \mu_A(x)/x \in X\} \tag{1}$$

Ahora, desde un punto de vista matemático existe una variedad de funciones de membresía, de las cuales las más utilizadas son la función Gamma, la función Lambda o Triangular, y la función Pi o Trapezoidal. Para reflejar la vaguedad de los parámetros presentes en la Toma de

Decisiones, generalmente se han utilizado los números difusos triangulares y trapezoidales.

Metodología Difusa

Esta variante consiste en incorporar los números difusos o triangulares a la técnica AHP tradicional. Específicamente, se utilizan los números difusos para indicar la importancia relativa que un factor de jerarquía tiene sobre otro, y así construir las matrices de comparaciones con números triangulares.

Un número difuso del tipo triangular (\tilde{A}) se representa usualmente como una tripleta (l, m, n) donde m , n , y l corresponden al valor medio, y a los límites superior e inferior, respectivamente, de la función de membresía triangular, tal como se observa en la figura 1.

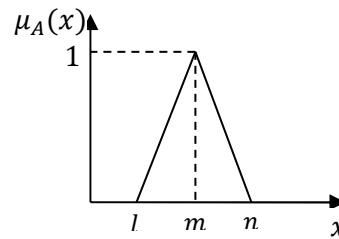


Figura 1. Función de membresía triangular.

Para la determinación de las matrices de comparaciones pareadas existen varias propuestas. En esta investigación se utiliza la planteada por Kabir y Hasin en [9], en la cual proponen variables lingüísticas para los pesos de importancia de cada criterio. En la figura 2 y en la tabla 2 se muestra esta información.

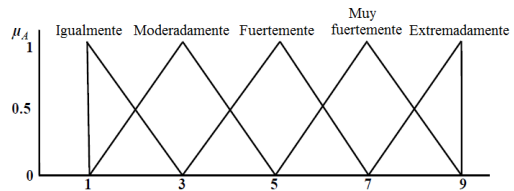


Figura 2. Función de membresía comparaciones pareadas.

Escala lingüística para la importancia	Número Difuso	Función de Membresía	Dominio	Escala difusa triangular (l, m, n)
Exactamente Igual	$\tilde{1}$			(1,1,1)
Igual Importancia		$\mu_M(x) = (3-x)/(3-1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,1,3)
Moderadamente importante	$\tilde{3}$	$\mu_M(x) = (x-1)/(3-1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,3,5)
		$\mu_M(x) = (5-x)/(5-3)$	$3 \leq x \leq 5$	
Fuerte Importancia	$\tilde{5}$	$\mu_M(x) = (x-3)/(5-3)$	$3 \leq x \leq 5$	(3,5,7)
		$\mu_M(x) = (7-x)/(7-5)$	$5 \leq x \leq 7$	
Muy fuerte importancia	$\tilde{7}$	$\mu_M(x) = (x-5)/(7-5)$	$5 \leq x \leq 7$	(5,7,9)
		$\mu_M(x) = (9-x)/(9-7)$	$7 \leq x \leq 9$	
Extremadamente preferido	$\tilde{9}$	$\mu_M(x) = (x-7)/(9-7)$	$7 \leq x \leq 9$	(7,9,9)
Si la actividad i tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad j, entonces la actividad j tiene el valor recíproco cuando se compara con la actividad i.			Valores Recíprocos $\tilde{M}_i^{-1} = (1/n_i, 1/m_i, 1/l_i)$	

Tabla 2. Escala de Comparación del método FAHP.

Una vez obtenida la matriz de comparaciones pareadas, el siguiente paso consiste en determinar la media geométrica difusa para cada criterio. De acuerdo con [10], la técnica geométrica se utiliza para calcular la media geométrica (\tilde{r}_i) de los valores de comparación difuso del criterio i con respecto a cada uno de los otros criterios, tal como se muestra en la ecuación (2), donde \tilde{a}_{in} es el valor difuso de la comparación pareada del criterio i con respecto al criterio n .

$$\tilde{r}_i = [\tilde{a}_{i1} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \tag{2}$$

Seguidamente se calculan los pesos difusos de cada uno de los criterios. Para conseguir el peso difuso del criterio i se aplica la ecuación (3).

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \tag{3}$$

El peso difuso del criterio i se transforma posteriormente en un número equivalente positivo, aplicando la expresión dada por la ecuación (4), para seguidamente normalizar este número utilizando la expresión dada por la ecuación (5).

$$M_i = \frac{l \cdot w_i + m \cdot w_i + n \cdot w_i}{3} \tag{4}$$

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \tag{5}$$

Finalmente, se multiplica cada peso de cada alternativa con cada uno de los criterios correspondientes, para obtener la puntuación de cada alternativa, y así proceder a la toma de decisión, de la cual se espera se seleccione la alternativa que obtenga la mayor puntuación.

III. APLICACIÓN DE MÉTODOLÓGÍA A CASO DE ESTUDIO

Caso de Estudio

Se desea 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 dióxido de carbono (CO₂) emitidos por hora (IA), la tasa calórica (heat rate) 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. La jerarquía de decisión para este caso se presenta en la figura 3.

Los datos de desempeño de cada una de las tecnologías fueron tomados de la investigación desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts en el año 2006 [11], en el que

se considera como base una planta para generar 500 MW de potencia eléctrica, con carbón del tipo bituminoso Illinois # 6. Entonces, los valores de desempeño de las tecnologías consideradas, se presentan en la tabla 3.

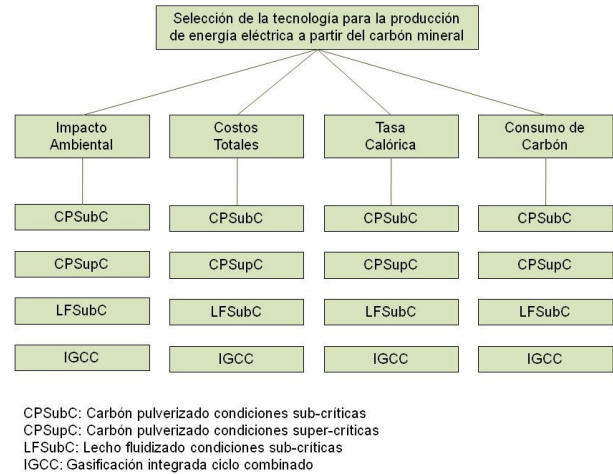


Figura 3. Jerarquía de decisión del caso de estudio.

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

Tabla 3. Desempeño de las tecnologías consideradas.

Aplicación de AHP a Caso de Estudio

El primer paso correspondió a la comparación pareada de los criterios, consultando la opinión de un grupo de expertos, y utilizando la escala de comparación presentada en la tabla 1. Los resultados se presentan en la tabla 4. Seguidamente, aplicando la técnica de los auto-vectores se obtuvieron los pesos de importancia relativa, los cuales se presentan en la tabla 5.

Criterios	IA	HR	CC	CT
IA	1	3	3	3
HR	0,33	1	1	1
CC	0,33	1,00	1	3
CT	0,33	1,00	0,33	1,00

Tabla 4. Comparación pareada de los criterios.

Criterios	Peso
Impacto Ambiental	0,487
Heat Rate	0,162
Consumo de Carbón	0,223
Costos Totales	0,127

Tabla 5. Pesos de los criterios.

La razón de consistencia en este caso fue de 5,72%, lo que indica que los expertos consultados, con respecto a la importancia relativa de los criterios, opinaron de una manera consistente.

Posteriormente, se obtienen los pesos de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios. Esto se hace normalizando los valores de desempeño que se presentan en la tabla 3. Los resultados correspondientes se muestran en la tabla 6.

	IA	HR	CC	CT
A	0,241	0,235	0,253	0,262
B	0,271	0,264	0,285	0,252
C	0,217	0,238	0,177	0,252
D	0,270	0,263	0,284	0,234

Tabla 6. Valores normalizados del desempeño de las tecnologías.

Finalmente, se obtiene la puntuación de cada alternativa multiplicando los pesos de las alternativas por los pesos de cada uno de los criterios. Los resultados se muestran en la tabla 7, de la cual se observa que la alternativa B, carbón pulverizado y ciclo de vapor en condiciones sub-críticas, es la mejor de las propuestas, seguida muy de cerca por la gasificación integrada en ciclo combinado.

Alternativa	Puntuación
A	0,246
B	0,270
C	0,216
D	0,268

Tabla 7. Puntuación final de alternativas (AHP).

Aplicación de AHP Difuso a un Caso de Estudio

La aplicación de la metodología difusa en este caso implica la obtención de la matriz de comparaciones pareadas utilizando la escala de variables lingüísticas presentada en la tabla 2, y posteriormente la obtención de los pesos difusos de cada uno de los criterios. La matriz de comparaciones pareadas se muestra en la tabla 8, y los pesos difusos obtenidos en la tabla 9.

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

Tabla 8. Comparación pareada de los criterios (FAHP).

Criterios	Peso
Impacto Ambiental	0,450
Heat Rate	0,217
Consumo de Carbón	0,202
Costos Totales	0,131

Tabla 9. Pesos difusos de los criterios.

Por último, se obtiene la puntuación de cada alternativa multiplicando los pesos de las alternativas por los pesos de cada uno de los criterios, utilizando la información presentada en las tablas 6 y 9. Los resultados se muestran en la tabla 10, de la cual se observa que la alternativa B, carbón pulverizado y ciclo de vapor en condiciones super-críticas, es la mejor de las propuestas. La alternativa D, gasificación integrada en ciclo combinado, resultó la segunda con mejor puntuación.

Alternativa	Puntuación
A	0,245
B	0,270
C	0,218
D	0,267

Tabla 10. Puntuación final de alternativas (FAHP).

Comparación de resultados

En la tabla 11 se presentan los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios considerados. Se puede observar que existe una diferencia significativa en los valores de los pesos de los criterios obtenidos al aplicar la técnica AHP, con respecto a los obtenidos al aplicar la técnica AHP Difuso.

Criterios	Peso (AHP)	Peso (AHP Difuso)
Impacto Ambiental	0,487	0,450
Heat Rate	0,162	0,217
Consumo de Carbón	0,223	0,202
Costos Totales	0,127	0,131

Tabla 11. Comparación pesos de los criterios.

En la tabla 12 se presentan las puntuaciones finales de cada una de las alternativas luego de aplicar la metodología propuesta. Se puede observar que hay cambios en los valores de éstas puntuaciones finales, sin embargo, no se presentan cambios en la jerarquización de las alternativas que se deriva de las mencionadas puntuaciones finales. Estos resultados se pueden explicar al notar que el desempeño de cada una de las alternativas para cada uno de los criterios se mantiene constante independientemente de la técnica aplicada, debido a

que el enfoque difuso se aplica en este caso solo para la obtención de los pesos de importancia relativa de los criterios considerados.

Alternativa	Puntuación AHP	Puntuación AHP Difuso
A	0,246	0,245
B	0,270	0,270
C	0,216	0,218
D	0,268	0,267

Tabla 12. Comparación de la puntuación final de las alternativas.

IV. CONCLUSIONES

El Proceso Analítico de Jerarquización es una técnica de toma de decisiones multicriterio que resulta útil y sencilla de usar para la selección de la mejor tecnología en la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral como energía primaria.

La aplicación del enfoque difuso en la determinación de los pesos de importancia relativa de los criterios, permite disminuir la subjetividad presente en el procedimiento de las comparaciones pareadas de los criterios propuesto originalmente en la técnica del Proceso Analítico de Jerarquización.

La aplicación de los conjuntos difusos para la determinación de los pesos de importancia relativa de los criterios, requiere de un mayor esfuerzo computacional, que sin embargo puede ser fácilmente superable con las herramientas computacionales existentes hoy en día.

En la determinación de los pesos de importancia relativa de los criterios, para el caso de estudio, se observan valores diferentes al comparar el procedimiento tradicional de la técnica AHP, y el procedimiento propuesto en la técnica del AHP Difuso.

La puntuación final de las alternativas mostró diferencias en una técnica con respecto a la otra. Sin embargo, la jerarquización de las alternativas del caso de estudio al aplicar la técnica AHP, fue igual a la jerarquización de las alternativas al aplicar la técnica AHP Difuso.

Para cada una de las técnicas aplicadas al caso de estudio, se obtuvo como resultado que la mejor alternativa correspondió a la tecnología Carbón pulverizado con ciclo de vapor en condiciones super-críticas, seguida por la tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado. Estas dos alternativas resultaron ser las de mejor desempeño desde el punto de vista ambiental.

REFERENCIAS

- [1]. Spiegel E., McArthur N., “La nueva era del cambio energético. Opciones para impulsar el futuro del planeta”. Editorial McGraw Hill, 2010.
- [2]. Burnard K., Bhattacharya S., “Power Generation from Coal. Ongoing Developments and Outlook”. International Energy Agency, Information Paper. Octubre 2011.
- [3]. Yajure C., Guzmán Y., “Enfoque multicriterio para la selección preliminar de la mejor tecnología para la producción de electricidad a partir del carbón mineral”. Revista Tecnológica ESPOL – RTE, Vol. 27, N. 2, 79-92, (Diciembre 2014).
- [4]. Department for communities and local government. Multi-criteria analysis: a manual. Communities and Local Government Publications (2009) [Online]. Disponible: www.communities.gov.uk.
- [5]. Harris, R. “Introduction to Decision Making”. Virtual Salt. [Online]. Junio 2012. Disponible: <http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>.
- [6]. Saaty T.L., “Decision making with the analytic hierarchy process”, *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2008.
- [7]. Triantaphyllou E., Mann S., “Using the analytical hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges”, *Inter'l Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, Vol.2, No. 1, pp.35-44, 1995.
- [8]. Javanbarg, M. y otros, “Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization”, *Expert Systems with Applications*, 39 (2012), 960–966.
- [9]. Kabir, G., Hasin, A., “Comparative Analysis of AHP and Fuzzy AHP Models for Multicriteria Inventory Classification”, *International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS)*, Vol.1, No.1, October 2011.
- [10]. Rostamy, A. y otros, “Using fuzzy analytical hierarchy process to evaluate main dimensions of business process reengineering”, *Journal of Applied Operational Research*, 4(2), 69–77, 2012.
- [11]. Massachusetts Institute of Technology. The Future of Coal. Options for a constrained – coal world. An Interdisciplinary MIT Study, 2007. Disponible: http://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf.