

UNIVERSIDAD METROPOLITANA
IX CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y CREACIÓN INTELECTUAL

Un modelo para la evaluación multicriterio de proyectos en el sector energético

Violeta Parodi

Facultad de Ingeniería, Universidad Metropolitana
Caracas, Venezuela

+58424-2799942/ vcamargo@unimet.edu.ve

Resumen. Un modelo jerárquico de tres niveles de criterios y seis dimensiones: técnica, económica, ambiental, social, estratégica y de riesgo fue diseñado para su uso en evaluación multicriterio de proyectos en el sector energético. Una investigación sobre el sector, permitió la caracterización de diecinueve tipos de recursos energéticos identificados y obtener una visión del manejo de la energía en el mundo. La información recabada fue clasificada, resumida, tratada estadísticamente y analizada hasta lograr reducir un grupo de 76 aspectos identificados inicialmente como factores que podrían afectar la priorización de proyectos en el sector, a un modelo jerárquico de 24 criterios de evaluación y sus respectivos indicadores cualitativos o cuantitativos asociados. Todo el proceso fue varias veces validado con las opiniones de académicos y profesionales de los sectores público y/o privado de Venezuela y de otros países, En el modelo jerárquico obtenido correspondió la mayor importancia a la dimensión riesgo (24,3%); lo siguen las dimensiones ambiental (20,5%) y económica (15,3). Por su parte, las dimensiones técnica (13,7%), estratégica (13,5%) y social (12,2%) obtuvieron importancias relativas inferiores.

El modelo diseñado se aplicó con éxito a la evaluación de nueve opciones de insumo energético primario a la generación eléctrica en el país: derivados de petróleo, gas, carbón, biomasa, energía nuclear, y potencial hidráulico, eólico, solar y geotérmico. Los resultados obtenidos muestran como mejor opción a la eólica seguida de la generación hidráulica y la generación basada en gas. La generación nuclear resultó por mucho, la peor opción.

Palabras clave. evaluación multicriterio, AHP, proyectos, energía.

UNIVERSIDAD METROPOLITANA
IX CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y CREACIÓN INTELECTUAL

Un modelo para la evaluación multicriterio de proyectos en el sector energético

Violeta Parodi

Facultad de Ingeniería, Universidad Metropolitana
Caracas, Venezuela

+58424-2799942/ vcamargo@unimet.edu.ve

Resumen. Un modelo jerárquico de tres niveles de criterios y seis dimensiones: técnica, económica, ambiental, social, estratégica y de riesgo fue diseñado para su uso en evaluación multicriterio de proyectos en el sector energético. Una investigación sobre el sector, permitió la caracterización de diecinueve tipos de recursos energéticos identificados y obtener una visión de conjunto del manejo de la energía en el mundo. La información recabada fue clasificada, resumida, tratada estadísticamente y analizada hasta lograr reducir un grupo de 76 aspectos identificados inicialmente como factores que podrían afectar la priorización de proyectos en el sector, a un modelo jerárquico de 24 criterios de evaluación y sus respectivos indicadores cualitativos o cuantitativos asociados. Todo el proceso fue varias veces validado con las opiniones de académicos y profesionales de los sectores público y/o privado de Venezuela y de otros países, En el modelo jerárquico obtenido correspondió la mayor importancia a la dimensión riesgo (24,3%); lo siguen las dimensiones ambiental (20,5%) y económica (15,3). Por su parte, las dimensiones técnica (13,7%), estratégica (13,5%) y social (12,2%) obtuvieron importancias relativas inferiores.

El modelo diseñado se aplicó con éxito a la evaluación de nueve opciones de insumo energético primario a la generación eléctrica en el país: derivados de petróleo, gas, carbón, biomasa, energía nuclear, y potencial hidráulico, eólico, solar y geotérmico. Los resultados obtenidos muestran como mejor opción a la eólica seguida de la generación hidráulica y la generación basada en gas. La generación nuclear resultó por mucho, la peor opción.

Palabras clave. evaluación multicriterio, AHP, proyectos, energía.

Introducción.

El desarrollo económico de los países y el mejoramiento de la calidad de vida de sus poblaciones han sido sustentados por un elevado y creciente consumo de energía. La alta participación de energías fósiles en la demanda mundial de energía primaria y el crecimiento sostenido de emisiones de CO₂ y otros gases invernadero que su uso causa; la desigualdad en la tenencia de las reservas energéticas convencionales y la falta de seguridad energética que experimentan los países consumidores sin los recursos energéticos necesarios para autoabastecerse; la disminución en la tasa de producción de algunos yacimientos ocasionada por el agotamiento paulatino de las reservas que almacena; y la desigualdad en el acceso a los productos energéticos básicos como la electricidad y los combustibles; han incentivado la búsqueda continua de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de fuentes alternativas de energía, “más limpias” y más flexibles; y con costos y rendimientos que las hagan competitivas frente a las fuentes de energía convencional.

En cada caso, deben ser escogidas las mejores soluciones, entendidas éstas como las alternativas técnica, ambiental y económicamente viables que proporcionen el mayor beneficio a la comunidad. De esta forma, cualquier iniciativa que facilite la evaluación formal y sistemática de los proyectos derivados representa un apoyo a una correcta toma de decisiones y a la conformación de los planes que de acuerdo a los presupuestos y disponibilidades energéticas de cada país proporcionen el mayor bienestar a sus ciudadanos.

Este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos en el diseño de un modelo para la evaluación multicriterio de proyectos en el sector energético [Parodi, 2013]. Después de una breve referencia teórica a los métodos utilizados como plataforma para el desarrollo del trabajo, se presenta un resumen del trabajo realizado y los resultados obtenidos en cada una de tres fases: (i) la caracterización del sector energético y del tipo de recursos allí identificados, (ii) la estructuración de una jerarquía de criterios para la evaluación y la definición de sus indicadores asociados y (iii) la verificación de la aplicabilidad del modelo.

Marco teórico.

La descripción de un número importante de métodos de apoyo a la decisión multicriterio se encuentra disponible en la literatura especializada. Su característica común es que buscan la valoración y el ordenamiento de *múltiples alternativas de acción*, en base a sus respectivos

rendimientos frente a *múltiples objetivos a cumplir*, conflictivos entre sí; y que en general, se expresan en unidades no comparables.

Entre ellos, el Proceso de Jerarquías Analíticas (AHP, por sus siglas en inglés) [Saaty, 2006] propone la estructuración en un árbol jerárquico donde el nivel superior es ocupado por el objetivo fundamental a cumplir y el segundo nivel corresponde a los aspectos más importantes relevantes a la decisión; subdividido cada uno de ellos en los objetivos y subobjetivos que se juzgue conveniente incluir para definir completamente el problema. A cada objetivo se asigna un criterio de evaluación y un indicador para instrumentalizar su aplicación. El método permite la incorporación al análisis de los juicios de valor de múltiples actores, sobre la importancia relativa de cada criterio en el árbol y sobre el grado de cumplimiento de cada criterio por cada alternativa de solución planteada. Para cada alternativa estudiada se estima un único indicador obtenido como el promedio ponderado de sus rendimientos de acuerdo a cada criterio.

El método de Jerarquías Analíticas es simple de entender, flexible, intuitivo en su aplicación y es capaz de manejar criterios cuantitativos y cualitativos en el mismo marco de trabajo [Loken, 2005]. Desde finales del siglo pasado, los métodos de análisis multicriterio de apoyo a la decisión han tomado relevancia; y particularmente, las aplicaciones del AHP en problemas de planificación energética han ocupado un número significativamente mayor de publicaciones en revistas especializadas que otros métodos multicriterio de apoyo a la decisión [Parodi, 2013].

Caracterización del sector energético.

Por su relación directa con el objetivo del trabajo a realizar se efectuó una investigación sobre las características, el uso y la importancia de cada uno de diecinueve tipos de recursos energéticos identificados en el mundo. Las fuentes bibliográficas consultadas fueron fundamentalmente textos en el área, artículos publicados en revistas especializadas y recopilados por la base de datos Science Direct e informes preparados para o por organismos gubernamentales, organizaciones o agencias internacionales y grandes empresas, generalmente disponibles a través de Internet. La investigación se dividió en dos partes una, correspondiente a las fuentes de energía no renovable; y la otra, a las fuentes de energía renovable, a saber:

- *Fuentes de energía no renovable:* petróleo convencional, arenas asfálticas, petróleo extrapesado y esquistos bituminosos; gas natural convencional, gas natural en arenas

compactas, metano en lechos de carbón, gas de esquistos e hidratos de metano; carbón y uranio.

- *Fuentes de energía renovable*: potencial hidráulico, vientos y radiación solar; mareas, olas y gradiente térmico oceánico; recursos geotérmicos y biomasa.

Para cada tipo de recurso energético estudiado se obtuvo información sobre sus atributos más importantes, la ubicación y magnitud de sus reservas o de su potencial energético desarrollable, la madurez, flexibilidad, costos y rendimientos de las tecnologías para su extracción o captación, y para su transformación en potencia eléctrica, calor o combustibles; los medios y técnicas para su transporte y para la distribución de sus productos derivados; los niveles de contaminación que su explotación y uso causan en el medio ambiente, y las modernas tecnologías para la reducción de tales efectos. También se recuperó información sobre los riesgos de su explotación para el ambiente y sus poblaciones; sobre la disposición de residuos peligrosos subproducto en su cadena de obtención y transformación; y en casos de interés, sobre la normativa internacional existente que regula y controla las operaciones.

La investigación realizada sobre el sector energético permitió conformar una base de información estructurada de forma que se resaltasen aspectos diferenciadores entre los recursos energéticos estudiados frente a los problemas que caracterizan el sector. La base fue de mucho valor en la escogencia de los criterios adecuados para la evaluación de alternativas de inversión en el sector energético.

Estructuración de una jerarquía de criterios para la evaluación.

El análisis de la información referida en la sección anterior permitió seleccionar un grupo preliminar de 76 aspectos diferenciadores entre uno u otro recurso energético, cuando se evalúa su aprovechamiento frente a los objetivos de minimizar los problemas del sector o maximizar los beneficios derivados de él. Una primera ronda de consultas a expertos en el sector académico, la posterior reflexión y el análisis estadístico de las opiniones recabadas permitió reducir progresivamente el grupo inicial a 59, 44 y 24 aspectos que podían influenciar la priorización de proyectos en el área agrupados de acuerdo a su naturaleza, en seis dimensiones: técnica, económica, ambiental, social, estratégica y de riesgo. A cada aspecto se asignó un objetivo y un criterio que guiase la evaluación del grado de cumplimiento del objetivo, por parte del potencial proyecto bajo estudio.

Los criterios seleccionados fueron agrupados en una estructura jerárquica de tres niveles, se diseñó un sistema de indicadores acorde con la misma y todo el conjunto fue validado de nuevo por académicos y profesionales del sector público y/o privado del país en Venezuela, Estados Unidos, Panamá, Bélgica y España, en una segunda ronda de 66 entrevistas donde se recogió además información sobre la importancia de cada criterio en comparaciones por pares entre criterios del mismo nivel. Toda la información fue procesada con ayuda de la herramienta computacional Expert Choice que además permitió verificar la consistencia de la data aportada por cada participante. El gráfico que sigue muestra la jerarquía de criterios obtenida.

OBJETIVO: EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE UN PROYECTO. SECTOR: ENERGÍA		
CRIT. NIVEL 1	CRITERIOS NIVEL 2	CRITERIOS NIVEL 3
C1 Técnicos	C1.1 Madurez de la tecnología	
	C1.2 Flexibilidad de la tecnología	
	C1.3 Eficiencia energética	
	C1.4 Disponibilidad	
	C1.5 Infraestructura de apoyo	<ul style="list-style-type: none"> C1.5.1 Infraestructura física y logística C1.5.2 "Saber-como" local
C2 Económicos	C2.1 Costo nivelado	
	C2.2 Δ Balanza de pagos	
C3 Ambientales	C3.1 Emisiones gases invernadero	
	C3.2 Emisiones gases no radioactivos	<ul style="list-style-type: none"> C3.2.1 Precursores de ozono C3.2.2 Emisiones ácidas C3.2.2 Partículas
	C3.3 Residuos peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> C3.3.1 Residuos sólidos/líquidos C3.3.2 Residuos radioactivos
	C3.4 Uso de la tierra	
C4 Sociales	C4.1 Aceptación de la comunidad	
	C4.2 Calidad de vida	<ul style="list-style-type: none"> C4.2.1 Creación de empleo local C4.2.2 Δ Salarios C4.2.3 Δ Déficit de energía
	C5.1 Δ Seguridad energética	<ul style="list-style-type: none"> C5.1.1 Δ Diversidad cesta energías C5.2.1 Seguridad de suministro
C5 Estratégicos	C5.2 Compatibilidad c planes-nación	
	C6.1 Riesgo ante eventos extremos	
C6 Riesgo	C6.2 Uso ilícito de material radioactivo	

Figura 1. Jerarquía de criterios para la evaluación de proyectos. Sector energía

En el sistema de indicadores validado, diez son de naturaleza cuantitativa y el resto es de naturaleza cualitativa. Para cada indicador se diseñó una ficha resumen contentiva de su definición, sus unidades originales de medida, las posibles fuentes de información para su estimación y una escala [1-5] para su medición. Tal como se muestra a continuación, en el modelo jerárquico diseñado, la mayor importancia correspondió a la dimensión riesgo (24,3%); lo siguen las dimensiones ambiental (20,5%) y económica (15,3). Por su parte, las dimensiones técnica (13,7%), estratégica (13,5%) y social (12,2%) obtuvieron importancias relativas menores.

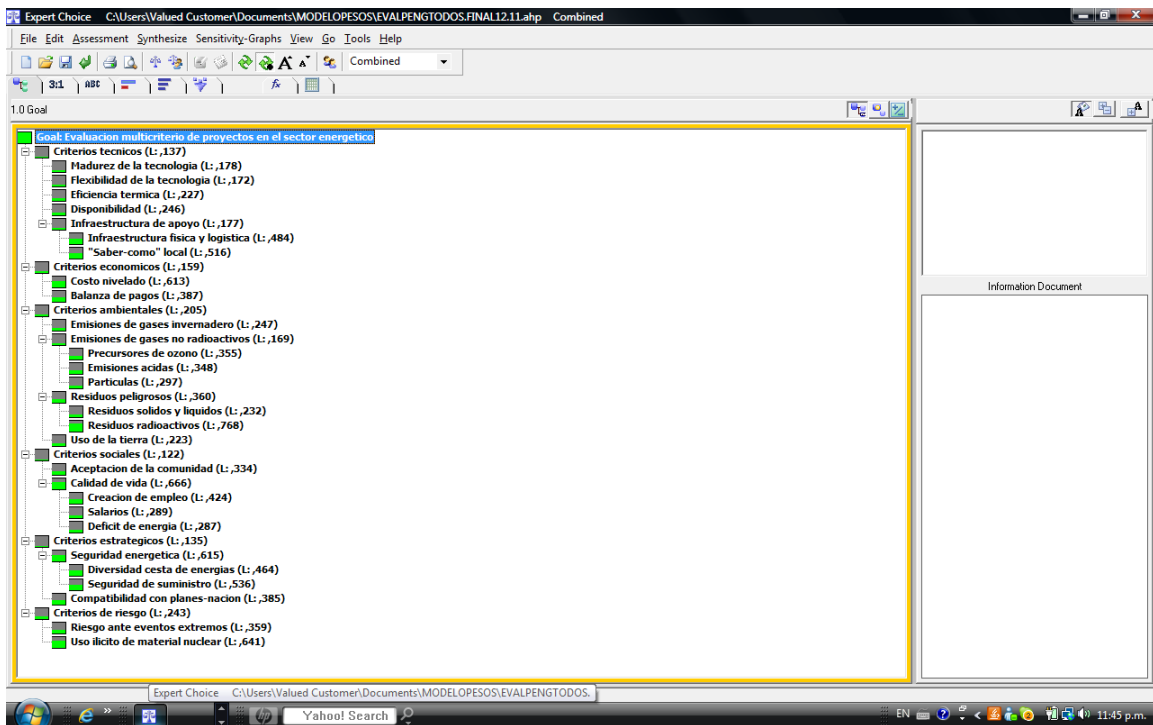
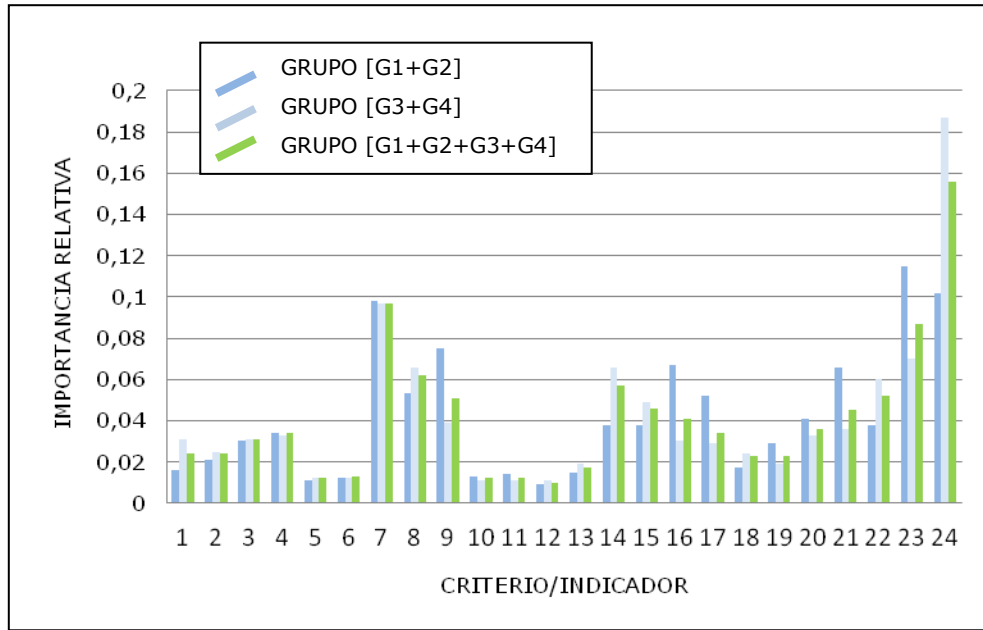


Figura 2. Modelo de valor para la evaluación de proyectos en el sector energético.

Para el procesamiento de la información obtenida, se dividió la muestra en grupos de acuerdo a su experiencia: un grupo de 20 académicos y/o profesionales cuidadosamente seleccionados con una experiencia extensa en energía, ambiente, planificación, economía y/o ingeniería de proyectos (G1), un grupo de 8 ingenieros jóvenes postgraduados del sector privado que aportó una visión actual del problema (G2) y dos grupos de estudiantes en cursos de energía y proyectos respectivamente ubicados en los últimos años de la carrera de Ingeniería (G3 y G4). Tal como se muestra en el gráfico que sigue, sólo en los criterios de riesgo (23 y 24) la diferencia entre los pesos globales respectivamente estimados en base a la consolidación de las opiniones de los grupos [G1+G2] y [G3+G4] es notable ($\Delta PG > 4\%$ de su contribución en el total).



$\Delta PG \leq 1\%$	$1\% < \Delta PG \leq 2\%$	$2\% < \Delta PG \leq 3\%$	$3\% < \Delta PG < 4\%$	$\Delta PG \geq 4\%$
13 indicadores	4 indicadores	3 indicadores	2 indicadores	2 indicadores

Figura 3. Pesos globales de los indicadores propuestos para la evaluación y su dispersión

Si el mismo ejercicio se realiza a nivel de dimensión como se refleja en la figura 4, la dispersión entre grupos resulta aún más pequeña. Por ello, se propuso como modelo para la evaluación el recabado reflejado en la figura 2, resultante del procesamiento de *todas* (G1+G2+G3+G4) las opiniones recabadas.

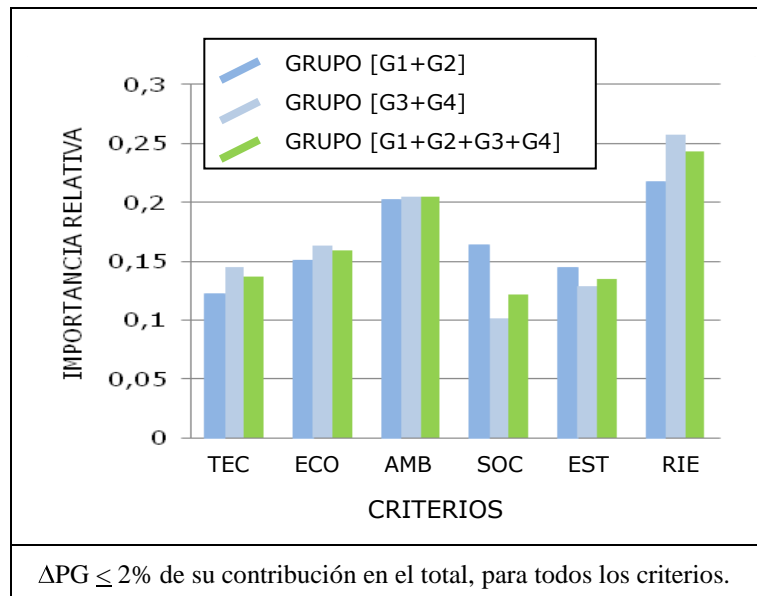


Figura 4. Dispersión de los pesos globales de los criterios de evaluación, nivel 1

El modelo propuesto fue derivado en base a las opiniones que sobre la materia expresaron una selección de expertos condicionados por las circunstancias existentes en Venezuela y el mundo, en un momento determinado del tiempo. De esta forma, su potencial aplicación en la evaluación multicriterio de proyectos en el sector energético debe considerar el ajuste del modelo de acuerdo a las condiciones específicas del problema a resolver. En cualquier caso, el modelo propuesto pretende servir sólo como una referencia en el proceso de evaluación.

Aplicabilidad del modelo

El modelo de valor propuesto fue aplicado con éxito a la evaluación de nueve opciones correspondientes respectivamente a la utilización de derivados de petróleo, gas, carbón, biomasa, energía nuclear, y potencial hidráulico, eólico, solar y geotérmico como insumo energético primario a la generación eléctrica en el país. La información de fuentes oficiales requerida para la estimación de los indicadores de índole cuantitativa para cada alternativa, resultó escasa y no consistente; de esta forma, gran parte de la data utilizada fue obtenida de publicaciones internacionales y de expertos en el sector privado del país. Una tercera ronda de entrevistas a 13 expertos en el tema proporcionó la información necesaria para la estimación de los indicadores de índole cuantitativa. La tabla 1 que sigue muestra los resultados obtenidos.

Tabla 1. Ordenamiento final de las alternativas de generación

ENERGÍA PRIMARIA/ TECNOLOGÍA	COEFICIENTE DE ROBUSTEZ Escala [1-5]	COEFICIENTE DE ROBUSTEZ NORMALIZADO
Eólica	4,16	0,124
Hidráulica	4,01	0,120
Gas (Ciclo Combinado)	4,00	0,119
Biomasa	4,00	0,119
Solar térmica	3,80	0,113
Geotérmica	3,73	0,111
Petróleo (Ciclo Combinado)	3,72	0,111
Carbón (IGCC)	3,49	0,104
Nuclear	2,62	0,078

La información fue consolidada en un coeficiente robustez para cada alternativa que permitió identificar a la opción eólica como la mejor opción, seguida de la generación hidráulica y generación basada en gas. La generación nuclear resultó por mucho, la peor opción.

Resultados y su discusión

El modelo jerárquico de criterios para la evaluación que se propone permite evaluar alternativas de inversión en el sector energético y ordenarlas de acuerdo a su menor o mayor conveniencia. El modelo es producto de las opiniones que sobre cada materia expresaron una selección de expertos; sin duda, influenciados por las circunstancias presentes que vive Venezuela y el mundo.. En consecuencia, la potencial aplicación de dicho modelo debe considerar un ajuste previo del mismo de acuerdo a las condiciones específicas del problema del país sede del proyecto, en el momento del tiempo que se realiza su evaluación.

La evaluación de nueve recursos energéticos como potenciales insumos básicos a la producción de energía eléctrica mostró la aplicabilidad del modelo. Las opciones *eólica e hidráulica* encabezaron los ordenamientos a nivel individual y grupal. Su naturaleza renovable y su bajo impacto ambiental frente a opciones como la combustión de carbón o de derivados líquidos del petróleo, ambos altamente contaminantes, influyeron sin duda en la selección. La existencia de un alto potencial hidráulico en el sur del país y de potencial eólico desarrollable al norte del mismo; la experiencia acumulada en la construcción y operación de plantas hidroeléctricas, y la disponibilidad de al menos parte de la red de distribución requerida para la transmisión de la electricidad a generar; la percepción de la poca complejidad de equipos, operación y logística de la opción eólica y su bajo costo frente a otras opciones de energía renovable incidieron en la buena calificación obtenida.

Por el contrario, la alternativa de *generación nuclear* obtuvo un coeficiente de robustez muy inferior al resto de las opciones. De esta forma, sobre el gran atractivo que significa la enorme cantidad de calor que puede obtenerse de la fisión de una pequeña porción de material nuclear, prevaleció la percepción de las terribles consecuencias que puede generar un accidente nuclear como el ocurrido hace poco más de un año en Fukushima, Japón.

Como ya se ha señalado, el modelo jerárquico propuesto permite evaluar y priorizar proyectos que intentan dar solución a un problema. La elaboración de los mejores planes energéticos para una nación, requerirá la incorporación al análisis de las limitantes surgidas de las condiciones tecnológicas, económicas, políticas y sociales del país donde se insertan, y de los compromisos y convenios que la nación haya firmado en la materia. Todo ello, cae fuera del alcance de este documento.

Conclusiones

- El sector energético se caracteriza por la existencia de múltiples fuentes de energías y de múltiples tecnologías para su explotación, la alta participación de energías fósiles en un elevado consumo mundial de energía y la contaminación ambiental que su uso causa; la desigualdad en la tenencia de las reservas energéticas convencionales y en el acceso a los productos energéticos básicos como la electricidad y los combustibles; el agotamiento a mediano plazo de tales reservas y la participación de grandes intereses económicos en el negocio, entre otras particularidades. Todo ello ha incentivado la continua investigación y aparición de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables y la creciente participación de estas energías ‘limpias’ en el suministro de energía mundial.
- La elaboración de los mejores planes en el sector energético frente a los problemas identificados anteriormente, se facilita si se apoya en la evaluación multicriterio de los proyectos identificados en cada caso. El modelo jerárquico de criterios propuesto en este trabajo mostró ser una herramienta útil para realizar tal evaluación. La aplicación del modelo propuesto a la evaluación de nueve recursos energéticos como potenciales insumos básicos a la producción de energía eléctrica en Venezuela, permitió ordenarlas en la forma siguiente:
Eólica > Hidráulica > Gas = Biomasa > Solar > Geotérmica > Petróleo > Carbón >> Nuclear
- En cualquier caso, debe considerarse la posibilidad de ajustar la jerarquía de criterios y sus importancias relativas a las condiciones específicas del problema y de su entorno, en el momento del tiempo en que se efectúa su evaluación.

Referencias

- Loken E. (2007), “Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1584-1595.
- Parodi de Camargo V., (2013), *Propuesta para la evaluación integral de proyectos en el sector energético*, presentado como tesis de doctorado en Proyectos de Ingeniería, ante la Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Saaty T.L. (2006a), *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*, Vol.VI of the AHP Series, ISBN 0-9620317, RWS Publications, Pittsburgh, Pa., USA.

