

COMPARISON OF AHP/ANP DECISION MAKING METHODOLOGIES IN A CASE STUDY OF RENEWABLE ENERGY IN THE DOMINICAN REPUBLIC

Guerrero-Liquet, Guido C.; Sánchez-Lozano, Juan M.; García-Cascales, M. Socorro; Ortuño, Andrés

Universidad Politécnica de Cartagena

In the energy sector, the Dominican Republic offers an opportunity for domestic and foreign investment for urbanized areas with the introduction of a legal framework where renewable energy producers receive legal benefits and tax exemptions. This leads us to believe that emerging countries should start to implement the methods used worldwide to make clear decisions.

A study was performed in which we applied and compared the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Analytic Process Network (ANP) methodologies for the best places to install solar panels on a government building in the Dominican Republic. Experts belonging to the sector were surveyed to verify the advantages and disadvantages offered by these decision-making methods, so that concrete priorities in developing viable projects are achieved. Comparing these methods provides graphical tools to measure the consistency of certain opinions, and modeling the case study it is found that there are several different indicators that assess the complexity of the methodology to obtain robust results.

Keywords: *Analytic Hierarchy Process (AHP); Analytic Network Process (ANP); Dominican Republic (DR); Renewable Energy (RES)*

COMPARATIVAS DE METODOLOGÍAS DE TOMA DE DECISIÓN AHP/ANP EN CASO DE ESTUDIO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA REPÚBLICA DOMINICANA

En el sector energético, la República Dominicana ofrece una oportunidad de inversión nacional y extranjera para entornos urbanizados con la introducción de un marco legal donde los productores de energías renovables aprovechan beneficios jurídicos y exenciones de impuestos. Esta situación nos motiva a creer que los países emergentes deben empezar a aplicar los métodos utilizados mundialmente para obtener decisiones claras.

Se ha realizado un estudio donde aplicamos y comparamos las metodologías Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Proceso Analítico en Red (ANP) para obtener la mejor zona para instalar paneles solares en un edificio gubernamental en República Dominicana, encuestando expertos que pertenecen al sector para verificar las ventajas y desventajas que ofrecen estos métodos de toma de decisión de manera que se obtengan prioridades concretas a la hora de desarrollar proyectos viables. Comparando estos métodos se aportan herramientas gráficas para medir la consistencia de las opiniones determinadas y modelando el caso de estudio comprobamos que existen diferentes indicadores que evalúan la complejidad del proceso metodológico para obtener resultados robustos.

Palabras clave: *Proceso Analítico Jerárquico (AHP); Proceso Analítico en Red (ANP); República Dominicana (RD); Energías Renovables (EERR)*

Correspondencia: M^a del Socorro García-Cascales. Dpto Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos, Universidad Politécnica de Cartagena. C/Dr Fleming s/n 30201 Cartagena (Murcia). Teléfono +34 968 326574, FAX +34 924 32 65 00, E-mail: socorro.García@upct.es

1. Introducción

La República Dominicana ofrece una oportunidad de inversión nacional y extranjera al establecer un marco legal ventajoso para el sector energético, en este trabajo presentamos una propuesta de cara a que países emergentes que empiezan a fomentar las energías renovables como una solución viable al sistema energético, puedan recurrir a metodologías ampliamente conocidas en los procesos de toma de decisiones.

En el presente estudio se ha trabajado con dos metodologías de toma de decisión ampliamente conocidas y respaldadas por la comunidad científica. Para hacer la comparación entre criterios y alternativas hemos modelado el caso de estudio a través del Proceso Analítico Jerárquico (denominado AHP), comprobando que tiene características complejas y resultados no convincentes, razones por las que también se modela mediante el Proceso Analítico en Red (conocido como ANP) a través del software SuperDecisions, delineando y exponiendo su versátil funcionamiento en un proyecto de decisión de multicriterio.

2. Objetivos

El objetivo ha sido aplicar una metodología de toma de decisiones para la resolución de problemas en los que, una serie de criterios y sub-criterios internos influyen en la decisión, en este artículo se presenta el caso de estudio para la selección de la mejor zona para instalar paneles solares en un edificio gubernamental, en la República Dominicana.

Se ha recurrido a expertos en el sector de las energías renovables con el objetivo de efectuar la extracción del conocimiento mediante un sistema de encuestas y resolver el problema energético propuesto, obteniendo resultados concretos que facilitarán el desarrollo y la viabilidad de este tipo de proyectos energéticos.

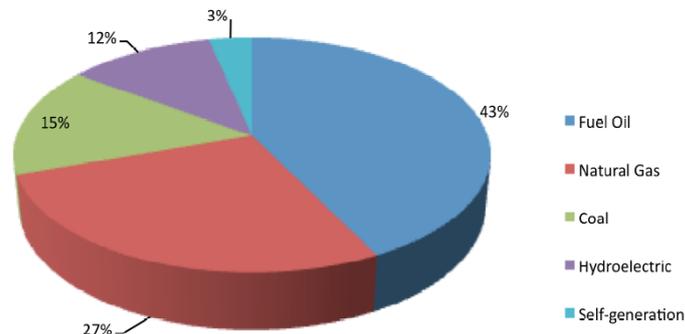
El objetivo específico es comprobar con aportes numéricos cual de los dos métodos apoya más la solución de problemáticas de energías renovables en República Dominicana, al mismo tiempo verificar que los resultados sean satisfactorios en la evaluación de criterios económicos.

La estructura del trabajo es la siguiente; en el epígrafe 2 se muestra la situación actual de las energías renovables en la República Dominicana, en el siguiente epígrafe se definen de forma breve los métodos de decisión multicriterio a aplicar (AHP y ANP). En el epígrafe 4 se presenta el caso de estudio así como las encuestas planteadas a los expertos, seguidamente en el epígrafe 5 se aplican las metodologías indicadas al caso propuesto proporcionando, los resultados de las mismas así como la comparativa entre metodologías. Finalmente en el epígrafe 6 se presentan las conclusiones del estudio realizado.

3. Energías Renovables en la República Dominicana

El 85% de la producción eléctrica de la República Dominicana depende de combustibles fósiles importados. Esta dependencia ocasiona un alto costo a la economía del país, haciéndolo muy vulnerable a las fluctuaciones del precio global del petróleo, creando una balanza comercial desfavorable y ocasionando importantes problemas medioambientales.

Figura 2: Generación anual de electricidad por tipo de combustible, 2010 Fuente: (Ochs et al, 2011)



Las pérdidas y limitaciones de la distribución generan la necesidad de mejorar y expandir la red nacional incluso a través de la integración de recursos de energía renovable nacional.

Teniendo en cuenta que la República Dominicana no dispone de reservas petrolíferas, esta dependencia externa tiende a aumentar el gasto en combustibles y, no crea un desarrollo tecnológico diferenciador como el que podría obtener basando su producción eléctrica a partir de tecnologías renovables.

3.2. Normativas

La República Dominicana es signataria y ha ratificado diferentes convenciones y tratados internacionales, como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto, (Ley 57-07, Comisión Nacional de Energía, 2012) donde el país se comprometió a realizar acciones que fomentaran la producción de energía eléctrica a partir de tecnologías renovables, con el objetivo de reducir las emisiones de gases efectos de invernadero, que contribuyen al calentamiento global del planeta.

El avance de la energía limpia se ha convertido en una prioridad nacional que incluso está incluida en la Constitución, la ley 57-07 estableció un objetivo del 25% de la energía renovable en el consumo final del país para 2025, y creó mecanismos de apoyo para incentivar la implantación sistemas de renovables con créditos impositivos integrales, una tarifa de alimentación, y la creación de un fondo para recursos renovables.

Esta ley 57-07 que permite impulsar el desarrollo de fuentes renovables de energía, sus regímenes especiales y su reglamento de aplicación, ha sido elaborada por la Comisión Nacional de Energía CNE, con la finalidad de crear instrumentos normativos que promuevan la entrada de fuentes de energías alternativas al sistema, con el entendido de que la dependencia de combustibles fósiles y la variabilidad en los precios de los mismos son factores que propician la inestabilidad de la matriz energética, el principal objetivo consiste en impulsar a la nación hacia una matriz energética más sostenible y limpia. (Ley 57-07, Comisión Nacional de Energía, 2012)

Esta ley establece un mecanismo de priorización en caso de motivos de demanda o riesgo del sistema en el caso de que se tuviera que limitar la producción. La priorización de la programación de renovables es la siguiente:

- a. Fotovoltaica
- b. Solar Termoeléctrica sin acumulación
- c. Eólica
- d. Hidráulica fluyente de régimen especial

- e. Hidráulica fluyente de régimen ordinario
- f. Solar termoeléctrica con acumulación
- g. Combustión de biomasa
- h. Hidráulica con embalse de régimen especial
- i. Hidráulica con embalse de régimen ordinario
- j. Térmicas

Mediante esta ley se han instalado grandes proyectos de energía renovables en la República Dominicana obteniendo los incentivos y beneficios que ella ofrece y, aprovechando el potencial de recursos energéticos renovables de sol, viento, biomasa y agua que dispone la isla.

Las tarifas eléctricas que tienen en cuenta los expertos en este análisis son las establecidas en el Capítulo 8, Artículo 109 de la Ley 57-07, régimen económico de la generación de electricidad en el régimen especial, estas tarifas que establecen una retribución anual de referencia durante un periodo de 10 años son las siguientes:

Tabla 1: Tarifa Anual Regulada, República Dominicana Fuente: (Ley 57-07, Comisión Nacional de Energía, 2012)

Tarifa Anual de Referencia	
Energía Eólica conectada a la Red	12.52 c\$/kWh
Biomasa Eléctrica conectada a la Red	11.60 c\$/kWh
Fotovoltaica Conectada a la Red superior de 25 KW	53.50 c\$/kWh
Fotovoltaica Conectada a la Red de potencia igual o menor a 25 KW	60.00 c\$/kWh
Mini hidráulica conectada a la red	7.35 c\$/kWh

Dado que el mercado no ha llegado a cubrir la demanda total y teniendo en cuenta que incentivos tales como créditos impositivos han bajado el precio de la generación mediante instalaciones de energías renovables, la población productiva está concienciándose en obtener y regular sus propios mecanismos de generación energética.

El país ofrece buenas oportunidades para inversores y promotores de instalaciones de energéticas renovables, debido a la disminución en los costos de estas tecnologías y a las señales de inversión favorables enviadas por incentivos gubernamentales existentes.

4. Métodos de Decisión Multicriterios

El análisis de toma de decisiones multicriterio es la metodología que permite ayudar a ejecutivos de empresas y sus organizaciones, los responsables políticos, directores de proyectos y, en general a todos los profesionales que ocupan posiciones donde se tengan que adoptar decisiones complejas durante el transcurso de sus actividades.

Un problema de decisión surge cuando se plantean distintas alternativas, al menos dos, que son objeto de un conflicto tal que es necesario elegir una de ellas, o bien establecer un orden de preferencia.

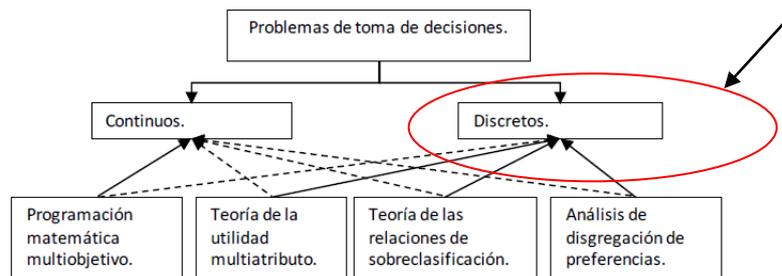
En la actualidad, existen cuatro corrientes metodológicas multicriterio que contribuyen con el análisis de toma de decisión, según (Pardalos et al, 1995) que son:

1. Programación matemática multiobjetivo
2. Teoría de la utilidad multiatributo

3. Teoría de las relaciones de sobre clasificación
4. Análisis de disgregación de preferencias

La forma en la que estas cuatro corrientes metodológicas multicriterio contribuyen con el análisis de los problemas de toma de decisiones (ya sean continuos o discretos), se puede apreciar en la figura 3 donde, las líneas continuas indican una contribución directa y, las líneas discontinuas señalan una contribución indirecta. (Doumpos, 2002).

Figura 3: Clasificación de la metodología de decisión Fuente: (Doumpos, 2002)



El presente estudio se centrará en la toma de decisiones en sentido discreto que se clasifican en las teorías de las relaciones de sobre clasificación o en el análisis de disgregación de preferencias.

A través de un proceso de evaluación por pares utilizando el método AHP se definirán las prioridades entre las alternativas y, el método ANP será la herramienta de evaluación en el ámbito de las energías renovables que permitirá analizar el caso de estudio, de esta manera será posible realizar posteriormente una comparativa de ambos métodos.

A continuación se procederá a explicar brevemente los métodos AHP y ANP desarrollados por el Profesor Thomas L. Saaty durante los últimos 30 años.

4.1. Método AHP

El método AHP propone una manera de ordenar el pensamiento analítico, de la cual se destacan tres principios básicos: el principio de la construcción de jerarquías, el principio de establecimiento de prioridades y el principio de la consistencia lógica.

Mediante esta metodología, el problema es modelado a través de una estructura jerárquica, utiliza escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, sintetiza los juicios emitidos y proporciona un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos. (Arancibia, Contreras, Mella, Torres, & Villalba, 2003).

Los Pasos de Ejecución del método AHP son:

- Modelación del problema de decisión como una jerarquía.
- Valoración y establecimiento de las prioridades entre criterios.
- Establecimiento de las propiedades locales y globales entre los subcriterios.
- Establecimiento de las propiedades locales entre las alternativas.
- Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa.
- Análisis de Sensibilidad

4.2. Método ANP

El método ANP es la forma general del AHP que se recomienda aplicar cuando el decisor se enfrenta a problemas en los que los elementos están relacionados entre sí es decir, son interdependientes.

Este método está dividido en dos partes. La primera es un control de jerarquía o de red de objetivos y criterios que controlan las interacciones del sistema objeto de estudio. La segunda corresponde a las diferentes sub-redes que pertenecen a cada criterio.

La mayor diferencia entre ambas metodologías es que ANP permite incluir relaciones de interdependencia y realimentación entre elementos del sistema, en él no es necesario establecer diferentes niveles ya que, permite obtener una representación del problema de decisión en un entorno complejo.

Mientras en AHP se aplica un procedimiento de agregación de pesos de tipo aditivo, como puede ser el método de la suma ponderada, a partir de la información recogida en la matriz de valoración o decisión, en ANP, en cambio, se aplican algoritmos de cálculo más complejos sobre la supermatriz para obtener las prioridades totales de todos los elementos de la red y en particular de las alternativas.

El método ANP según indicó Saaty en el 2001, consta de los siete pasos siguientes:

1. Modelar el problema de decisión como una red, lo cual implica identificar los elementos de la red (criterios y alternativas), agruparlos en componentes y determinar las relaciones de interdependencia entre ellos.
2. Realizar comparaciones pareadas entre elementos.
3. Construir la denominada supermatriz no ponderada con los vectores de pesos de importancia relativa de los elementos.
4. Realizar comparaciones pareadas entre componentes.
5. Ponderar los bloques de la supermatriz no ponderada, mediante los pesos correspondientes de los componentes, para transformarla en la supermatriz ponderada.
6. Si es necesario, normalizar la supermatriz ponderada, dividiendo cada valor por la suma de las columnas con el objetivo de obtener una matriz estocástica por columnas, es decir, cuyas columnas sumen la unidad (supermatriz ponderada estocástica).
7. Elevar la supermatriz ponderada a potencias sucesivas hasta que sus entradas converjan y permanezcan estables (supermatriz límite).

La realización de este análisis puede facilitarse y agilizarse si se emplea para ello un software de cálculo. El programa informático *Superdecisions*® (<http://www.superdecisions.com>), por el momento el único *software* que implementa la metodología ANP, permite realizar un análisis de sensibilidad al variar ligeramente algunas de las ponderaciones del modelo y observar los cambios producidos en la priorización final de las alternativas.

5. Definición, Planteamiento y Localización del Caso de Estudio.

En la República Dominicana, el Ministerio de Relaciones Exteriores (Mirex) está fomentando e impulsando un programa de ahorro energético desde el año 2011, llamado "Cancillería Verde", este programa de gestión ambiental procura crear conciencia y generar cambios en

las prácticas de uso de estos recursos renovables, a fin de minimizar el impacto ecológico de sus operaciones.

Como parte de este programa, el Ministerio de Relaciones Exteriores tiene previsto instalar un sistema de paneles solares fotovoltaicos, en alguna de las edificaciones situadas en el interior del Ministerio a fin de reducir el consumo de combustibles fósiles. De esta manera se pretende generar diariamente 1,400 kilovatios-hora de energía eléctrica que contribuirán a reducir de manera significativa la factura eléctrica de la institución y además, será un aporte al sistema energético del país, ya que el excedente de energía solar generada y no consumida en horarios y días no laborables, será cedido a la red pública nacional a través de contadores bidireccionales.

Para someter este proyecto a la consideración y autorización por parte de los reguladores eléctricos se requiere elegir la mejor zona en el interior del Ministerio donde se pueda instalar la central solar fotovoltaica, se propusieron 4 zonas viables que cuentan con las condiciones establecidas por la Ley 57-07, para no afectar el medio ambiente.

Figura 4: Ministerio de Relaciones Exteriores MIREX y Mapa de Emplazamiento



5.1 Realización de Encuesta para Aplicar y Comparar Metodología.

Para aplicar las metodologías descritas con anterioridad al problema de decisión planteado se han establecido tres fases que, permitirán obtener el resultado de la encuesta:

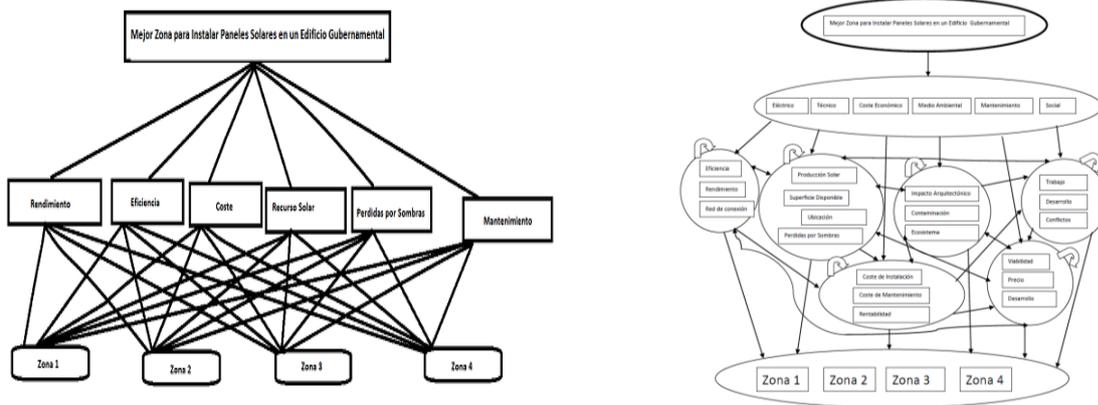
1. La Formulación del Problema:

En esta fase hemos sintetizado la definición y el planteamiento del problema para que los expertos puedan manejar la información cómodamente.

Las alternativas viables son:

- Zona 1: Aparcamiento Principal del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Zona 2: Cubierta del Edificio Principal del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Zona 3: Cubierta del Edificio del Salón de Conferencias del Ministerio.
- Zona 4: Aparcamiento Secundario del Ministerio, cercano al salón de conferencias.

Figura 5: Estructura modélica jerárquica de AHP y Estructura modélica en Red de ANP



Los criterios considerados para la mejor elección en el caso del método AHP son: rendimiento, eficiencia, coste, recurso solar, pérdidas por sombras y mantenimiento. Para el caso del método ANP, dichos criterios se definieron como sub-criterios y se evaluaron todos los criterios eléctricos, técnicos, económicos, medio ambientales, de mantenimiento y sociales que debe tener una instalación de este tipo.

Esta modelación permite obtener la influencia que tienen los elementos. En el método AHP ésta se obtendrá a través de una estructura jerárquica mientras que, para el método ANP se partirá de la matriz de influencias en una estructura genérica en red.

2. Selección de los Expertos:

La selección no solo se ha regido por el nivel académico o jerárquico del experto, sino también de su experiencia laboral obtenida a lo largo de los años en la Republica Dominicana.

Para aplicar el método AHP, se han seleccionado tres expertos con la finalidad de poder realizar un análisis de manera individual inicialmente y, posteriormente de manera agregada. De esta forma será posible llevar a cabo una comparación rigurosa y exhaustiva.

El experto más consistente que ha proporcionado el análisis de sensibilidad del modelado con AHP, será el escogido para aplicar la metodología ANP.

3. Formulación de los Cuestionarios:

Se ha realizado la extracción del conocimiento a través de un cuestionario que permitirá analizar las respuestas de los expertos en base al problema planteado, se ha utilizado la escala fundamental elaborada por Saaty para cada método.

Figura 6: Escala fundamental de Saaty en AHP y Escala fundamental de Saaty en ANP

Escala numérica.	Escala verbal.	Explicación.
1	Igual importancia.	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro.
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro.	Un elemento es muy dominante.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Se usan como compromiso entre dos juicios.
Incrementos 0,1	Valores intermedios en incrementos.	Utilización para graduación más fina de juicios.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual dominancia	Los dos elementos dominan por igual sobre el tercero
3	Dominancia moderada de un elemento comparado con el otro	La dominancia de un elemento es moderadamente más fuerte que la del otro sobre el tercero
5	Dominancia fuerte de un elemento comparado con el otro	La dominancia de un elemento es más fuerte que la del otro sobre el tercero
7	Dominancia muy fuerte de un elemento comparado con el otro	La dominancia de un elemento es mucho más fuerte que la del otro sobre el tercero
9	Extrema dominancia de un elemento comparado con el otro	La dominancia de un elemento es extremadamente más fuerte que la del otro sobre el tercero
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Se usan como compromiso entre dos juicios
Incrementos	Valores intermedios en incrementos	Utilización para graduación más fina de juicios

El diseño del cuestionario se establece teniendo en cuenta los criterios y alternativas ya elegidas considerando que, el experto conoce los datos necesarios para rellenar las respuestas.

Las preguntas tienen el siguiente formato:

Tabla 2: Escala utilizada en cuestionarios.

9 8 7 6 5 4 3 2 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Para AHP la encuesta se divide en dos partes; una establece las prioridades locales de los criterios comparando cada par de criterios y, evaluando la importancia de uno con respecto al otro. La segunda parte es para establecer las prioridades locales de las alternativas donde, se compara cada par de alternativas evaluando la importancia de cada una con respecto a otra en cada criterio.

El cuestionario en el caso del método ANP se divide en tres partes, la primera realiza la comparación entre pares de criterios evaluando la influencia o dominancia de uno respecto al otro, teniendo en cuenta los criterios: Eléctricos, Técnicos, Costes Económicos, Medio Ambientales, Mantenimiento, Social.

La segunda parte realiza la comparación entre pares de sub-criterios, evaluando la influencia o dominancia de uno respecto al otro en cada criterio y la tercera parte realiza la comparación entre pares de alternativas, evaluando la influencia o dominancia de uno respecto al otro en los sub-criterios con mayor peso en la red.

6. Modelización del Caso de Estudio.

Después de haber obtenido los resultados de las encuestas rellenas por cada uno de los expertos, se modelará en una hoja de cálculo Excel paso a paso el proceso analítico jerárquico AHP.

Se realizaron cuatro modelos del AHP, uno por cada experto y otro para la forma agregada, que es la combinación de los modelos hechos.

Los pasos que hemos modelado en cada caso son:

- Cálculo de la media geométrica de la comparación binaria de criterios.
- Cálculo del Vector Propio Normalizado o Cálculo de los Pesos de la comparación binaria de criterios.
- Cálculo del producto de la matriz por el peso, λ_{max} , IC , RC de la comparación binaria de criterios.
- Cálculo de la media geométrica, Pesos, λ_{max} , IC , RC de la comparación binaria de alternativas.
- Tabla de todos los pesos.
- Multiplicación de Pesos de Criterios por los Pesos de las Alternativas.
- Resultado de Decisión o Ranking de las Alternativas.
- Análisis de Sensibilidad.

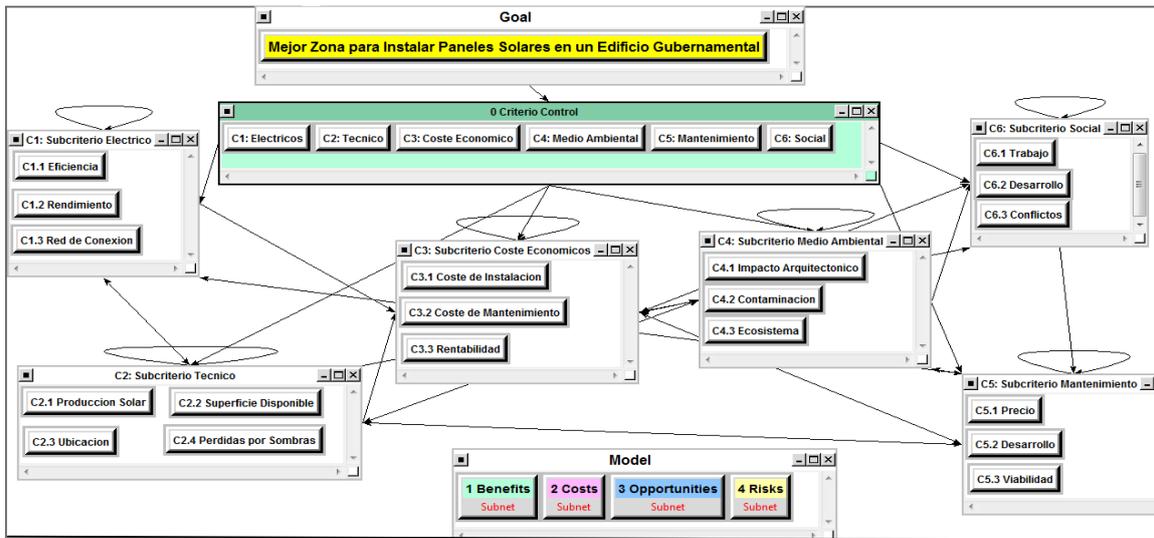
El software SuperDecision se utiliza para la toma de decisiones con la dependencia y la retroalimentación que implementa el método AHP, y el método ANP, hemos realizado el modelado de ANP.

En ANP no existe un elemento de objetivo específico, en lugar de las prioridades se determina un marco relativo de influencias.

En el problema planteado el ANP es un acoplamiento de dos partes, la primera consiste en una jerarquía de control o de la red de criterios y subcriterios que controlan las interacciones en el sistema bajo estudio, la segunda es una red de influencias entre los elementos y grupos.

Se construyen y calculan los cluster y elementos (figura 7) para posteriormente, agrupar los componentes y establecer, la influencia entre ellos teniendo en cuenta los diferentes parámetros de estudios elegidos: Beneficios, Costos, Oportunidades y Riesgos. Finalmente se elaborarán los diferentes modelos que permitirán evaluar las alternativas.

Figura 7: Modelo ANP: Mejor Zona para Instalar Paneles Solares en un Edificio Gubernamental.



La manera en que se introduce los datos establecidos en el cuestionario es abriendo la ventana de herramientas pares comparativas (figura 8).

Figura 8: Ventana de herramientas para comparar nodos y cluster en SuperDecisions

1. Choose		2. Node comparisons with respect to Mejor Zona para Inst~															3. Results						
Node Cluster	Choose Node	Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct															Normal	Hybrid					
Mejor Zona par~	Cluster: Goal	Comparisons wrt "Mejor Zona para Instalar Paneles Solares en un Edificio Gubernamental" n															Inconsistency: 0.19412						
Choose Cluster	0 Criterio Con~	1. C1: Electricos	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C2: Tecnico	0.08228
		2. C1: Electricos	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C3: Coste Econo~	0.21906
		3. C1: Electricos	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C4: Medio Ambie~	0.51413
		4. C1: Electricos	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C5: Mantenimien~	0.12546
		5. C1: Electricos	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C6: Social	0.03693
		6. C2: Tecnico	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C3: Coste Econo~	0.02214
		7. C2: Tecnico	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C4: Medio Ambie~	
		8. C2: Tecnico	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C5: Mantenimien~	
		9. C2: Tecnico	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C6: Social	
		10. C3: Coste Econo~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C4: Medio Ambie~	
		11. C3: Coste Econo~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C5: Mantenimien~	
		12. C3: Coste Econo~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C6: Social	
		13. C4: Medio Ambie~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C5: Mantenimien~	
		14. C4: Medio Ambie~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C6: Social	
		15. C5: Mantenimien~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	C6: Social	

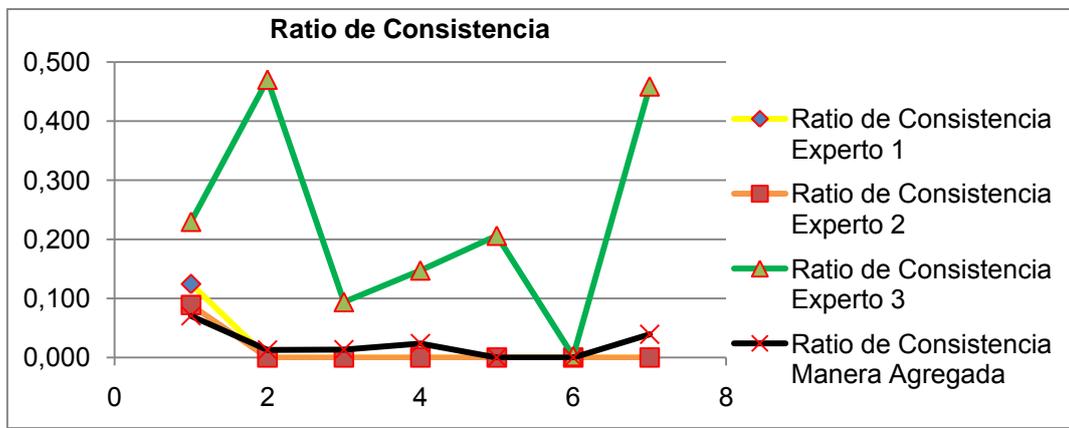
A continuación, se realizan todas las comparaciones binarias de criterios, sub-criterios y alternativas, calculando los vectores de prioridades entre los elementos de la red y, obteniendo el resultado de los pesos de los diferentes elementos con respecto al modelo elaborado.

Finalmente se determinan y normalizan las matrices proporcionadas por el sistema: Supermatriz no ponderada, Supermatriz ponderada, Matriz normalizada de los criterios y Supermatriz Limite.

6.1. Resultados obtenidos con AHP

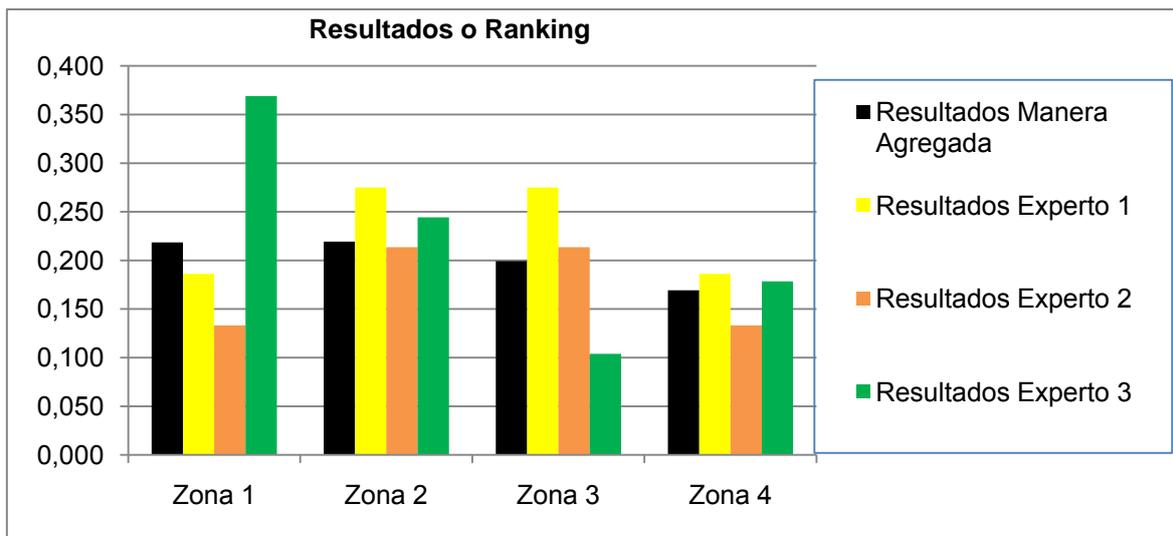
Mejor zona para Instalar Paneles Solares en un Edificio Gubernamental con AHP, comparativa de resultados por expertos en la figura 9.

Figura 9: Ratio de Consistencia del Caso con AHP



En la figura 9 podemos observar que el experto 1, 2 y la forma agregada tienen una consistencia muy parecida, sin embargo el experto 3 es mucho menos consistente ya que es el que menos comparaciones tiene admitidas como válidas, según lo establecido para ratio de consistencia menores del 10 % por (Saaty, 2000).

Figura 10: Resultados o Ranking del Caso de Estudio Con AHP



Al analizar la figura 10, se observa una mayor complejidad en los resultados ya que los valores del experto 1 y experto 2 son similares e identifican más de una alternativa como prioritaria, mientras que el experto 3 es el que tiene resultados precisos que, alteran los

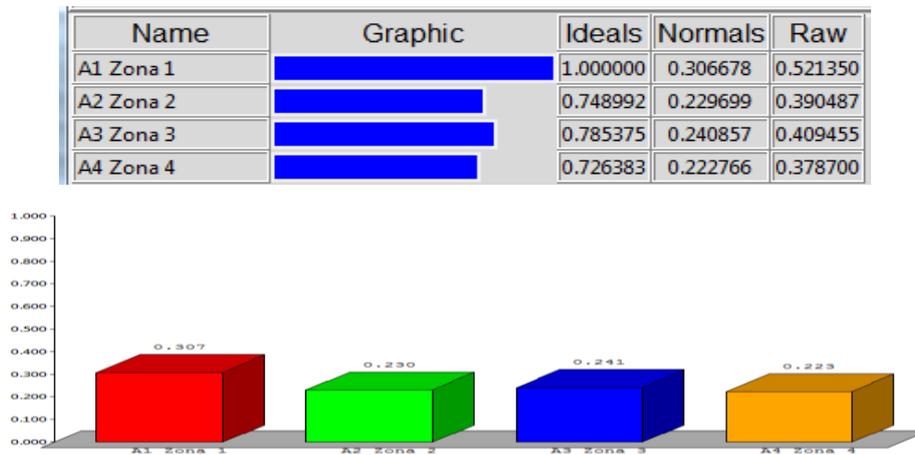
resultados en la manera agregada ya que la escala que representa los juicios cambia las decisiones.

El nivel de inconsistencia del Experto 3 en este caso, es tal que no se puede admitir esos resultados como validos, no pudiendo identificar la independencia en un mismo nivel, el problema consta de elementos interdependientes. Lo recomendable en este caso según (Saaty, 2005), como hemos mencionado es aplicar el método ANP.

6.2. Resultados obtenidos con ANP

Los resultados obtenidos en el caso de la elección de la mejor zona para instalar paneles solares en un edificio gubernamental es:

Figura 11: Resultados del Modelo ANP con SuperDecisions



Se visualiza claramente que la Zona 1.-Aparcamiento principal del ministerio de relaciones exteriores es la más adecuada para instalar los paneles solares, este resultado presenta una distancia considerable respecto a las demás zonas.

Se realizó un análisis de sensibilidad mediante el software SuperDecisions, para confirmar que los resultados obtenidos son robustos y no son frutos al azar, éste se realiza permitiendo variar ligeramente algunas de las ponderaciones del modelo, de manera que es posible observar los cambios producidos en la priorización final de las alternativas.

6.3. Comparación del Caso de Estudio.

A modo de evaluación de los métodos AHP y ANP hemos realizado una comparación de los resultados arrojados con las respectivas evaluaciones del experto 2 para el caso: Mejor zona para instalar paneles solares en un edificio gubernamental.

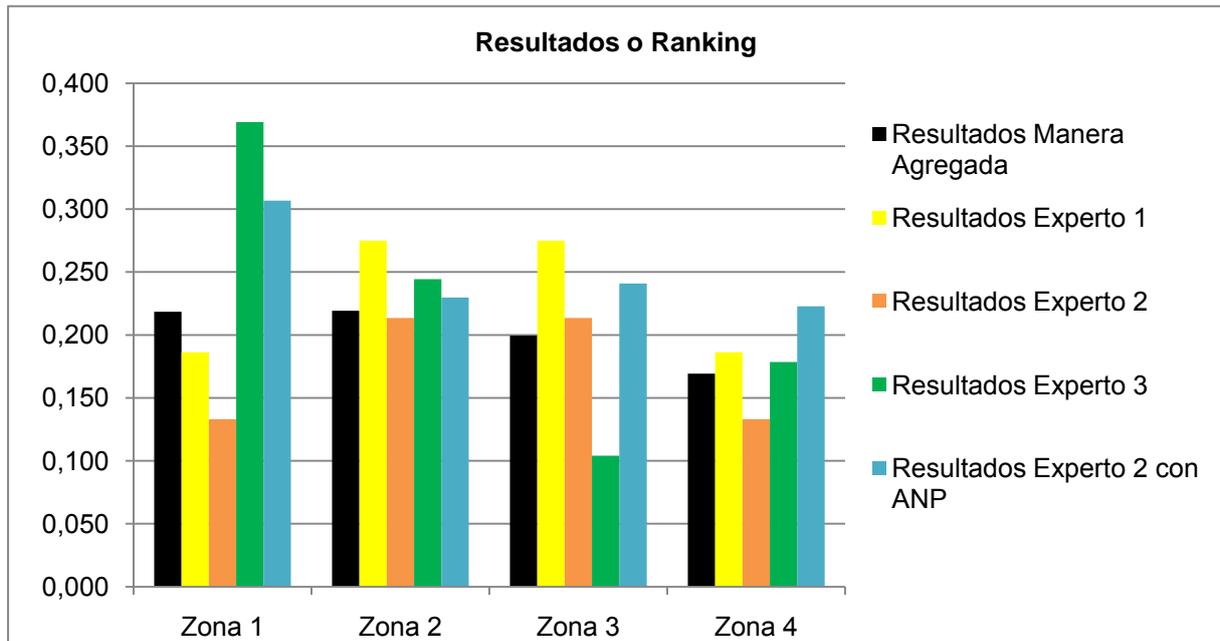
Tabla 3: Comparación Numérica de Resultados o Ranking del Caso de Estudio.

AHP			ANP		
Resultados	Ranking	Alternativas	Resultados	Ranking	Alternativas
0.133	3	Zona 1	0.307	1	Zona 1
0.214	1	Zona 2	0.230	3	Zona 2
0.214	1	Zona 3	0.241	2	Zona 3
0.133	3	Zona 4	0.223	4	Zona 4

En la Tabla 3 vemos como una evaluación rigurosa ha cambiado los resultados de la misma persona que ha sido encuestada sobre el mismo problema y en la figura 13 se comparan todos los resultados obtenidos de los diferentes experto con ambos métodos.

Con el método ANP se han podido evaluar aspectos económicos como por ejemplo la rentabilidad que se ha establecido como un sub-criterio, el análisis arroja claramente que la zona 1 es la más rentable, luego le sigue la zona 3, después la zona 4 y muy cerca está la zona 2.

Figura 12: Grafica en diagrama de barras de los resultados del caso de estudio con AHP y ANP



7. Conclusiones

El método ANP le exige al decisor conocer mejor y definir con mayor precisión el problema que en AHP, de acuerdo a la complejidad del caso hemos obtenido mejores resultados con el modelo ANP, sin dudas el método ANP es mucho más efectivo, se han podido identificar consideraciones económicas tales como los diferentes coste y la rentabilidad.

Se demuestra que los resultados de los diferentes criterios evaluados indican que la zona 1, el aparcamiento principal del edificio gubernamental, es la que tiene un mayor margen de posibilidad frente a las demás alternativas, haciendo énfasis en el peso significativo que tiene el criterio económico al momento de tomar la decisión, el resultado global es similar al resultado de la rentabilidad y los costes.

Existen tres factores determinantes en el cambio de parecer del experto aunque el mayor peso del análisis lo tienen el costo y el aspecto técnico, haber evaluado el medio ambiente y el mantenimiento, hace que se diferencien algunos aspectos característicos como son lo cerca que pueda estar la instalación del edificio gubernamental.

También la viabilidad de acceso que debe tener la instalación para realizar la instalación y el mantenimiento establecido sin paralizar la labor correspondiente del ministerio

Sin duda alguna después de los resultados obtenidos en el problema se puede realizar los pasos siguientes que se dan al implementar un proyecto de energías renovables como puede ser empezar a realizar el estudio de viabilidad o la debida planificación.

En la propuesta se han definido las líneas futuras a considerar para que los métodos modelados se puedan aplicar tanto en España como en la República Dominicana con el objetivo de efectuar procesos de toma de decisiones, sabiendo que el método ANP es el que más apoya al estudio de energías renovables.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con fondos FEDER por la DGICYT mediante el proyecto (TIN2011-27696-C02-01) y por La Junta de Andalucía (P11-TIC-8001), respectivamente.

8. Referencias

- A. Ochs, X. Fu-Bertaux, M. Konold, S. Makhijani, S. Shrank, y C. Adkins, *Roadmap to a Sustainable Energy System: Harnessing the Dominican Republic's Wind and Solar Resources* (Washington DC: Worldwatch Institute, 2011).
- Arancibia, S., Contreras, E., Mella, S., Torres, P., & Villalba, I. (2003). *Evaluación Multicriterio: Aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva*, Universidad de Chile.
- Doumpos, M. Z. C. (2002) *Multicriteria Decision Aid Classification Methods*. Kluwer academics Publishers dordrecht.
- Decreto-Ley: República Dominicana. *Ley 57-07 Reglamento Decreto 202-08. Sobre Incentivos al Desarrollo de Fuentes Renovables de Energía y sus Regímenes Especiales*. (Comisión Nacional de Energía, 2012).
- Pardalos et al., P. M. S. Y. Z. C. (1995). *Advances in Multicriteria Analysis, 185-202*, Kluwer academics Publishers dordrecht. Printed in the Netherlands.
- Saaty, TL. (2000). *Fundamentals of Decision Making and priority theory with the Analytic hierarchy Process*. Pittsburgh: RWS Publications. Y Saaty, TL. (2005). *Theory and Applications of the Analytic Network Process*. Pittsburgh: RWS Publications.
- The SuperDecisions Software implements the Analytic Network Process, Creative Decisions Foundation 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213 USA, Tomado de: <http://www.superdecisions.com>