



**CEU**

*Universidad  
Cardenal Herrera*

*Departamento de Economía y Empresa*

# **Una propuesta metodológica para la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico en la selección de aerogeneradores**

Tesis doctoral

Presentada por: **Pedro García Gómez**

Dirigida por: **Dr. D. Enrique de Miguel Fernández**

**2010**



## **Agradecimientos**

Este trabajo no hubiese alcanzado su meta sin el apoyo y la colaboración de un buen número de personas. Aunque no es momento de nombrar a todas ellas - que quedan en mi memoria - si quiero, en estas líneas, mostrar mi gratitud a las que más cerca han vivido la realización del mismo.

En primer lugar, deseo agradecer al Director de esta tesis, el Prof. D. Enrique de Miguel, sus consejos, aportaciones y muy especialmente el apoyo prestado en todo momento, la confianza que ha depositado en mí y, sobre todo, su sincera y buena amistad.

También quiero mostrar mi gratitud a la Dra. Tormos, al Dr. Blasco y a la Dra. Hernández que contribuyeron con sus acertados comentarios a la mejora de algunos capítulos.

Doy las gracias al Departamento de Economía y Empresa por aceptar que realizara esta investigación y que fuese posible su culminación.

Agradezco al Prof. D. Francisco Morant el haberme dado la oportunidad participar en el diseño y desarrollo de proyectos vinculados al mundo empresarial, contribuyendo de esta forma a despertar mi interés por investigar en las áreas de conocimiento que inciden en él.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia la comprensión y el apoyo que me han brindado durante el desarrollo de esta tesis.

## Resumen

Numerosos problemas de selección surgidos en diversos ámbitos han sido resueltos mediante la aplicación de metodologías multicriterio. En este trabajo de investigación, se presenta una propuesta metodológica para la aplicación del método de decisión Multicriterio, denominado Proceso Analítico Jerárquico (AHP), en la selección de un aerogenerador-tipo que sea susceptible de dar respuesta a las demandas del mercado nacional en un intervalo de tiempo determinado. Con tal finalidad, planteamos el problema de investigación, los objetivos, la hipótesis de trabajo y realizamos una revisión documental y bibliográfica de los métodos multicriterio y su aplicación a problemas de selección. Exponemos los fundamentos del AHP y estudiamos los sistemas de generación de energía eólica existentes, y con mayor implantación en el mercado español, así como los que están en vías de investigación y desarrollo. A partir del estudio y revisión mencionados, identificamos un conjunto de factores críticos y de alternativas de solución a nuestro problema de selección de aerogeneradores. El conjunto de factores y alternativas, tras ser evaluado, se integra en un cuestionario, mediante el cual se obtienen las valoraciones o juicios de un grupo de expertos en energía eólica. Estos juicios, una vez agregados, se someten al proceso de análisis jerárquico con objeto de priorizar los factores críticos y las alternativas de solución al problema de investigación. Posteriormente, se efectúa un análisis de sensibilidad para determinar si la valoración efectuada por el grupo de expertos es consistente y se establece cual es la alternativa más adecuada para resolver el problema de selección de un aerogenerador-tipo. Finalmente, se extraen las conclusiones y se proponen líneas de investigación futura.

**Palabras clave:** Decisión multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico, selección, energía eólica, aerogenerador, identificación, priorización, factores críticos, alternativas, análisis de sensibilidad.

## **Índice general**



	Páginas
<b>Introducción</b>	13
<b>CAPÍTULO I. Metodología de la investigación</b>	
I.1 Introducción.	21
I.2 Definición y objeto de la investigación.	21
I.2.1 Definición	21
I.2.2 Objeto de la investigación	22
I.3 Enfoque de la investigación.	22
I.4 Etapas en el proceso de investigación.	23
I.4.1 Concepción de la Idea Base de la Investigación.	24
I.4.2 Planteamiento del Problema a investigar.	25
I.4.2.1 Objetivos de la investigación.	26
I.4.2.2 Preguntas complementarias de la investigación.	27
I.4.2.3 Justificación del estudio.	28
I.4.3 Elaboración de un Marco Teórico Referencial.	29
I.4.4 Planificación del tipo de investigación.	30
I.4.5 Establecimiento de Hipótesis.	31
I.4.6 Selección del Diseño de Investigación.	32
I.4.7 Obtención de los datos.	33
I.4.8 Análisis de los datos.	34
I.5 Conclusiones	35
<b>CAPITULO II. Estado del Arte de los Métodos de Decisión Multicriterio</b>	
II.1 Introducción.	39
II.2 Evolución de la Decisión Multicriterio.	40
II.3 Revisión de métodos y técnicas.	43
II.3.1 Técnicas Generadoras	44
II.3.1.1 Método de las ponderaciones	45
II.3.1.2 Método de las restricciones (método $\epsilon$ -restriccion o método trade-off)	45

II.3.2	Técnicas que se apoyan en la articulación a priori de las preferencias	46
II.3.2.1	Programación Compromiso	46
II.3.2.2	Programación por Metas	48
II.3.2.3	Programación por Metas Lexicográficas	50
II.3.2.4	Optimización Mini-Max	51
II.3.2.5	Teoría de Utilidad Multiatributo	52
II.3.2.5 .1	Método de la suma ponderada	54
II.3.2.6	Métodos de sobreclasificación	56
II.3.2.6.1	ELECTRE	58
II.3.2.6.2	PROMETHEE	60
II.3.2.7	AHP	62
II.3.2.8	ANP	69
II.3.2.9	Integración de AHP y ANP con otras técnicas	72
II.3.3	Técnicas que se apoyan en la articulación progresiva de preferencias	77
II.4	Conclusiones	78

### **CAPITULO III. El Proceso Analítico Jerárquico. Fundamentos y justificación de su empleo.**

III.1	Introducción	81
III.2	El Proceso de Toma de Decisión.	81
III.3	Proceso Analítico Jerárquico.	84
III.3.1.	Escala del AHP y su justificación.	87
III.3.2.	Justificación matemática del método.	92
III.3.3.	Axiomas en los que se asienta el Proceso Analítico Jerárquico.	96
III.4	Proceso Analítico en Red.	97
III.5	Justificación del empleo de AHP en la investigación	102
III.6	Conclusiones	105

## **CAPITULO IV. Sistemas de generación de energías renovables.**

### **Aerogeneradores**

IV.1 Introducción.	109
IV.2 Características de la energía eólica.	110
IV.3 Aerogeneradores. Tipología.	112
IV.3.1 Tipos de aerogeneradores según la posición del eje.	112
IV.3.2 Tipos de aerogeneradores según el generador utilizado.	113
IV.3.3 Aerogenerador de eje horizontal. Componentes.	114
IV.4 Evolución de la producción eléctrica a partir de energía eólica.	117
IV.5 Productos actuales y tendencias tecnológicas en el sector.	125
IV.6 Alternativas, elementos y características a utilizar en la investigación.	135
IV.7 Normativa reguladora y su incidencia la producción.	138
IV.8 Conclusiones	140

## **CAPÍTULO V. Identificación de criterios y alternativas. Diseño del cuestionario.**

V.1 Introducción.	145
V.2 Identificación de las variables explicativas.	145
V.3 Diseño del cuestionario.	150
V.4 Proceso de validación.	155
V.4.1 Información sobre los evaluadores.	157
V.4.2. Informes de los evaluadores y adaptación del cuestionario.	158
V.5 Panel de expertos.	163
V.5.1 Criterios para la selección del panel de expertos.	163
V.5.2 Justificación del número de expertos.	164
V.5.3 Carta al panel de expertos	167
V.6 Conclusiones.	168

## **CAPITULO VI. Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico para la priorización de alternativas.**

VI.1 Introducción	171
VI.2 Objetivo principal	172
VI.3 Metodología	172
VI.3.1 Planteamiento del problema en la estructura jerárquica	174
VI.3.2 Construcción de las matrices de comparación	176
VI.3.3 Juicios comparativos	179
VI.3.4 Aplicación del Test de consistencia	181
VI.3.5 Análisis de sensibilidad	182
VI.4 Priorización de criterios	183
VI.4.1 Evaluación de las matrices de decisión de los subcriterios	183
VI.4.2 Evaluación de la matriz de decisión de los criterios	191
VI.4.3 Análisis de sensibilidad de los resultados	195
VI.5 Priorización de las alternativas de solución	199
VI.6 Conclusiones	201

## **CAPITULO VII. Conclusiones y futuras líneas de investigación**

VII.1 Conclusiones generales.	207
VII.2 Futuras líneas de investigación.	211

<b>FUENTES Y BIBLIOGRAFIA</b>	<b>213</b>
-------------------------------	------------

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>235</b>
-------------------------	------------

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>239</b>
--------------------------	------------

<b>ABREVIATURAS UTILIZADAS</b>	<b>243</b>
--------------------------------	------------

## **APÉNDICE DOCUMENTAL**

<b>Anexo I.</b> Cuestionario	247
<b>Anexo II.</b> Descripción de las alternativas, criterios y subcriterios	255



## **Introducción**



“Hacer una tesis significa: (1) localizar un tema concreto; (2) recopilar documentos sobre este tema; (3) poner en orden estos documentos; (4) volver a examinar el tema partiendo de cero a la luz de los documentos recopilados; (5) dar una forma orgánica a todas las reflexiones precedentes; (6) hacerla de forma que quien la lea entienda lo que se quería decir y pueda, si así lo desea, recurrir a los mismos documentos para reconsiderar el tema por su cuenta.”  
(Umberto Eco: *Cómo se hace una tesis*, página 22).

Uno de los mayores retos al que se enfrenta actualmente la sociedad es conseguir una energía disponible, accesible y aceptable. La accesibilidad esta ligada a una adecuada política de precios, la disponibilidad, a la calidad de la energía y a la seguridad de suministro a largo plazo y la aceptabilidad, fundamentalmente está vinculada a los objetivos medioambientales y a la sensibilidad pública ante su forma de interacción con el entorno.

Los desafíos tecnológicos planteados en el sector energético, para ser viables, deberán ser capaces de responder a estos objetivos y a las necesidades económicas y productivas de los países.

Desconocemos, con un grado de fiabilidad aceptable, cuándo los recursos energéticos fósiles y minerales empezarán a escasear, pero teniendo en cuenta el incremento del consumo que se está dando como consecuencia de los elevados índices de crecimiento de las economías emergentes (Gómez 2008) (La Caixa 2008), puede pensarse que la obtención de energía a partir de estas fuentes resultará insostenible para las próximas generaciones, tanto por el agotamiento de los recursos como por su incidencia en el medioambiente. Incluso considerando la evolución que vienen mostrando las tecnologías de prospección, producción y recuperación del petróleo y el gas natural.

Ante este hecho, la energía nuclear y las energías alternativas y renovables están contribuyendo y previsiblemente contribuirán, en mayor medida, en el futuro a sustituir a las tradicionales fuentes energéticas y satisfacer la creciente demanda energética mundial. Para ello, se están desarrollando diversas tecnologías cuya implantación en el mercado dependerá de que puedan ser económicamente competitivas.

El potencial de producción de energía por fusión es elevado, pero es probable que este proceso no pueda tener el crecimiento necesario para ser considerada un sustitutivo del petróleo y sus derivados, sobre todo por la sensibilización de la sociedad ante los riesgos que puede implicar para el medio ambiente y la vida humana como consecuencia fundamentalmente de su inadecuado control y del tratamiento y almacenaje de los residuos que produce (Lara del Vigo 2008). Además, sólo unos pocos países desarrollados poseen el nivel económico y tecnológico necesario para desarrollar una producción fiable y suficiente, y a esto hay que sumar la voluntad política de no propiciar su implantación en otros países por sus posibilidades de aplicación a la industria armamentística.

Frente a esta perspectiva hemos de considerar que las energías renovables se nos presentan como el mejor sustituto a largo plazo. Y dentro de ellas, es especialmente significativo el desarrollo tecnológico experimentado en el aprovechamiento de la energía eólica en las últimas décadas, que ha sido posible gracias a la existencia de programas nacionales y supranacionales de investigación y desarrollo que comenzaron a surgir a raíz de la crisis energética de 1973, de modo que a finales de la década de los setenta del siglo XX ya aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales. De estas primeras máquinas, a los aerogeneradores que se están instalando en la actualidad, ha existido un notable desarrollo que permite afirmar que es una tecnología madura.

La optimización de los componentes que integran los aerogeneradores y el paso de una fabricación artesanal a una producción en serie han permitido una reducción importante en el coste de producción, instalación y mantenimiento de los aerogeneradores.

Paralelamente a esta disminución de los costes se ha producido un incremento en el tamaño de los aerogeneradores, pasando de los 100 kW de potencia nominal a los actuales aerogeneradores de más de 3.000 kW mediante la incorporación de nuevas tecnologías, diseños optimizados y la utilización masiva de materiales avanzados en su fabricación. Todo ello ha propiciado un rápido desarrollo de los aerogeneradores integrados en parques eólicos y conectados a la red eléctrica y un constante aumento de la producción de energía eléctrica a partir de energía eólica.

Un claro exponente de ello, es el desarrollo que esta industria está teniendo en España, en donde más del 10% de electricidad se obtiene a partir de la energía eólica, siendo su impacto global en el PIB español de un 0,35% en 2007 (Deloitte 2008). Esto ha convertido a España en el segundo país del mundo, tras Dinamarca, que más produce y consume este tipo de energía.

Este incremento en la producción de energía eólica se ha debido a la inversión efectuada, por empresas del sector y por las administraciones públicas, lo que ha permitido lograr importantes avances tecnológicos e incorporarlos en la fabricación, instalación y mantenimiento de los aerogeneradores. En el entorno competitivo en que se van encuadrando los productores de energía eólica, es necesario ser, cada día, más eficientes y eficaces, utilizar racionalmente los recursos disponibles y dar satisfacción a un cliente cada vez más exigente, consciente y preparado.

En este contexto, las organizaciones vinculadas a la producción de aerogeneradores, tienen que tomar decisiones considerando múltiples criterios y alternativas. Esta toma de decisiones, en el caso de la producción de energía eólica, puede afectar, entre otros, a la necesidad de optimizar costes I+D, de fabricación de los aerogeneradores, de producción de la energía, como afrontar las políticas medioambientales, etc.

Un tipo de decisión, que contiene las características citadas en el párrafo anterior, es la adecuada selección de un tipo de aerogenerador, que sea capaz de dar respuesta a las previsibles demandas del mercado en un determinado intervalo temporal. Para contribuir a la solución de este problema, la presente investigación tiene por objetivo principal proponer un criterio que permita, a las organizaciones, identificar y priorizar, aplicando el método de decisión multicriterio denominado Proceso Analítico Jerárquico (Saaty 2008), los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas que se analicen en ese momento, a las previsibles demandas del mercado.

Con esta finalidad, en nuestra tesis, comenzamos analizando la metodología a aplicar en la investigación, formulamos la Idea Base y planteamos el Problema de Investigación, los objetivos específicos, las preguntas complementarias, elaboramos un marco teórico referencial y se establece la hipótesis de trabajo.

De acuerdo con la metodología, llevamos a cabo una revisión bibliográfica y documental relacionada con los problemas de decisión y los principales métodos de decisión multicriterio (MDM), haciendo un especial énfasis en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Se describe el marco teórico en el que se asientan los Métodos de Decisión Multicriterio Discretos, los fundamentos del AHP y se toman como referencia los trabajos y opiniones de los autores que aparecen en la literatura revisada y que han aplicado AHP a otros problemas de selección de tecnología y maquinaria.

Se estudian los sistemas de generación de energía eólica existentes y con mayor implantación en el mercado español, revisando las principales características de la energía eólica y de la producción de electricidad mediante los distintos tipos de generadores que se encuentran en el mercado o que están en vías de diseño y desarrollo tanto por parte de las empresas como por parte de los centros de investigación. A partir del estudio y revisión mencionados, identificamos un conjunto de factores críticos y de alternativas de solución a nuestro problema de selección de aerogeneradores. El conjunto de factores y alternativas, una vez evaluado, se integra en un cuestionario, mediante el cual se obtienen las valoraciones o juicios de los expertos en energía eólica.

Una vez agregados los juicios obtenidos, se someten al proceso de análisis jerárquico con objeto de priorizar los factores críticos y las alternativas de solución al problema de selección de aerogeneradores. Posteriormente, se efectúa un análisis de sensibilidad para determinar si la valoración efectuada por el grupo de expertos es consistente y se establece cual es la alternativa más adecuada.

Finalmente, se extraen las conclusiones oportunas que se exponen en el capítulo VII, en el que también consideramos unas posibles líneas de investigación futura que puedan dar continuidad a la presente investigación.

En cualquier caso, tal y como nos enseña Humberto Eco, esperamos que esta tesis cumpla, además de con sus objetivos, con la obligación de haberla realizado de forma que quien la lea entienda lo que se quería decir y pueda, si así lo desea, recurrir a los mismos documentos para reconsiderar el tema por su cuenta o para continuar alguna o algunas de las líneas de investigación futuras que se proponen.

**Capítulo I**  
**Metodología de la investigación**



## **I.1 Introducción**

El objetivo del presente Capítulo es establecer una metodología para llevar a cabo nuestra investigación. Dicha metodología estará basada en el método científico y tendrá como referencia autores de reconocido prestigio. Definiremos en primer lugar el concepto de investigación científica, el objeto principal y los objetivos específicos que planteamos como meta de nuestra investigación para, posteriormente, abordar el enfoque y las etapas que deben seguirse, en general, en el proceso investigador y, en particular, en esta tesis doctoral.

## **I.2 Definición y objeto de la investigación**

### ***I.2.1 Definición***

La investigación científica se puede definir como una investigación sistemática, controlada, empírica y crítica de fenómenos naturales, guiada por la teoría y la hipótesis sobre las presuntas relaciones entre esos fenómenos (Kerlinger y Lee. 2002). Esta definición contiene aspectos referidos a exigencias explícitas que el investigador debe considerar durante el desarrollo metodológico de su actividad investigadora, con el fin de atribuirle rigor lo que aportará confianza en los resultados que obtenga.

El hecho de que la investigación científica se desarrolle de manera sistemática y controlada se refiere a una constante disciplina para investigar sin dejar los hechos a la casualidad, esto significa que el investigador debe aportar un gran sentido del orden y de la constancia, propio de aquellos que han desarrollado un alto grado de responsabilidad. Así mismo, el carácter empírico de la investigación científica permite comprobar las consideraciones subjetivas frente a realidades objetivas, apoyadas en la recolección y análisis de datos (Grajales 1996).

La investigación científica tiene como objetivos principales, por un lado la producción de nuevo conocimiento mediante la generación de teorías y contrastación de hipótesis en las áreas básicas de la ciencia, y por otro lado la utilización de técnicas de investigación para incrementar el conocimiento y permitir el avance de una profesión,

lo cual esta intrínsecamente ligado a la solución de problemas prácticos en cada área específica del conocimiento (Kumar 2005).

El quehacer investigador deber ser un proceso ordenado, que comúnmente sigue una serie de etapas encadenadas, las cuales permiten abordar el estudio de cada situación de una forma secuencial, favoreciendo el desarrollo del proceso y generando confianza en los resultados, en lo que se conoce como método de investigación, la metodología de la investigación ofrece al investigador una serie de herramientas que deberán ser utilizadas con el fin de dar solución a problemas científicos (Heinemann 2003).

Como podremos comprobar a lo largo del presente capítulo y en los siguientes, nuestra tesis doctoral se lleva a cabo de acuerdo a las definiciones y criterios expuestos, habiendo seguido en su planteamiento y desarrollo una secuencia metodológica ajustada al quehacer científico. Con ello, pretendemos aportar nuevo conocimiento en el área de la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico definido por Saaty (2008) y resolver un problema práctico presentado una técnica de resolución que por sus características permite su aplicación a otros problemas de selección de tecnología.

### ***1.2.2 Objeto de la investigación***

El objetivo principal de esta investigación, es proponer un criterio que permita, a las empresas y administraciones, identificar y priorizar, aplicando el Proceso Analítico Jerárquico, los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado nacional hasta 2015.

### **1.3 Enfoque de la investigación**

Abdellah y Levine (1994) diferencian entre dos tipos de enfoques de la investigación: cualitativo y cuantitativo. Cabrero y Richart (1996), destacan que los métodos de investigación cuantitativa incluyen los diseños experimentales y cuasiexperimentales basados en la recolección y análisis de datos cuantitativos a partir de variables, mientras que la de tipo cualitativo, incluye entre otras las técnicas de investigación

fenomenológicas y las técnicas de investigación-acción, basadas exclusivamente en la narración de fenómenos sin apoyarse en la medición de variables.

Considerando la complejidad del proceso investigador, Vera y Villalón (2005), proponen la triangulación entre los enfoques cualitativo y cuantitativo, como una alternativa útil para orientar los métodos a emplear en una investigación. En ese mismo sentido Tashakkori y Teddlie (2003) y Rosa (2005), definen el enfoque mixto como un proceso que recolecta, analiza y vincula datos cuantitativos y cualitativos en un mismo estudio para responder a un planteamiento, solucionar un problema o para responder a unas preguntas de investigación.

Por las características del presente trabajo, en el cual se abordaran etapas desde el punto de vista cualitativo, además de definir variables medibles sobre las que se toman y analizan datos cuantitativos, se adopta como enfoque investigador, el modelo mixto, como una integración entre los enfoques cualitativo y cuantitativo durante todo el proceso de la investigación.

#### **I.4 Etapas en el proceso de investigación**

Como hemos expuesto anteriormente, la labor investigadora debe seguir una serie de etapas encadenadas, buscando facilitar el proceso y generar confianza en los resultados: atendiendo la propuesta de Hernández et al. (2003), los pasos seguidos en el desarrollo de la presente investigación se enumeran a continuación:

1. Concepción de la Idea Base de la Investigación.
2. Planteamiento del Problema a investigar.
3. Objetivos de la investigación.
4. Elaboración de un Marco Teórico de Referencia.
5. Planificación del tipo de investigación.
6. Establecimiento de Hipótesis.
7. Selección del Diseño de Investigación.
8. Obtención de los datos
9. Análisis de los datos.

#### ***1.4.1 Concepción de la Idea Base de la Investigación***

La idea inicial sobre la investigación es un acercamiento, poco definido, a la posibilidad de solucionar un problema que percibimos en nuestro entorno. Esta imprecisión exige un análisis posterior que permita estructurar la idea inicial, definir el contexto y los elementos que componen el problema.

En nuestro caso, la idea inicial surge al Considerar que el Plan de Energías Renovables 2011-2020 marca como objetivo para 2020 que las energías renovables cubran el 20% de la demanda total de energía en nuestro país.

Alcanzar este objetivo supone, a nivel nacional, dar un empuje importante al aporte actual que las energías renovables hacen sobre el balance energético nacional, ya que actualmente es la única vía para conseguir un mayor grado de independencia energética y, al mismo tiempo, lograr una reducción en las emisiones a la atmósfera de CO<sub>2</sub> acercándose así a los compromisos derivados del Protocolo de Kyoto en el periodo 2008-2015.

Para alcanzar estos objetivos, el Gobierno de España y los de las Comunidades Autónomas han venido subvencionando, de diversas formas, la instalación de sistemas de producción de energías renovables. Pero a partir de 2009, las distintas Administraciones están realizando una rebaja progresiva en la cuantía de dichas subvenciones con la finalidad de que las empresas productoras de energía vayan afrontando los costes reales.

Esta situación genera una mayor competitividad entre los productores de energía eléctrica obtenida de la transformación de la energía eólica y, consecuentemente, genera la necesidad de una reducción de los costes de producción y también de que se fabrique un tipo de aerogenerador que sea aceptado en el mercado nacional tanto por su capacidad de generación a un coste total asumible como por producir un menor impacto medioambiental. Bajo este planteamiento, surge la idea de nuestra investigación que podría enunciarse de la siguiente forma:

*Es de utilidad proponer un criterio que permita, a las empresas y administraciones, identificar y priorizar los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor*

*respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado nacional hasta 2015.*

#### ***1.4.2 Planteamiento del Problema a investigar***

De acuerdo con el proceso de investigación definido, es necesario transformar la idea inicial en un problema que necesita ser resuelto mediante el presente trabajo. Para ello, se requiere un conocimiento del tema planteado en la idea de investigación, de forma que permita al investigador, precisar los tres criterios definidos por Hernández et al.(2003): los objetivos que persigue la investigación, las preguntas de la investigación y la justificación del estudio. García (2002), considera la definición del problema como la base y el punto de partida que determinará el éxito de la investigación y sus argumentos, coincidiendo con Hernández et al. (2003) en que el planteamiento del problema debe incluir además de los antecedentes, los objetivos, propósitos y las razones teóricas, prácticas o de otra índole que sustenten la conveniencia de realizar el estudio.

Como definimos al enunciar la idea de investigación, se plantea para los fabricantes, distribuidores energéticos y administraciones la necesidad de contar con sistemas adecuados de generación de energía eólica que sean capaces de contribuir a los objetivos establecidos en los planes nacionales e internacionales de producción de energías renovables y de conservación del medioambiente. Estos sistemas quizás ya existen en el mercado o están en fase de desarrollo, pero el problema radica en encontrar qué características deben reunir para ser considerados idóneos por el mercado nacional en 2015.

Con las consideraciones anteriores, la idea cada vez toma más la forma de un proyecto y a medida que se avanza en la depuración del concepto inicial, se identifican nuevos elementos de juicio que permiten enunciar el problema de investigación en forma de pregunta:

*¿Es posible establecer un criterio que permita seleccionar un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado nacional hasta 2015?.*

#### ***1.4.2.1 Objetivos de la investigación***

Los objetivos planteados para esta investigación, cuyo desarrollo permitirá entender el fenómeno que se estudia, dar respuestas puntuales a las preguntas de investigación y proponer conclusiones útiles derivadas de los resultados del estudio, son los siguientes:

Objetivo general: Ya ha sido enunciado en el apartado *1.2.2 Objeto de la investigación* en la siguiente forma: *proponer un criterio que permita, a las empresas y administraciones, identificar y priorizar, aplicando el Proceso Analítico Jerárquico, los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado nacional hasta 2015.*

El objetivo anterior se concreta en los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar el Estado del Arte de los métodos de decisión multicriterio, haciendo especial énfasis el Proceso Analítico Jerárquico, y de aquellas técnicas que puedan servir para contrastar sus resultados.
2. Plantear el marco teórico sobre el que se asientan los métodos de decisión multicriterio, especialmente el proceso analítico jerárquico, y justificar su aplicación a nuestra investigación.
3. Analizar los sistemas de generación de energía eólica existentes y con mayor implantación en el mercado español.
4. Identificar factores críticos que intervienen en la selección de aerogeneradores.
5. Diseñar un cuestionario para recoger la opinión, de expertos en aerogeneradores, sobre la importancia de los factores críticos que se hayan identificado y las alternativas de solución que se propongan.
6. Aplicar el cuestionario, analizar la información obtenida y priorizar los factores críticos y alternativas mediante el Proceso Analítico Jerárquico.

7. Extraer las conclusiones oportunas y proponer líneas de investigación futuras que puedan dar continuidad a la presente investigación.

Los objetivos enunciados se alcanzan a través del proceso que se plasma en los capítulos siguientes.

#### ***1.4.2.2 Preguntas complementarias de la investigación***

Con el objeto de complementar lo que pretendíamos expresar en el problema de la investigación, parece oportuno formular en este punto una serie de preguntas complementarias que contribuyan a la estructura conceptual de la investigación. Con la formulación de éstas preguntas se pretende, además, aportar claridad a la investigación y, en su caso, permitirnos reformular planteamientos iniciales a la luz de nuevas observaciones (Stake 1998). En este sentido, nos planteamos las siguientes cuestiones que entendemos es necesario resolver durante el desarrollo de la investigación:

- a) *¿Cuáles son los factores que caracterizan a los aerogeneradores que se encuentra en el mercado actualmente?*
- b) *¿Cuáles son los factores que caracterizan a los sistemas de generación que se encuentran en fase de investigación y desarrollo por parte de los fabricantes con mayor implantación actual en el mercado español?*
- c) *¿Cuáles son las tendencias actuales en el campo de la investigación de sistemas de generación que se lleva a cabo en los centros públicos de investigación?*
- d) *¿Es posible establecer un conjunto de generadores tipo que reflejen las características por las que nos preguntamos en las cuestiones anteriores?*
- e) *¿Es posible obtener información de un grupo de expertos en aerogeneradores sobre cuales de dichas características se implantarán en los aerogeneradores de ahora hasta 2015?*
- f) *¿Es posible utilizar un método de decisión multicriterio que nos permita priorizar esas características y contribuyan a determinar que aerogenerador tipo será el de más aceptación?*
- g) *¿Si se establece un ranking de prioridades con las alternativas de solución (aerogeneradores tipo), este ranking es válido al considerar diversos escenarios?*

*h) ¿Se puede determinar cual es la mejor alternativa de solución al problema de investigación propuesto?*

### ***1.4.2.3 Justificación del estudio***

Según Caivano (1995) los trabajos de investigación deben servir, no solamente por sus aplicaciones practicas, sino que además deben ser científicamente útiles, por ello, la presente investigación puede justificarse desde dos puntos de vista: en primer lugar, desde el socioeconómico en las empresas y administraciones que lo utilicen para sus investigaciones y desarrollo de productos y en segundo lugar, con respecto a la aportación de conocimiento, que permita hacer un aporte al desarrollo de nuevas investigaciones, especialmente en el campo de la selección de tecnología.

Como tratamos en apartados anteriores, la sustitución progresiva de las energías fósiles por energías renovables es necesaria tanto para que los países no productores de las primeras logren su independencia energética como para la mejora del medioambiente. Por otra parte, hay que considerar que hasta ahora, existía abundante disponibilidad de subvenciones para la implantación de aerogeneradores, pero la progresiva rebaja en la cuantía de las mismas, que está aplicándose por parte de las administraciones públicas, hace necesario un método que permita seleccionar un tipo de producto cuyas características lo hagan competitivo en el mercado nacional.

Encontrar una solución al problema planteado en esta investigación implica, desde el punto de vista socioeconómico, encontrar un método o criterio automatizado que aporte a empresas y administraciones la mejor alternativa capaz de dar respuesta a los condicionantes descritos en el punto anterior.

Con respecto a la justificación de la investigación relacionada con la producción de nuevo conocimiento, el desarrollo de la investigación planteada permite la realización de un trabajo original de investigación, relacionado con el campo de la selección de tecnología, en el que se emplearan herramientas y conceptos de carácter técnico-científico, que permiten abordar un problema y solucionarlo cumpliendo simultáneamente la tarea principal que es acreditar la habilidad investigadora del doctorando y la capacidad de comunicar a otros lo descubierto, siguiendo las pautas de quienes le han precedido y de quienes trabajan en el mismo campo de investigación.

Con lo anterior, la realización de nuestra investigación se justifica por el hecho de poner a disposición de la comunidad científica, empresas y administraciones, la utilización de técnicas de decisión multicriterio en la solución de un problema de investigación, relacionado con los factores que influyen en la selección de un aerogenerador tipo, tema que hasta ahora no se ha investigado de manera específica y que, por consiguiente, constituye un reto para el investigador.

#### ***1.4.3 Elaboración de un Marco Teórico de Referencia***

Según Henríquez y Barriga (2003), la elaboración de un marco de referencia además de identificar exactamente lo que se busca mediante el desarrollo de la investigación, permite evaluar las opciones disponibles para llevar a cabo la investigación, incluyendo las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

La revisión y discusión reflexiva de la literatura especializada, actualizada y pertinente sobre la temática abordada, además de contribuir al proceso de construcción del conocimiento, permite al investigador adoptar una teoría básica para el desarrollo de su trabajo, confiriéndole a la investigación el carácter de cuerpo integrado (Cabrera, 2005).

La construcción del marco teórico referencial para esta investigación, se basa en la revisión bibliográfica y documental y será efectuada en el Capítulo II y estará relacionada con los problemas de decisión, los principales métodos de decisión multicriterio, su integración con otras técnicas y la aplicación de dichos métodos a la resolución de problemas complejos, especialmente a la selección de tecnología.

También contribuye a la construcción del marco teórico referencial el estudio que hemos llevado a cabo en el Capítulo III sobre el marco teórico en el que se asientan los procesos de toma de decisión, con especial énfasis en el Proceso Analítico Jerárquico y el análisis de los sistemas de generación de energía eólica realizado en el Capítulo IV. La información ha sido consultada en publicaciones seriadas en formato impreso y electrónico y en las bases de datos especializadas, especialmente se han consultado artículos relacionados con la temática de nuestra investigación y que han sido publicados en revistas de referencia en los últimos 5 años. También se han consultado tesis doctorales realizadas en áreas similares al de esta investigación.

Además, el doctorando ha estado en comunicación con expertos en el campo de la energía eólica y los aerogeneradores, en diseño de herramientas para la recogida de datos e información, tratamiento estadístico de datos y con investigadores cuyas líneas de estudio tienen relación con el tema de este trabajo. Todo ello con objeto de enriquecer información relacionada con el fenómeno estudiado.

#### ***1.4.4 Planificación del tipo de investigación***

Diversos autores han propuesto clasificaciones o diferenciado los tipos de investigación en función de la forma en que ésta se desarrolla para alcanzar sus objetivos. Entre dichos autores destacan los siguientes:

Cegarra (2004), que clasifica la investigación en teórica, experimental, combinatoria, investigación por observación de la naturaleza y sociológica, siendo la que mas se ajusta a las ciencias aplicadas y la ingeniería, la investigación experimental que puede o no tener una hipótesis previa, pero que en cualquier caso, los resultados se presentan asociados a variables.

Hernández et al. (2003), que propone cuatro tipos de investigación: Exploratoria, descriptiva, explicativa y correlacional, indicando que el tipo de estudio determinará la estrategia de la investigación, el diseño de la investigación y la forma en que se recolectan los datos.

Bunge (1985) y Tamayo (1981), que abordan el proceso de la investigación científica estableciendo las características de la investigación bibliográfica como cuerpo de investigación documental que aborda la revisión y análisis de libros y artículos con el objeto de contribuir a la construcción del conocimiento en un campo concreto. También abordan la investigación de campo como parte de la investigación experimental definiéndola como el proceso que, utilizando el método científico, permite obtener nuevos conocimientos en el campo de la realidad social (Investigación pura), o bien estudiar una situación para diagnosticar necesidades y problemas a efectos de aplicar los conocimientos con fines prácticos (investigación aplicada).

Dado que el desarrollo esta investigación comprende dos grandes fases debidamente secuenciadas, cuyos objetivos pretenden dilucidar componentes de un mismo problema, se propone una planificación segmentada en la forma siguiente:

- La primera parte de la investigación, que comprende la identificación de factores críticos (criterios y subcriterios o variables explicativas) que caracterizarán a las alternativas, se configura como una investigación de tipo bibliográfica, documental y de campo.
- En la segunda parte de la investigación, se prioriza el efecto de los factores críticos identificados en la primera parte, por lo que la investigación tendría las características propias de una investigación descriptiva, buscando situar las variables definidas dentro de un orden de prioridades, de acuerdo a la información recolectada.

Existe poca información y escasos antecedentes relacionados con los factores críticos objeto de estudio ya que esta investigación abarca un tema que, si bien ha sido estudiado en referencia a otro tipo de tecnologías, no ha sido estudiado para el caso de los sistemas de generación de energía eólica. Además, se definen variables y se pretende obtener de ellas mediciones precisas que aporten soluciones (alternativas) al problema planteado. Por ello, nos planteamos el desarrollo de la investigación desde el punto de vista exploratorio-descriptivo.

#### ***1.4.5 Establecimiento de la Hipótesis***

Una vez planteado y examinado el problema de la investigación, conviene contrastar las ideas proponiendo teorías que intenten resolverlo, las hipótesis constituyen el punto de partida en una argumentación, cuyo enunciado corresponde a una premisa usada en el razonamiento y consiste por tanto en un supuesto que intenta explicar el fenómeno objeto del problema (Bunge, 1983).

Considerando el problema definido para esta investigación y las preguntas que complementan el fenómeno que se pretende dilucidar, se formula la siguiente hipótesis:

*Es posible resolver, aplicando una metodología basada en el Proceso Analítico Jerárquico, el problema de identificar y priorizar los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste*

*sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado nacional hasta 2015.*

#### ***1.4.6 Selección del Diseño de Investigación***

Hernández et al. (2003) define el diseño de investigación, como el plan o estrategia que se desarrolla para obtener la información que permita al investigador responder a las preguntas de investigación de una forma práctica y concreta.

El diseño de la investigación proporciona la estructura necesaria para que una vez se tenga claridad sobre el problema de la investigación y sus interrogantes, se definan los procedimientos para la recolección, tratamiento y presentación de la información, de manera que se ajuste a los estándares científicos y proporcione confianza en los resultados.

Dentro del presente trabajo de investigación podemos mencionar dos secciones fundamentales, cada una de las cuales se estructura de acuerdo a modelos experimentales predefinidos y probados en investigaciones similares:

- La primera sección establece el proceso de análisis para la identificación de factores críticos (variables explicativas o criterios y subcriterios) que caracterizan a las alternativas (soluciones al problema) que también son identificadas en el proceso.
- La segunda sección aborda el proceso de síntesis, modelizando el problema, priorizando las alternativas mediante la agregación de las valoraciones suministradas por los expertos y el empleo del Proceso Analítico Jerárquico con el fin de obtener la alternativa prioritaria en el escenario considerado. Esta solución se evalúa en otros escenarios mediante el análisis de sensibilidad y se determina la mejor solución al problema.

Los procedimientos experimentales mencionados en las dos secciones pueden ser observados con mayor profundidad en los apartados siguientes, en los capítulos V y VI y en los Anexos.

#### ***1.4.7 Obtención de los datos***

Toda investigación implica la recolección y el análisis de los datos obtenidos a través de la observación, la medición, las preguntas, o una combinación de las anteriores estrategias. Los datos pueden ser numéricos, verbales, respuestas a cuestionarios o registros de observaciones o experimentos (Blaxter *et al.* 2005).

Durante el desarrollo de este trabajo, se seleccionaron los siguientes instrumentos para obtener los datos necesarios a fin de dar respuesta a las preguntas de investigación:

- La lista inicial de alternativas y variables explicativas que las caracterizan se obtuvo a partir de la investigación bibliográfica y documental llevada a cabo.
- Dicha lista se sometió posteriormente a la validación de un experto que emitió su juicio mediante el informe correspondiente, el cual dio origen a una nueva lista de alternativas y variables que tenía en cuenta las aportaciones del validador.
- Se diseñó un cuestionario inicial a fin de obtener los datos e información del panel de expertos. Dicho cuestionario incorporaba la lista mencionada en el punto anterior.
- El cuestionario inicial se sometió posteriormente a la validación de un experto que emitió su juicio mediante el informe correspondiente, el cual dio origen a un cuestionario definitivo que tenía en cuenta las aportaciones del validador y que se aplicó al grupo de expertos en aerogeneradores.
- Se procedió a volcar los datos recogidos en los cuestionarios, se agruparon los datos y se analizaron, comprobando su grado de consistencia.
- Se procedió a priorizar los factores críticos (criterios y subcriterios) y a establecer los rankings de prioridad utilizando la metodología propuesta por Saaty (1997).

Para facilitar los instrumentos mencionados a los validadores y al panel de expertos se utilizó el correo electrónico. El diseño de los cuestionarios se realizó de forma que resultase sencilla su cumplimentación por medios informáticos y que, al mismo tiempo,

resultase fácilmente aplicable al desarrollo del Proceso Analítico Jerárquico. Los instrumentos utilizados se muestran en el Capítulo V y en los Anexos.

#### ***1.4.8 Análisis de datos***

El propósito fundamental del análisis de datos es ofrecer argumentos para que el investigador acepte o rechace los planteamientos teóricos planteados en la hipótesis. La aplicación de técnicas estadísticas para el tratamiento, análisis y presentación de datos de una investigación aportan además del rigor científico, estandarización en los procedimientos y la posibilidad de aceptar o rechazar los resultados de un análisis de acuerdo a los indicadores que se establecen en cada caso. Además, en el análisis de datos, tienen gran influencia las herramientas estadísticas utilizadas (Sánchez 1999).

Hemos de considerar que los resultados obtenidos mediante el análisis de los datos, por las características mencionadas, permiten su estudio futuro por investigadores que realicen trabajos similares, aportando utilidad científica a cualquier investigación (Díaz de Rada, 1999).

El análisis de datos y las herramientas utilizadas en este trabajo, se describen con detalle en el Capítulo VI y aquí sólo las introducimos brevemente en los párrafos siguientes:

Una vez recogidas las valoraciones efectuadas por el grupo de expertos, mediante el cuestionario diseñado al efecto, se procedió al volcado de los datos en una hoja de Microsoft Excel 2007 y dicha información fue condensada mediante la metodología de la Agregación de Juicios Individuales (Forman y Peniwati, 1998) utilizando como medida de centralización la media geométrica (Saaty 2008).

Una vez agregados los juicios y con objeto de priorizar los factores críticos, de acuerdo a lo establecido en el Proceso Analítico Jerárquico, se construye, para cada criterio, la correspondiente matriz recíproca para la comparación pareada de juicios. La construcción de la matriz se lleva a cabo utilizando el interface de entrada que proporciona la herramienta Expert Choice (versión 11). Con esta herramienta obtenemos el vector de prioridades para cada criterio y su representación gráfica.

A continuación, se procede a realizar el test de consistencia, obteniendo la razón de consistencia (CR), definida por Saaty (1997), que permite determinar los niveles de inconsistencia de los juicios emitidos y que se calcula como el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el mismo índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente (CIr). Para realizar el test de consistencia y hallar el autovalor principal de la matriz de comparación se utiliza la herramienta denominada Derive (versión 6).

A partir de los vectores de prioridad obtenidos para cada criterio, se obtienen los pesos relativos locales y globales de todos los factores críticos y se ordenan utilizando para ello Microsoft Excel 2007.

Dado que las alternativas de solución al problema de investigación, son evaluadas también por el grupo de expertos, se aplica a ellas el mismo proceso que acabamos de describir para los criterios, obteniendo un vector de alternativas priorizado.

Finalmente, de acuerdo a lo propuesto por Martín (2004) y Aragonés et al. (2000), se realiza un análisis de sensibilidad para estudiar la influencia de posibles variaciones en los pesos de los criterios sobre los resultados iniciales. La realización del análisis de sensibilidad robustece los resultados en un proceso de análisis jerárquico, debido a que incorpora al modelo la incertidumbre existente en la emisión de los juicios por parte del decisor al valorar las comparaciones pareadas (Aguaron et al., 1993). El análisis de sensibilidad se lleva a cabo con el programa Expert Choice (versión 11).

## **I.5 Conclusiones**

En el presente Capítulo, se ha establecido la metodología para llevar a cabo nuestra investigación, el objeto principal y los objetivos específicos que nos planteamos como meta. Se ha formulado la Idea Base de Investigación, se ha establecido la hipótesis, las preguntas complementarias de la investigación y se ha visto la necesidad de construir el marco teórico referencial que se basará en la revisión bibliográfica y documental, la cual será efectuada en el Capítulo II.

Esta revisión (Estado del Arte) estará relacionada con los problemas de decisión y los principales métodos de decisión multicriterio (MDM), haciendo un especial énfasis en el Proceso Analítico Jerárquico que será aplicado para resolver nuestro problema de

investigación que ya ha sido formulado, también se abordará la integración de los MDM con otras técnicas y la aplicación de dichos métodos a la resolución de problemas complejos, especialmente a la selección de

## **Capítulo II**

### **Estado del Arte de los Métodos de Decisión Multicriterio**



## II.1 Introducción

La evaluación y toma de decisiones es un proceso habitual en el ser humano. En muchas ocasiones nos encontramos ante diferentes alternativas entre las que debemos seleccionar la que, a nuestro juicio, nos parece la mejor o la que satisface el mayor número de las necesidades requeridas.

Se puede afirmar que un individuo o colectivo tiene un *problema de decisión*, cuando se plantea un conjunto bien definido de alternativas o cursos de acción posibles y un conflicto tal, que es necesario elegir una de las alternativas o bien establecer en ese conjunto las preferencias.

Entendemos que una *buena decisión* es aquella cuyas consecuencias han resultado favorables. Sin embargo, en la mayoría de las veces no se pueden comparar las consecuencias de una decisión adoptada con las que hubieran ocurrido si se hubiera adoptado otra solución diferente. Por este motivo resulta imprescindible considerar también el proceso mediante el cual se adoptó la decisión final para poder concluir o no que la solución fue la mejor posible, teniendo en cuenta la información disponible en el momento y los recursos que entonces se pudieron emplear.

Se entiende, por tanto, que una decisión ha sido buena si se ha tomado con el mejor procedimiento disponible. En cambio, no se puede calificar una decisión como buena si ha dado buenos resultados pero no se conoce cómo se procedió en su adopción. Según León (2001) una decisión buena tiene las siguientes características:

- Es una decisión en la que se ha trazado el objetivo que se quiere conseguir.
- Se ha reunido toda la información relevante.
- Se han tenido en cuenta las preferencias del decisor.

De acuerdo con lo anterior, antes de tomar cualquier decisión, los hechos, el conocimiento y la experiencia se deben reunir y evaluar en el contexto del problema. El proceso de toma de decisiones normalmente se apoya en la experiencia del decisor o en la semejanza a decisiones anteriormente tomadas que llevaron a buenos resultados, y raras veces se basa en un método sistemático o herramienta de apoyo a la resolución de tal disyuntiva. El Análisis de Decisiones Multicriterio (en inglés *Multicriteria Decision Analysis MCDA*) se presenta como una valiosa herramienta para ayudar al decisor durante este proceso de toma de decisiones. Los métodos

propuestos desde esta disciplina permiten abordar, de forma sistemática y ordenada, un problema en el que subyace una gran subjetividad. Ayudan a que todas las partes afectadas por el proceso de decisión participen en el mismo, suministran una gran cantidad de información, facilitan la búsqueda de consenso, permiten que el decisor aprenda sobre el propio problema de decisión y, en definitiva, ayudan a racionalizar un proceso complejo. Con estas técnicas no se pretende sustituir al decisor en el proceso de toma de decisiones, sino que éste, sea capaz de determinar sus preferencias mediante una metodología que le aportará información y transparencia.

El objeto de este Capítulo es revisar la literatura relacionada con los Métodos de Decisión Multicriterio (MDM). Con tal finalidad, en los apartados siguientes, consideramos su evolución histórica y exponemos los conceptos básicos del Análisis de Decisiones Multicriterio al tiempo que revisamos, de forma sistemática, los métodos y técnicas utilizando la clasificación propuesta por Cohon and Marks (1975).

## **II.2 Evolución de la Decisión Multicriterio**

La decisión multicriterio aparece en el campo de la Economía, ligada a los trabajos que los economistas, de finales del siglo XIX y principios del XX, realizan sobre el comportamiento de los consumidores a la hora de decidir sobre la compra de un producto. Estas investigaciones económicas son consideradas las precursoras del concepto de decisión multicriterio (Pomerol y Barba-Romero 2000).

La formalización adoptada en esta época consiste en postular que los agentes económicos buscan maximizar sus funciones de utilidad, las cuales expresan la elección del consumidor o del productor. Sin embargo, en 1896 Pareto mostró que en las situaciones en las que varios agentes económicos realizan elecciones diferentes y en conflicto, éstos no podían obtener su satisfacción máxima al mismo tiempo: siendo los recursos limitados, lo que uno gana lo hace en detrimento de otro. Estas situaciones se denominan *óptimos de Pareto*. Ante esta problemática surgieron las técnicas de decisión multicriterio, con el objetivo de resolver estas situaciones y hallar el modo de satisfacer, en la medida de lo posible, el mayor número de agentes económicos, intentando buscar un equilibrio entre los intereses contrapuestos de éstos.

Los principios en los que se basan los métodos de evaluación y decisión multicriterio derivan de la Teoría de Matrices, Teoría de Grafos, Teoría de las Organizaciones, Teoría de la Medida, Teoría de las Decisiones Colectivas, Investigación de Operaciones y de la Economía (Ávila 2000).

Las técnicas de toma de decisión multicriterio, como tal, han sido materia de investigación desde los años 50 y han tenido un importante desarrollo en las dos últimas décadas. Los primeros apuntes teóricos surgieron a finales de los 50 con los trabajos de Charnes, Cooper y Ferguson, que se consolidaron y publicaron en 1971 y 1972 con la realización de la I Conferencia Mundial sobre Toma de Decisiones Multicriterio, punto de arranque del planteamiento científico del problema.

En Estados Unidos, las discusiones sobre la toma de decisiones multicriterio se centraron en los años 70 sobre la posibilidad de agregar las preferencias del decisor por cada criterio en una única función "suma" de las anteriores. Esta función de utilidad global se toma como punto de partida del problema de programación matemática multiobjetivo. Este modelo tiene un fundamento teórico sólido que constituye la denominada Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT). En esta línea de investigación destacan los trabajos realizados por Keeney y Raiffa (1976).

Así pues, a partir del año 1975 la disciplina de la Toma de Decisiones Multicriterio va tomando cuerpo y durante la década de los 80 se van proponiendo diversos métodos, entre ellos, cabe destacar el *Método de las Jerarquías Analíticas* o *Proceso Analítico Jerárquico* (AHP), propuesto por Saaty en 1977 y 1980 y que ha sido aplicado para resolver numerosos problemas de decisión multicriterio. Este método presenta importantes diferencias respecto al método MAUT en la forma de obtener los juicios del decisor y en los principios básicos que permiten establecer las preferencias de éste. El mismo autor (Saaty 2004) ha presentado una evolución del método AHP denominado Proceso Analítico en Red (ANP), que permite modelizar problemas más complejos donde sea necesario contemplar las interrelaciones entre los distintos elementos que intervienen en el proceso de decisión.

En contraposición al modelo AHP, el matemático francés Bernard Roy, planteó en 1968 (Roy 1968) un nuevo enfoque. Este autor, inspirador de la denominada Escuela Francesa, se desmarca de la teoría de la decisión clásica y crea lo que denomina la "Ciencia de Ayuda a la Decisión Multicriterio" (*Multicriteria Decision Aid, MCDA*). Esta escuela pretende construir una ciencia que ayude al decisor a encontrar soluciones

satisfactorias. Sus métodos se basan en comparar entre sí las diferentes alternativas en base a cada criterio y después agregar esta información considerando la fuerza de las evidencias a favor y en contra de la selección de una alternativa respecto a otra. Los métodos más conocidos son los de la familia ELECTRE y la familia PROMETHE, ambos son considerados técnicas de sobreclasificación (en inglés *outranking methods*).

A principios de los 90 se pueden ya distinguir claramente tres enfoques distintos en las investigaciones dentro de la ciencia de la Decisión: la *vía del realismo*, la *vía axiomática* y la *vía del constructivismo*. La primera, defiende que existe una realidad cierta independientemente del grado de conocimiento que se tenga de ella y que por tanto la función del investigador es descubrirla: la segunda vía, trata de encontrar unos principios fundamentales, llamados axiomas, a partir de los cuales, y una vez aceptados, se pueden extraer unas consecuencias lógicas que conducirán a la verdad: finalmente la vía del constructivismo reduce el problema de la toma de decisiones multicriterio a construir una relación de preferencia global sobre el conjunto de alternativas, teniendo en cuenta las características individuales del decisor y que los datos del problema van cambiando a lo largo del proceso de decisión.

Desde la década de los 90, y en especial a finales de la misma, los métodos de toma de decisión multicriterio comenzaron a trascender del ámbito académico y se extendieron en el ámbito público y empresarial. Hoy en día estos métodos se emplean, individualmente o integrados con otras técnicas, con resultados satisfactorios para diversas finalidades: selección de tecnología, localización de empresas, selección de maquinaria o contratistas, predicciones financieras, definición de estrategias empresariales, valoración, etc. Pero todavía son muchas las aplicaciones que quedan por explorar. Este es uno de los motivos, junto a los contemplados en los objetivos, por el que pretendemos aplicarlas a un nuevo campo: la selección de aerogeneradores.

En la presente década, se ha estudiado la forma de solucionar el problema de la imprecisión, inexactitud o la falta de determinación del decisor. Este problema se ha abordado desde diferentes perspectivas, destacando la aplicación conjunta de la Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) y alguno de los métodos y técnicas mencionadas anteriormente, especialmente AHP y ANP, como se ve con mayor detalle en el apartado II.3.2.9

### II.3 Revisión de métodos y técnicas

Para llevar a cabo una revisión sistemática de los métodos y técnicas, vamos a utilizar como base la clasificación propuesta por Cohon & Marks (1975) que es la más comúnmente utilizada en el ámbito de OR (*Operations Research*) y que esquematizamos a continuación:

a) Técnicas Generadoras:

- Método de las ponderaciones
- Método de las restricciones (método  $\varepsilon$ -restricción o método trade-off)

b) Técnicas que se apoyan en la articulación *a priori* de las preferencias

- Programación Compromiso
- Programación por Metas
- Programación por Metas Lexicográficas
- Optimización Mini-Max
- Teoría de Utilidad Multiatributo
- Métodos de sobreclasificación :
  - ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*)
  - PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*)
- Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP)
- Proceso Analítico en Red (*Analytic Network Process* - ANP)

c) Técnicas que se apoyan en la articulación progresiva de preferencias:

- Método STEM
- Método Multiobjetivo Secuencial (*Sequential Multiobjective Problem Solving Method*, SEMOPS)
- Método GPSTEM

En la clasificación propuesta por Cohon & Marks (1975) no se incluía el método ANP, ya que su desarrollo es posterior (Saaty, 1996), hemos creído necesario incorporarlo por derivar de AHP y por ser, junto con éste, los métodos más aplicados en la

actualidad para problemas de selección. En los siguientes subapartados desarrollamos cada una de las técnicas y métodos mencionados en el esquema anterior.

### **II.3.1 Técnicas Generadoras**

Este tipo de técnicas consideran la articulación *a posteriori* de las preferencias. Por consiguiente, no requieren información a priori sobre las preferencias del centro decisor. Dentro de ellas consideraremos los métodos siguientes:

#### **II.3.1.1 Método de las ponderaciones**

Este método fue introducido por Zadeh (1963), quien establece que si en un problema multiobjetivo, a cada objetivo se le asocia un peso no negativo y después se suman todos los objetivos, la optimización de dicha función agregada y ponderada, genera un punto extremo eficiente para cada conjunto de pesos. Con  $q$  objetivos a maximizar, la aplicación del método de las ponderaciones con da lugar al siguiente programa matemático de tipo paramétrico,

$$\text{Maximizar } W_1f_1(x) + W_2f_2(x) + \dots + W_qf_q(x)$$

$$\text{Sujeto a: } X \in F \quad W \geq 0$$

Para cada vector de pesos  $W$  se obtiene un punto extremo eficiente. Variando paraméricamente los pesos se puede generar, o al menos aproximar, el conjunto eficiente. El método de las ponderaciones garantiza soluciones eficientes si todos los pesos son mayores que cero. Si uno de los pesos es cero y existen óptimos alternativos, la solución generada por el método de las ponderaciones puede no ser eficiente (Cohon, 1978). Esta situación no es normal en la práctica.

El método de las ponderaciones no genera puntos interiores, sólo puntos extremos eficientes. Este método establece que un punto eficiente es un punto de tangencia a la poligonal definida por el conjunto eficiente con la familia de hiperplanos ( $n$  rectas en el caso biobjetivo) de la forma:

$$\sum_{i=1}^q W_i \cdot f_i = \lambda$$

Como ya se ha comentado el método de las ponderaciones (igual sucede con los demás métodos multiobjetivo) no introduce en el análisis las preferencias del centro decisor. Los pesos  $W$  elegidos no guardan ninguna relación con las preferencias del centro decisor. Dichos pesos juegan el papel de parámetros que se hacen variar arbitrariamente para generar los puntos extremos eficientes del problema que estemos considerando.

La probabilidad de perder puntos eficientes en este método, y en el método de las restricciones que abordaremos en el siguiente subapartado, disminuye reduciendo la escala de los pesos en el método de las ponderaciones, o aumentando el número de conjuntos de valores asignados a los términos independientes en el método de las restricciones. Por tanto, las técnicas generadoras que revisamos, únicamente garantizan aproximaciones del conjunto eficiente.

### *II.3.1.2 Método de las restricciones (método $\epsilon$ -restriccion o método trade-off)*

Marglin (1967) expone que si se optimiza uno de los objetivos en un problema multiobjetivo, considerando a los demás objetivos como parte de las restricciones, se genera, un punto eficiente para cada conjunto de valores asignados al vector de términos independientes. Si tenemos  $q$  objetivos a maximizar, el método de las restricciones da lugar al siguiente problema:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } f_k(x) \\ \text{sujeto a:} & \\ & X \in F \\ & F_i(x) \geq L_j \quad j = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, q \end{aligned}$$

donde  $F$  es el conjunto de soluciones posibles. Por medio de variaciones paramétricas de los términos independientes  $L_j$  iremos generando el conjunto eficiente.

El método de las restricciones garantiza la generación de soluciones eficientes cuando las restricciones paramétricas son activas en el óptimo (cuando variable de holgura se

hace cero). Por tanto, la restricción se satisface como igualdad. Si en el óptimo alguna de las restricciones paramétricas no activa y además existen óptimos alternativos, entonces la solución generada por el método de las restricciones podría no ser eficiente (Cohon 1978). Pero este caso no es habitual en la realidad, haciendo que el método de las restricciones siga siendo interesante para la obtención de puntos eficientes (extremos o interiores).

Este método ha sido aplicado en la solución de problemas de decisión, entre otros, por Seo y Sakawa (1979); Goicoechea et al. (1982); Chankong and Haimes (1983); Szidarovszky et al. (1986); Harboe (1992); Lee and Wen (1996);

### ***II.3.2 Técnicas que se apoyan en la articulación a priori de las preferencias***

Son un grupo de métodos denominados *no interactivos* e incluyen aquellas aproximaciones que asumen o bien unos ciertos valores de logro o bien un pre-orden de los objetivos dados por el centro decisor antes de la búsqueda de soluciones. En este grupo de técnicas y métodos se encontrarían, entre otras, las que se describen detalladamente en los subapartados numerados desde el II.3.2.1 hasta el II.3.2.9.

#### ***II.3.2.1 Programación Compromiso***

La programación compromiso fue desarrollada por Yu (1973) y Zeleny (1974). Utiliza el concepto de *punto ideal* como referencia para el centro decisor, entendiéndose como *punto ideal* aquel donde cada objetivo alcanza su valor óptimo, por tanto el decisor buscará un punto eficiente lo más próximo posible a este punto.

Lo que pretende esta teoría es reducir el tamaño del conjunto eficiente, buscando los subconjuntos del mismo más próximos al punto ideal. A estos subconjuntos se les denomina *conjuntos compromiso* y representan políticas equilibradas entre objetivos en conflicto, sin subordinar un objetivo a otro. Con el fin de evaluar la proximidad a este punto Romero (1993) propone, a la hora de explicar este método, definir en primer *lagar* el concepto de distancia. Ésta no va a limitarse a un valor geométrico sino que va a ser una medida de las preferencias del decisor.

La distancia  $d$  entre dos puntos nos sugiere siempre el teorema de Pitágoras. Es la

distancia euclidiana o distancia más corta entre dos puntos y puede aplicarse a espacio n-dimensional. Aunque esta definición es la más conocida, por su uso habitual en cuestiones de geometría, no es la única. Depende del tipo de problema planteado. El concepto de distancia se ha ampliado a la idea de familia de métricas L, o medidas de distancia que conduce a la siguiente generalización de las distancias euclidianas:

$$L_p = \left[ \sum_{j=1}^n |X_j^1 - X_j^2|^p \right]^{1/p}$$

Estando definidos los dos puntos como:

$$X^1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$$

$$X^2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$$

En esta expresión obtendremos, para cada valor de  $p$  (denominado métrica), una función que defina un concepto de distancia distinto. La distancia tradicional o euclidiana estará definida para  $p = 2$ . Si consideramos el valor de  $p$  mayor o igual a 1 y menor o igual a 2, la distancia  $L_1$  será la mayor y la distancia  $L_2$  la más corta. Cuando la métrica toma valores mayores de 2, las distancias definidas no poseen significado geométrico.

Para dos puntos  $x(x_1, x_2)$  e  $y(y_1, y_2)$ , la expresión  $L_p = \text{Max} [|x_1 - y_1|, |x_2 - y_2|]$  (Max significa calcular la mayor diferencia en valor absoluto entre las dos cantidades del corchete) da un mayor peso a la desviación mayor a medida que la métrica  $p$  aumenta. Cuando el valor de  $p$  es igual a  $\infty$  la distancia  $L_\infty$ , llamada distancia de "Chebysev", se define únicamente por la desviación mayor entre las coordenadas de un punto (Podemos afirmar que la distancia  $L_1$  es la más larga mientras que  $L_\infty$  es la distancia más corta).

Con las definiciones dadas en los párrafos anteriores sobre la distancia, se puede concluir que una forma de medir las preferencias de los centros decisores es basándose en las distancias.

### II.3.2.2 Programación por Metas

El origen de la metodología de la *Programación por Metas* se debe a Charnes, Cooper y Ferguson (1955), que la introducen para dar respuesta al hecho de que frecuentemente en las decisiones empresariales no se maximiza ningún valor explícito o función de utilidad, en su lugar los empresarios seleccionan ciertas variables que representan el estado de la empresa y definen unos *niveles de aspiración* para dichas variables. Alcanzar estos “niveles de aspiración” será el objetivo de la empresa durante el periodo planificado (Cyter y DeGroot, 1987).

La Programación por Metas trata de hallar las soluciones cercanas a los niveles de aspiración. Esta formulación matemática es capaz de representar a un gran número de problemas de decisión. Además, bajo ciertas condiciones, la Programación por Metas es compatible con la Teoría del Valor, por lo tanto parece apropiada para resolver tales problemas de decisión con niveles de aspiración. Veamos en que consiste la técnica de Programación por metas.

Dado un problema general de programación multiobjetivo:

$$\text{Opt } (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)) \quad \text{siendo } x \in X$$

donde algunos de los objetivos serán de máximo y otros de mínimo, el decisor actúa de la siguiente forma:

Primero asignará a cada uno de los objetivos un valor  $u_i$ , que va a representar su nivel de aspiración, es decir, lo que desea alcanzar como mínimo o bien no desea superar, e incluso, en algunos casos, desea alcanzar exactamente la igualdad, para el correspondiente objetivo.

Después, al conjugar el objetivo y el nivel de aspiración se obtiene lo que denominamos meta, que expresamos de la siguiente forma:

- Si estamos maximizando  $f_i(x)$  al imponer un nivel  $u_i$ , se deseará que:  $f_i(x) \geq u_i$ .
- Si minimizamos, se deseará que  $f_i(x) \leq u_i$
- El caso de igualdad,  $f_i(x) = u_i$ , se puede contemplar tanto si maximizamos como si minimizamos.

Posteriormente al establecimiento de las metas, se asignan niveles de prioridad entre los objetivos, es decir, se les ordena atendiendo a las prioridades que manifieste el decisor.

Esta asignación puede ser uno a uno, es decir, en cada nivel un solo objetivo, o pueden aparecer varios compartiendo un mismo nivel. Este caso implica una ponderación entre los objetivos que comparten el nivel. El número de niveles de prioridades será por tanto,  $s \leq p$ .

Así pues, la resolución se llevará a cabo atendiendo a las metas impuestas y a los niveles de prioridad establecidos, de forma que se preferirá una solución que mejore al primero, una vez conseguida, se pasa al segundo y así sucesivamente. En este sentido, la ordenación que se utiliza, bajo el enfoque de programación por metas, es la lexicográfica que tratamos en el apartado siguiente.

La programación por metas (*goal programming*) pertenece a un conjunto de herramientas para resolver problemas multicriterio que, aunque tienen una base teórica menos cimentada que las anteriores, su operatividad es mucho mayor, aunque en la literatura se relatan ciertas dificultades de aplicación, puestas de manifiesto por Zeleny (1973). Podría pensarse que las dificultades se deben a un mal planteamiento teórico de la programación por metas pero, habitualmente, no son más que utilidades incorrectas del método.

Esto llevó a Romero (1991) a definir el término *temas críticos en programación por metas*, como aquellas anomalías aparentemente causadas por debilidades lógicas de la programación por metas, pero que en realidad se deben a un uso inadecuado del enfoque. Además este autor afirma que con un entendimiento y uso adecuado de este enfoque pueden obtenerse soluciones satisfactorias a los problemas multicriterio. Además, expone que "la programación por metas se aleja de una filosofía de optimización entroncando con una filosofía satisfaciente en la línea que propone Simon (1957)".

Según Simon, las actuales organizaciones, no utilizan toda la información necesaria para la toma de decisiones dada la complejidad que suponen el status actual multiobjetivo y multicriterio junto a la falta de recursos disponibles, la interacción entre los intereses de los decisores y la sociedad, etc. No se puede lograr una optimización total de los objetivos cuando ni siquiera se pueden reflejar en una función de utilidad.

Los decisores quieren que un grupo de metas alcance niveles próximos a los que se fijan como objetivo.

### II.3.2.3 Programación por Metas Lexicográficas

El centro decisor asocia prioridades excluyentes (*pre-emptive priorities*) a las diferentes metas. Se da preferencia absoluta a la consecución de las metas situadas en una cierta prioridad  $Q_i$  frente a las metas situadas en una prioridad  $Q_j$  más baja. Por tanto, en primer lugar los atributos se aproximarán lo más posible a estas metas, y después de esta operación se plantearán las metas que han quedado en segundo lugar. Como explica Romero (1993), "las preferencias se ordenan igual que las palabras en un léxico o diccionario, de ahí la denominación de programación por metas lexicográficas (*lexicographic goal programming*)".

En esta programación la función objetivo es remplazada por un vector, llamado función de logro (*achievement function*), en el cual las componentes representan las variables de desviación que hay que minimizar, para conseguir la máxima realización posible de las metas situadas en la correspondiente prioridad. En general, la función de logro se representará como:

$$\text{Lex min } a = [h_1(n, p), h_2(n, p), \dots, h_k(n, p)] \quad (v_1)$$

o de otra manera más abreviada:

$$\text{Lex min } a = [a_1, a_2, \dots, a_k]$$

Siendo  $a_k = h_k(n, p)$  una función de las variables de desviación no deseadas.

La minimización lexicográfica del vector  $(v_1)$  implica la minimización ordenada de sus componentes. Primero se calcula el valor más pequeño de la componente  $a_1$  después el de la componente  $a_2$  compatible con el valor hallado para  $a_1$ , y si sucesivamente.

Este método puede verse mejorado si se realiza un análisis de sensibilidad anterior a la ordenación de las prioridades

Existe un método gráfico descrito por Lee (1972) e Ignizio (1976) para resolver programas lexicográficos con dos variables de decisión. Es una adaptación del utilizado para la programación lineal. En nuestro caso, no podremos aplicarlo ya que el número de variables con las que trabajamos es superior a dos.

#### *II.3.2.4 Optimización Mini-Max*

Flavell (1976) enunció este método de optimización estableciendo la importancia que, en ciertos casos, supone la minimización de la máxima desviación ente todas las desviaciones posibles.

Se define  $d$  como la máxima desviación siendo  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  los coeficientes normalizadores y a su vez los indicadores de las preferencias relativas. La expresión matemática que representa a este método es la siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{Min } d \\ \text{Sujeto a:} & \\ & \alpha_i n_i + \beta_i p_i \leq d \\ & f_i(x) + n_i p_i = t_i \\ & X \in F \end{aligned}$$

Este modelo puede resolverse por aplicación directa del Simplex.

### II.3.2.5 Teoría de Utilidad Multiatributo

La teoría de la utilidad multiatributo (MAUT, de Multi-Attribute Utility Theory) fue introducida por Keeny y Raiffa (1976), a partir de la teoría de utilidad unidimensional de Von Neumann y Morgenstern (1944), busca expresar las preferencias del decisor sobre un conjunto de atributos o criterios en términos de la utilidad que le reporta, dentro de un contexto de la teoría de la decisión en condiciones de incertidumbre. Esta teoría tiene como eje el principio de racionalidad y se basa en los siguientes principios fundamentales:

A1. Todo decisor intenta inconscientemente (o implícitamente) maximizar una función que agrega todos los puntos de vista relevantes del problema. Esto es, interrogado el decisor acerca de sus preferencias, sus respuestas serán coherentes con una cierta función que no es conocida a priori. El papel del analista es el de estimar esta función mediante una adecuada serie de preguntas formuladas al decisor.

A2. Por otra parte, todo par de acciones  $a$  y  $b$  son susceptibles de ser comparadas, y existe un ordenamiento de preferencia bien definido sobre el conjunto de las acciones, de modo que para cualquier par de alternativas se tiene que:

o bien  $a > b$ , el resultado  $a$  es preferido al resultado  $b$ ,

o bien  $a \sim b$ , el decisor se encuentra en situación de indiferencia entre  $a$  y  $b$ ,

o bien  $b > a$ , el resultado  $b$  es preferido al resultado  $a$ .

A3. Se asume que el orden de preferencia es transitivo, esto es, si se prefiere  $a$  a  $b$  y  $b$  a  $c$ , entonces se debe preferir  $a$  a  $c$ .

Estos dos últimos axiomas garantizan la preservación de consistencia al comparar resultados. El propósito del método es asociar valores numéricos a los resultados de la comparación, de modo tal que (1) estos valores numéricos son ordenados consistentemente con las preferencias, y (2) se pueda determinar tales valores mediante algún tipo de procedimiento, para el cual se recurre a axiomas adicionales.

La técnica se basa aquí en dos pasos: primero la medición de la utilidad parcial de una alternativa con referencia a cada uno de los criterios, y luego proceder a la agregación de estas utilidades parciales para obtener la utilidad global de la acción bajo análisis.

En definitiva, las fases que se distinguen en la construcción de una función de utilidad son las siguientes:

1. Identificación de la forma funcional apropiada
2. Construcción de las funciones de utilidad unidimensionales
3. Determinación de los parámetros de la función de utilidad multiatributo
4. Comprobación de la consistencia de la función de utilidad construida

Tanto para la determinación de la forma de descomposición, como para el cálculo de las funciones de utilidad unidimensionales y los factores de escala, se utilizan las técnicas de loterías o prospectos.

Este modelo se basa en los supuestos de que:

- Los diferentes atributos son independientes.
- El beneficio o valor general que resulta de la presencia de distintos atributos se obtiene de forma aditiva

A pesar de que el cumplimiento de estos supuestos no siempre se puede garantizar, la repercusión que tiene la violación de los mismos (robustez del modelo) es débil. Es posible el planteo de otros modelos de agregación de tipo multiplicativo, pero estos son más complejos y menos utilizados.

El modelo de agregación de las utilidades parciales en una utilidad total puede tomar dos formas, (1) de tipo aditiva o (2) de tipo multiplicativa.

En (1) es posible agregar las utilidades parciales sumándolas las unas con las otras (luego de haberlas multiplicado por una ponderación, o luego de haberlas modificadas mediante una transformación afín, o ambas a la vez). En el llamado modelo aditivo simple la utilidad global se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$U(x) = p_1 u_1(x_{i1}) + p_2 u_2(x_{i2}) + \dots + p_m u_m(x_{im})$$

dónde  $p_j$  son los pesos o ponderaciones.

$u_j$  son las utilidades subjetivas parciales

$x_{ij}$  son las acciones bajo análisis

La expresión multiplicativa adopta la siguiente forma:

$$U(x) = [a_1 + b_1 u_1(x_{i1})] \times [a_2 + b_2 u_2(x_{i2})] \times \dots \times [a_m + b_m u_m(x_{im})]$$

dónde  $a_j$  y  $b_j$  son también pesos o ponderaciones.

#### II.3.2.5 .1 Método de la suma ponderada

El método de la suma ponderada asume que la función de valor buscada se puede descomponer y asimilar a un modelo aditivo, es decir, presentarse de la forma:

$$V = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2 + \dots + \lambda_n \cdot v_n$$

Los datos de partida del método son los expresados en la *matriz de valoración* ( $z_{ij}$ ) de forma que se evalúa, para cada alternativa, el grado de cumplimiento de cada uno de los criterios. Se supone que los juicios que evalúan cada alternativa según cada criterio admiten representaciones numéricas sobre una escala de valores reales.

Una vez obtenida la matriz de valoración, se normaliza para comparar, sin sesgos, los valores de los criterios, ya que pueden no estar todos ellos expresados utilizando la misma escala.

Para normalizar la matriz de valoración existen varios métodos que se muestran en la tabla siguiente:

	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Procedimiento 3	Procedimiento 4
Definición	$r_{ij} = \frac{Z_{ij}}{Z_{ij}^{\max}}$	$r_{ij} = \frac{Z_{ij} - Z_{ij}^{\min}}{Z_{ij}^{\max} - Z_{ij}^{\min}}$	$r_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^m Z_{ij}}$	$r_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m Z_{ij}^2}}$
Rango	$0 < r_{ij} \leq 1$	$0 \leq r_{ij} \leq 1$	$0 < r_{ij} < 1$	$0 < r_{ij} < 1$
Conserva la proporcionalidad	si	no	si	si
Interpretación	% del máximo	% del rango	% total	i-ésima componente del vector unitario

Tabla II -1: Procedimientos de normalización

Donde  $z_{ij}^{\max} = \max\{z_{ij}\} |_{j=\text{cte}}$  y  $z_{ij}^{\min} = \min\{z_{ij}\} |_{j=\text{cte}}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ )

Otra forma de normalizar los valores de la matriz es asignar, para cada criterio, una función. Esta tarea es, sin embargo, difícil de lograr puesto que es necesario disponer de información muy precisa sobre las preferencias del decisor, algo que no siempre es posible.

Una vez obtenidos los valores normalizados  $r_{ij}$  de la matriz de valoración para cada alternativa  $A_i$  y conocidos los pesos  $w_j$ , asociados a cada uno de los criterios que se consideran, el método de la suma ponderada construye la función de valor de la siguiente forma:

$$v(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (W_j \cdot r_{ij})}{\sum_{j=1}^n (W_j)} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

donde  $v(A_i)$  es un valor promedio ponderado para cada alternativa  $A_i$ , denominado *suma ponderada*, que refleja el valor que cada alternativa tiene para el decisor. Así pues, por ordenación de las alternativas en base a los valores  $v(A_1)$ ,  $v(A_2)$ , ...,  $v(A_m)$  es posible resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa de entre las posibles, que será la de suma ponderada mayor.

### II.3.2.6 Métodos de sobreclasificación

Los métodos de sobreclasificación surgen como consecuencia de las dificultades para aplicar la construcción de la función de valor, ya que esta teoría plantea unas condiciones restrictivas y requiere una información muy precisa sobre las preferencias del decisor.

El concepto de relación de sobreclasificación fue propuesto por B. Roy en los años 70 y, posteriormente, se ha desarrollado formando la denominada Escuela Francesa, originaria del enfoque llamado Ayuda a la Decisión Multicriterio (*Multicriteria Decision Aid, MCDA*).

Bajo este enfoque se realizan las siguientes suposiciones (Roy, 1991):

- a. Se considera un conjunto  $X$  de *acciones potenciales*. Tales acciones no son necesariamente exclusivas, es decir, dos o más acciones se pueden llevar a la práctica conjuntamente.
- b. Se define una familia consistente  $Z$  de *criterios*  $z_j$ . Esto implica que las preferencias de los actores implicados en el proceso de decisión se forman, argumentan y transforman por referencia a puntos de vista adecuadamente reflejados por criterios de  $Z$ . Se denomina *vector de resultados* a:

$$z(x) = (z_1(x), \dots, z_n(x)), \text{ donde } z_j(x) \text{ es el } j\text{-ésimo resultado de } x.$$

- c. Se considera, en un nivel comprensivo, la comparación entre dos acciones sobre las bases de sus vectores resultado. Este modelo de preferencias comprensivo no puede pretender ser una descripción de las preferencias perfectamente establecidas en la mente de un decisor, sino que dicho modelo debería permitir indecisiones entre los tres casos siguientes: la primera acción es indiferente a la segunda ( $x_1Ix_2$ ), la primera acción es estrictamente preferida a la segunda ( $x_1Px_2$ ) y la segunda acción es estrictamente preferida a la primera ( $x_2Px_1$ ). De acuerdo con estas indecisiones se puede hablar también de preferencia débil ( $x_1Qx_2$  o  $x_2Qx_1$ ) y de incomparabilidad ( $x_1Rx_2$ ).

Se puede definir el concepto de *relación de sobreclasificación* como una relación binaria  $S$  definida sobre  $X$  tal que  $x_1Sx_2$  ( $x_1, x_2 \in X$ ) si, dado el conocimiento sobre las

preferencias del decisor y dada la calidad de las evaluaciones de las acciones y la naturaleza del problema, hay suficientes argumentos para decidir que  $x_1$  es *al menos tan buena como*  $x_2$  mientras no haya razones esenciales para refutar tal afirmación (Pirlot and Vincke 1992), (Roy 1991). Esta afirmación sirve tanto para el nivel de preferencias restringidas al criterio  $z_j$ , como para el nivel comprensivo de toda la familia de criterios  $Z$ .

Los distintos métodos de sobreclasificación difieren entre sí según la formalización que den a la definición de relación de sobreclasificación y todos ellos establecen dos pasos:

1. Construcción de la relación de sobreclasificación.
2. Explotación de esta relación para elegir el planteamiento del problema.

El primer paso es específico de cada método en particular. El segundo paso depende de cómo se plantee el problema. Se pueden considerar tres formas básicas de plantearlo, según las necesidades que haya que satisfacer. Estos planteamientos, denominados respectivamente  $P_\alpha$ ,  $P_\beta$ ,  $P_\gamma$  son (Roy 1991):

- $P_\alpha$ : Aislar el subconjunto más pequeño de acciones  $X_0 \subset X$  sujeto a justificar la eliminación de todas las acciones pertenecientes a  $X \setminus X_0$ . Se precisa encontrar un núcleo de acciones que satisfagan las preferencias del decisor. Éste es un *problema de elección*.
- $P_\beta$ : Asignar cada acción a una categoría predeterminada de acuerdo con lo que el decisor necesite hacer después. Éste es un *problema de clasificación*.
- $P_\gamma$ : Construir un preorden parcial o completo tan rico como sea posible sobre un subconjunto  $X_0$  de aquellas acciones de  $X$  que parecen más satisfactorias. Éste es un *problema de ordenación*.

Dentro de los métodos de sobreclasificación cabe distinguir los métodos de la familia ELECTRE y los de la familia PROMETHEE que se describen en los apartados siguientes.

### II.3.2.6.1 ELECTRE

Los métodos ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) son del tipo multiatributo que manejan información cardinal. Se desarrollaron inicialmente desde el LAMSADE de la Universidad Paris-Dauphine (Paris IX) a partir del año 1968, en el que Bernard Roy y sus colaboradores desarrollaron el primer método ELECTRE. Desde entonces se ha extendido su utilización, especialmente por Europa, como lo demuestra la abundante literatura existente sobre estos métodos y sus aplicaciones (Roy, 1985).

El conjunto de métodos ELECTRE son considerados también métodos de sobreclasificación. En el proceso de agregación de todos los criterios para construir la relación de sobreclasificación global, ELECTRE tiene en cuenta el hecho de que no todos los criterios tienen la misma importancia. Esta importancia se tiene en cuenta por medio de su *coeficiente de importancia*, que es intrínseco a cada criterio y no depende de los valores de la matriz de valoración, y de su *umbral de veto*, que refleja la capacidad dada del criterio para rechazar la relación de sobreclasificación sin ayuda de ningún otro criterio.

La familia ELECTRE está integrada por los siguientes elementos:

- ELECTRE I: propuesto por Roy en 1968, es históricamente el primero y más sencillo de esta familia de métodos. La metodología comprende una serie de pasos: asignar un peso a cada criterio que se incrementa con la importancia del mismo, asociar un índice de concordancia y de discordancia a cada par ordenado de alternativas, definir unos umbrales de concordancia y discordancia y finalmente encontrar un subconjunto de alternativas formado por aquellas tales que cualquier otra alternativa que no pertenezca a dicho subconjunto es sobreclasificada por al menos una alternativa del subconjunto, y las que pertenecen a él son incomparables entre sí (Roy, 1968).
- ELECTRE II: creado por Roy y Bertier en 1971. Trata de ordenar las alternativas de mejor a peor. La relación de sobreclasificación se construye de forma similar a como se hace en ELECTRE I pero con las siguientes variaciones: se determinan dos umbrales de concordancia y se construye una relación de sobreclasificación fuerte ( $S_F$ ) y una relación de sobreclasificación

débil ( $S_f$ ). (Roy y Bertier, 1.973).

- ELECTRE III: desarrollado por Roy en 1978. En él, la relación de sobreclasificación asocia a cada par ordenado de alternativas ( $x_1, x_2$ ) un número real que toma valores entre 0 y 1. Este número se denomina *índice de credibilidad* y evalúa la fuerza de los argumentos a favor de validar la afirmación  $x_1 S x_2$  (Roy, 1978).
- ELECTRE IV: propuesto por Hugonnard y Roy en 1982, tiene la característica de que clasifica las alternativas sin emplear el concepto de importancia o peso de los criterios. Se construyen dos relaciones, una fuerte ( $S_F$ ) y otra débil ( $S_f$ ), en base a consideraciones de sentido común compatibles con la falta de información sobre la importancia relativa de los criterios. Una vez construida la relación de sobreclasificación, se obtiene un preorden completo ascendente y otro descendente de la misma forma que en ELECTRE III pero más simple, debido a que tiene solamente dos niveles de sobreclasificación. (Roy and Hugonnard, 1.982).
- ELECTRE IS: este método, propuesto por Roy y Skalka en 1984, sólo considera válida la afirmación  $x_1 S x_2$ , cuando se cumplen dos condiciones, ambas en función de un parámetro denominado nivel *de concordancia*. (Roy y Skalka, 1.985).

Según Roy (1991) y Maystre, Pictet et Simos (1994): la elección entre un método ELECTRE u otro depende del tipo de problema que se plantee:

- ELECTRE I e IS se emplean para resolver el problema de encontrar un subconjunto de acciones consideradas aceptables. ELECTRE IS está más desarrollado que ELECTRE I, y este último sólo se debería emplear cuando se requiere un método simple.
- ELECTRE II, III y IV son válidos, cada uno para un nivel de dificultad diferente, para resolver los problemas en los que se requiere construir un preorden parcial o completo de las alternativas. ELECTRE II se utiliza por su simplicidad. El método más moderno y sofisticado es ELECTRE III. El método ELECTRE IV sólo se utiliza cuando existen razones para rechazar la introducción de los coeficientes de importancia.

### II.3.2.6.2 PROMETHEE

El método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*) fue desarrollado inicialmente por J.P. Brans (1.984). A partir de entonces se ha aplicado a la resolución de problemas de localización de plantas industriales e instalaciones comerciales en un ambiente competitivo, evaluación financiera, etc. Uno de los objetivos esenciales del método es el de ser fácilmente comprensible para el decisor, siendo en realidad uno de los más intuitivos métodos de decisión multicriterio discretos.

PROMETHEE ayuda al decisor tanto en problemas de elección como en problemas de clasificación y se basa en tres etapas:

1. Enriquecimiento de la estructura de preferencia: Esta etapa es esencial. La noción de criterio generalizado, definido a partir de una función de preferencia, se introduce con el fin de tener en cuenta la amplitud de la diferencia existente entre las evaluaciones de dos alternativas según los distintos criterios. Esta noción es fácilmente comprensible para el decisor, debido a que todos los parámetros que se necesitan para definir de forma correcta los criterios tienen una interpretación física o económica.
2. Enriquecimiento de la relación de dominancia: Tiene en cuenta el conjunto de criterios propuestos. Para cada par de acciones, se establece un índice de preferencia global de una acción sobre la otra.
3. Ayuda a la decisión: el método PROMETHEE I permite obtener un ordenamiento parcial de las alternativas.

Los métodos PROMETHEE, al igual que todos los *outranking methods*, se basan en la construcción de una relación de sobreclasificación. Para ello, se asigna en primer lugar un peso a cada criterio que se incrementará según el grado de importancia de éste. Posteriormente, se asigna a cada par ordenado de alternativas  $(x_1, x_2)$  un grado de sobreclasificación. También se construye una función  $P(x_1, x_2)$ , que se denomina *criterio generalizado*, y que va asociada a la intensidad de preferencia de una

alternativa  $x_1$  sobre otra  $x_2$  en función de la diferencia entre la valoración obtenida por la alternativa  $x_1$  y la  $x_2$ , para cada criterio. Esta función toma valores comprendidos entre 0 (indiferencia) y 1 (preferencia estricta) según la preferencia débil o fuerte de una alternativa respecto a la otra. Determinar el criterio generalizado asociado a cada criterio es una de las tareas fundamentales del decisor, quien puede hacer su elección entre seis tipos diferentes que puede adoptar esta función (Brans y Mareschal 1990).

Existen distintas versiones del método: PROMETHEE III, IV, V, VI y Gaia (Brans y Mareschal 2002). Todas ellas utilizan el concepto de pseudocriterio y asocian a cada criterio original un criterio generalizado, que responde a uno de los seis tipos mencionados anteriormente. Las versiones más actuales, permiten plantear situaciones de decisión complejas, como es el caso de problemas con un componente estocástico (Mareschal 1986, D'Avignon y Vincke 1988 y Fernández 1991).

Para la aplicación del método, existe una herramienta informática denominada PROMCALC (PROMethee CALCulations), desarrollado Brans, J.P. y otros, que está disponible en el mercado desde 1990 en distintas versiones que la ido actualizando. (Brans y Mareschal 1994).

Aunque el método PROMETHEE está también sometido a subjetividades, especialmente en lo que se refiere a la definición de los parámetros de los pseudocriterios, análogamente a lo que ocurre en el ELECTRE I con sus umbrales de concordancia y discordancia, PROMETHEE se compara favorablemente con este último en cuanto a la robustez frente a las variaciones en dichos parámetros (Brans et al 1.986), estos umbrales intervienen en la fase preparatoria de definición de los criterios. Además, PROMETHEE posee una definición axiomática que permite caracterizarlo como un método de agregación que satisface condiciones de neutralidad (el preorden agregado no se ve influido por el número de alternativas), monotonía (el preorden social se comporta en el buen sentido cuando el número de sujetos que prefieren una alternativa a otra aumenta), y otras condiciones algo más complejas (Bouyssou y Perny 1990).

En las versiones más actuales de PROMETHEE existe la posibilidad de hacer un análisis de sensibilidad de los resultados mediante el análisis de intervalos de estabilidad de pesos y permite examinar la relevancia práctica de los criterios del problema, y eventualmente eliminarlos (Mareschal 1988 y Fernández 1991).

### II.3.2.7 AHP

El Proceso Analítico Jerárquico (en inglés *Analytic Hierarchy Process* – AHP), fue desarrollado en la década de los 70 por el matemático Thomas L. Saaty (Saaty 1977). Es un sistema flexible de metodología de análisis de decisión multicriterio discreta (número finito de alternativas u opciones de elección). Mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema de decisión, descomponerla y analizarla por partes (subproblemas), visualizar los efectos de cambios en los niveles, y unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión (Saaty, Rogers y Pell, 1988).

AHP está constituido por varias etapas. La formulación del problema de decisión en una estructura jerárquica es la primera y principal etapa. En esta etapa es en la que el decisor involucrado debe lograr desglosar el problema en sus componentes relevantes.

La jerarquía básica está conformada por: *meta* u objetivo general, *criterios* y *alternativas*. La jerarquía se construye de modo que los elementos de un mismo nivel sean del mismo orden de magnitud y puedan relacionarse con algunos o todos los elementos del siguiente nivel. En una jerarquía típica el nivel más alto corresponde al objetivo o meta. Los elementos que afectan a la decisión son representados en los niveles inmediatos, de forma que los criterios ocupan los niveles intermedios, y el nivel más bajo comprende a las opciones de decisión o alternativas. Este tipo de jerarquía ilustra de un modo claro y simple todos los factores afectados por la decisión y sus relaciones. La figura II.6.3-1 muestra un esquema del modelo jerárquico.

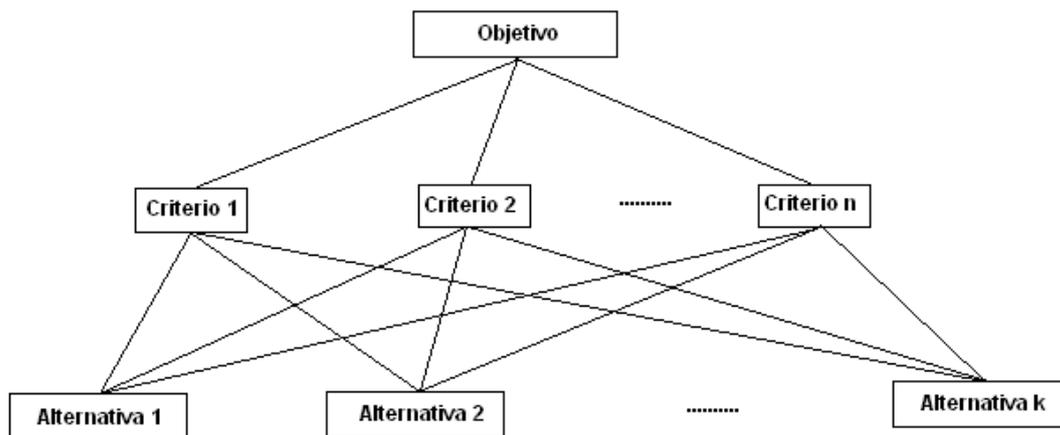


Figura II-1: Modelo jerárquico para la toma de decisiones con AHP

La jerarquía resultante debe ser completa, no redundante y minimal (sólo debe incluir aspectos relevantes). Su construcción es la parte más creativa de resolución del problema y requiere de un consenso entre todas las partes implicadas en el proceso de decisión. Normalmente se requiere invertir bastante tiempo para identificar el problema real y principal, lo cual puede darse después de una serie de discusiones en las que se han considerado muchas propuestas, y es necesario priorizarlas y decidir cuál se seleccionará para su análisis.

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la segunda etapa del proceso de AHP: la valoración de los elementos. El decisor debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos. Esta tarea consiste en una comparación de valores subjetivos *por parejas* (comparaciones binarias), es decir, el decisor tiene que emitir juicios de valor sobre la importancia relativa de los criterios y de las alternativas, de forma que quede reflejado la dominación relativa, en términos de importancia, preferencia o probabilidad, de un elemento frente a otro, respecto de un atributo, o bien, si estamos en el último nivel de la jerarquía, de una propiedad o cualidad común.

AHP permite realizar las comparaciones binarias basándose tanto en factores cuantitativos (aspectos tangibles) como cualitativos (aspectos intangibles), ya que presenta su propia escala de medida: la escala 1-9 propuesta por Saaty y recogida en la tabla II-2. El decisor puede expresar sus preferencias entre dos elementos verbalmente y representar estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos. De esta forma cuando dos elementos sean *igualmente preferidos* o

importantes el decisor asignará al par de elementos el valor 1, moderadamente preferido se representará por un 3, fuertemente preferido por 5 y extremadamente preferido por 9. Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedias.

La escala verbal utilizada en el AHP permite al decisor incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento en un camino intuitivo y natural. Esta escala está justificada teóricamente y su efectividad ha sido validada empíricamente aplicándola a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles para los que se ha comportado adecuadamente.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Levemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen levemente a un elemento frente al otro
5	Notablemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen notablemente a un elemento frente al otro
7	Fuertemente más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en la práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Cuando es necesario expresarlo.
Inversos de todos los valores anteriores	Si al comparar i con j se ha obtenido uno de los valores anteriores, al comparar j con i se le asigna el inverso	

Tabla II -2: Escala de valores de Saaty

El resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada *Matriz de comparaciones pareadas*, de forma que cada uno de sus componentes reflejen la intensidad de preferencia de un elemento frente a otro respecto del atributo considerado. Estas comparaciones pareadas se realizan para establecer las ponderaciones correspondientes a criterios y atributos, y evaluar el rendimiento de las alternativas respecto de los atributos. En general, en dichas comparaciones se utilizan los juicios de la escala de valores de Saaty (Saaty, 1980).

Lo anterior, podemos expresarlo, de forma simplificada, mediante la siguiente notación matemática: Si  $a_{ij}$  es el valor obtenido de la comparación del elemento  $C_i$  con respecto al  $C_j$ , suponiendo que el decisor es consistente en la emisión de juicios sobre cualquier par de elementos y sabiendo, además, que todos los elementos siempre tendrán una misma evaluación al compararse a sí mismos, se tiene que:  $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$  y  $a_{ii} = 1$ . Por lo tanto solamente se deben efectuar  $[\frac{1}{2} \cdot m \cdot (m - 1)]$  comparaciones para determinar el conjunto completo de juicios para los  $m$  elementos. Los datos correspondientes proporcionan una *matriz recíproca de comparaciones pareadas*  $\mathbf{A}_{(m \times m)}$ .

A continuación se debe estimar el conjunto de prioridades que refleje mejor los juicios volcados en la matriz  $\mathbf{A}$ . Debe notarse que la consistencia de la matriz  $\mathbf{A}$ , es decir  $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ , para todo  $i, j, k$ , no está garantizada. En consecuencia, se debe buscar un vector de  $m$  componentes tal que la matriz de ponderaciones  $\mathbf{W}_{(m \times m)} = (w_{ij} = w_i/w_j)$  (1) proporcione el mejor ajuste para los juicios registrados en la matriz  $\mathbf{A}$ . Se han propuesto diversas técnicas para conseguir este objetivo. Notemos que en (1) se ha realizado una asignación de ponderaciones  $w_i$  y  $w_j$  a los elementos  $i$  y  $j$  y se evalúa el peso relativo  $w_i/w_j$  para cada par de elementos

AHP utiliza la misma técnica de comparaciones pareadas para establecer la importancia relativa del rendimiento para cada par de alternativas sobre cada uno de los atributos. Una vez determinadas las ponderaciones y las calificaciones de rendimiento, y luego de realizar una posible normalización, las alternativas se evalúan mediante técnicas de agregación.

Para aplicar el método AHP no hace falta información cuantitativa sobre los resultados que alcanza cada alternativa según cada uno de los criterios considerados, sino tan solo los juicios de valor del decisor.

Una vez formadas las matrices de comparación, el proceso deriva hacia la tercera etapa, la fase de priorización y síntesis. El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento, entendida esta prioridad tal y como la define Saaty (Saaty, 1998): "Las prioridades son rangos numéricos medidos en una escala de razón. Una escala de razón es un conjunto de números positivos cuyas relaciones se mantienen igual si se multiplican todos los números por un número arbitrario positivo. El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia".

En un problema jerarquizado podemos definir distintos tipos de prioridades en función de su posición en los niveles que configuran la estructura jerárquica. Existen distintos procedimientos matemáticos para calcular el, ya mencionado anteriormente, *vector de pesos relativos* asociado a un nivel, vector que debe expresar la importancia relativa de los elementos considerados en ese nivel. El procedimiento propuesto por Saaty para su obtención es el método del autovector principal por la derecha. Las prioridades globales son las prioridades de cada nodo de la jerarquía respecto al nodo inicial (objetivo). El AHP las calcula utilizando el principio de composición jerárquica. Por último, la prioridad total de las alternativas comparadas se obtiene mediante la agregación de las prioridades globales (forma lineal multiaditiva). La prioridad total nos permitirá realizar la síntesis del problema, esto es, ordenar el conjunto de alternativas consideradas y seleccionar las más indicadas para conseguir el objetivo propuesto (Moreno-Jiménez, 2002).

Un aspecto que debemos cuidar es que el resultado debe ser consistente con las preferencias manifestadas por el decisor, ya que ésta es una cuestión que afecta directamente a la calidad de la decisión final. El AHP permite evaluar la consistencia del decisor a la hora de introducir los juicios de valor en la matriz de comparaciones pareadas mediante el indicador *Razón de Consistencia de Saaty* (Saaty, 1998). La última etapa de este proceso es el denominado análisis de sensibilidad.

Los fundamentos matemáticos mencionados anteriormente, son tratados en profundidad en el Marco teórico que se desarrolla en Capítulo II de la presente tesis, por lo que en este apartado, sólo hacemos una introducción del método con las correspondientes referencias bibliográficas que han sido revisadas a tal fin.

El resultado al que se llega es altamente dependiente de la jerarquía establecida por el decisor y por los juicios de valor que realiza sobre los diversos elementos del problema. Cambios en la jerarquía sobre estos juicios pueden conducir a cambios en los resultados.

En la figura siguiente, se presentan los pasos del modelo AHP para la resolución de problemas, de acuerdo a todo lo tratado en el presente apartado:

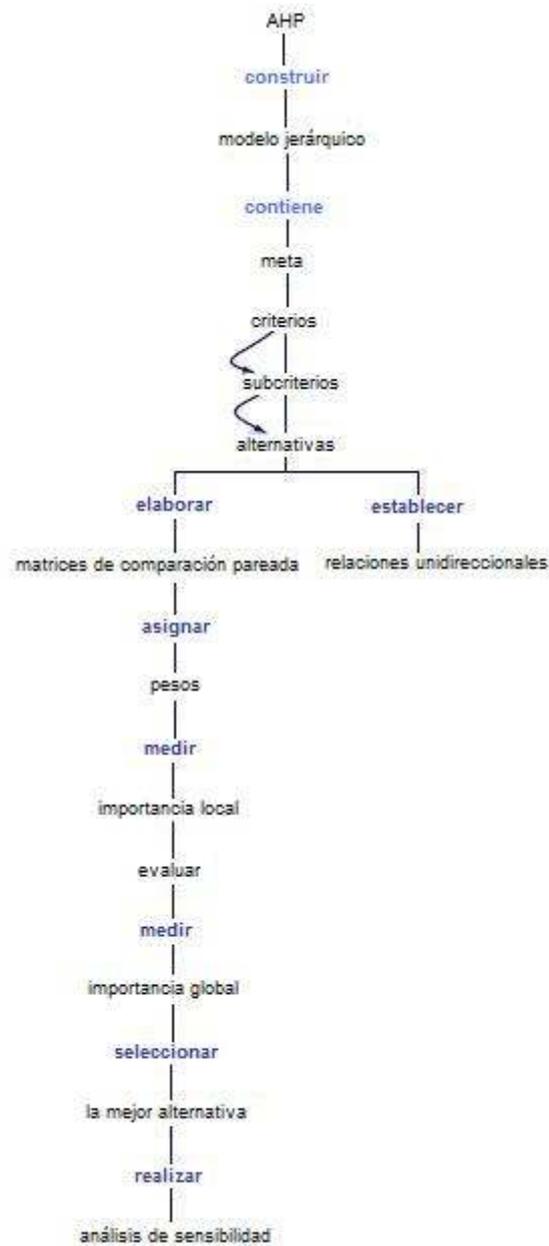


Figura II - 2: Esquema del AHP para resolución de problemas

En la tabla siguiente, se muestran algunas aplicaciones del Proceso Analítico Jerárquico que se han desarrollado en los últimos años y que tiene algún componente en común con el problema que aquí nos planteamos.

Área	Aplicaciones	País	Año	Autor
Energía	Selección de tecnologías nucleares	Corea	2010	Lee, D.J. and Hwang, J.
Energía	Selección de plantas de energía solar	España	2009	Aguarón, P. et al.
Informática	Selección de paquetes de software	India	2009	Jadhav, A.S. y Sonar, R.M.
Maquinaria	Selección de sistemas de limpieza para motores	España	2009	García, M.S. y Lamata, M.T.
Construcción	Selección de materiales aislantes	Irán	2009	Azizi et al.
Construcción	Selección de sistemas automáticos para edificios inteligentes	China	2008	Wong, J. and Li, H.
Medicina	Decisión sobre mejor tratamiento	Holanda	2008	van Til JA, Renzenbrink GJ, Dolan JG, Ijzerman MJ.
Energía	Competitividad en tecnología para obtener energía del hidrógeno	Corea	2008	Seong Kon, Gento Mogib and Jong Wook
Empresa	Selección de proveedores en cadena de suministros	Colombia	2008	González, J., Casorzo, C. y Alfaro, M
Tecnología	Selección de una tecnología de red inalámbrica	Venezuela	2007	Martín, J. y Moreno, A.
Maquinaria	Selección de maquinaria	China	2007	Chang C.W., Cheng-Ru W., Chin-Tsai L., Huang-Chu C.
Medioambiente	Emisiones de gases	Taiwán	2007	Tzeng, Hshiang y Feng
Ingeniería	Análisis estratégico - industria forestal	Finlandia	2007	K. Elfvengren, J. Korpela, M. Tuominen, P. Sierila
Tecnología	Selección de tecnología	México	2006	García, Noriega, et al.
Empresa	Selección de contratos	Italia	2006	Carmignani, Bertolini, Braglia y
Logística	Selección de proveedores	Colombia	2006	Osorio y Herrera
Informática	Selección de un sistema ERP	Venezuela	2006	Castro, Borges y Baquero
Tecnología	Selección de tecnología	Turquía	2005	Erdogmus, Kapanoglu y Koc
Empresa	Selección de un sistema ERP	Taiwán	2005	Wei, Chien y Wang
Ingeniería	Entrenamiento agentes inteligentes	Japón	2005	Katayama, Koshiishi y Narihisa

Tabla II – 3: Aplicaciones más recientes del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

La utilización de un software de apoyo (Expert Choice) permite estudiar, de forma rápida y sencilla, la sensibilidad de los resultados (decisión) a los diferentes cambios posibles, pudiendo analizarse el problema en escenarios distintos. Ambas herramientas informática, proporcionan el soporte de cálculo necesario a partir de la definición de la jerarquía y el establecimiento de prioridades por parte de los expertos (decisores) basándose en la escala de Saaty que se muestra en la Tabla II-2.

### II.3.2.8 ANP

ANP (siglas del inglés *Analytic Network Process*) fue desarrollado con el objetivo de extender las capacidades de AHP a casos en los que existe interdependencia y retroalimentación entre los elementos del sistema (Saaty, 1996).

El método ANP está compuesto por jerarquías de control, conglomerados (o *clusters*), nodos, interrelaciones entre nodos e interrelaciones entre conglomerados. El proceso de modelización puede descomponerse en cuatro etapas que se describirán seguidamente.

En primer lugar, se realizan las comparaciones pareadas y se valoran las ponderaciones relativas. La determinación de las ponderaciones relativas en ANP está basada en la realización de comparaciones pareadas al igual que en AHP. El elemento  $a_{ij}$  en la matriz de comparaciones pareadas  $\mathbf{A}$  representa la importancia (o ponderación o peso) relativa del elemento situado en la fila  $i$ -ésima respecto del componente situado en la columna  $j$ -ésima, es decir,  $a_{ij} = w_i / w_j$ .

Siguiendo la idea central de AHP, que ya hemos tratado en el apartado anterior, en lugar de realizar una asignación de ponderaciones  $w_i$  y  $w_j$  a los elementos  $i$  y  $j$ , se evalúa el peso relativo  $w_i / w_j$  para cada par de elementos. Una vez realizadas todas las comparaciones, el vector de prioridades  $\mathbf{w}$  se calcula por medio de la solución única del sistema:

$$\mathbf{Aw} = \lambda_{\max}\mathbf{w},$$

donde

$\lambda_{\max}$  es el autovalor principal de  $\mathbf{A}$

$\sum_i w_i = 1$ , la normalización (distributiva) que garantiza la unicidad.

Tanto AHP como ANP permiten valorar la inconsistencia en la emisión de juicios mediante el *índice de consistencia* (IC) que viene dado como:  $IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ .

Si la *razón de consistencia*,  $RC = IC/IC(A)$ , donde  $IC(A)$  es el índice de consistencia aleatorio (promedio) obtenido al simular juicios de **A** en la escala de Saaty (Tabla II-2), es menor que 0,1, la consistencia se considera aceptable (Saaty, 1980).

A continuación debe obtenerse la *supermatriz inicial*, colocando las ponderaciones dentro de una matriz que traduce las interrelaciones entre todos los elementos del sistema.

Posteriormente, debe generarse la *supermatriz ponderada*, transformando la supermatriz inicial en una matriz donde cada una de sus columnas sume uno (estocástica por columnas). Para ello, cada uno de los elementos incluidos en un bloque de la supermatriz se multiplica por la ponderación asociada al conglomerado. El autovector obtenido a partir de las comparaciones en el nivel conglomerado se emplea para ponderar los bloques asociados a los conglomerados.

Finalmente, se tienen que calcular los vectores y ponderaciones de prioridad globales. La supermatriz ponderada se eleva a potencias sucesivas (Saaty, 1996) con el fin de obtener los vectores de prioridad globales.

La utilización del software de apoyo denominado SuperDecision permite abordar de forma automatizada los cálculos mencionados incluido el correspondiente análisis de sensibilidad.

En la figura siguiente, se muestra el esquema del modelo ANP para la resolución de problemas, de acuerdo a todo lo tratado en el presente apartado:

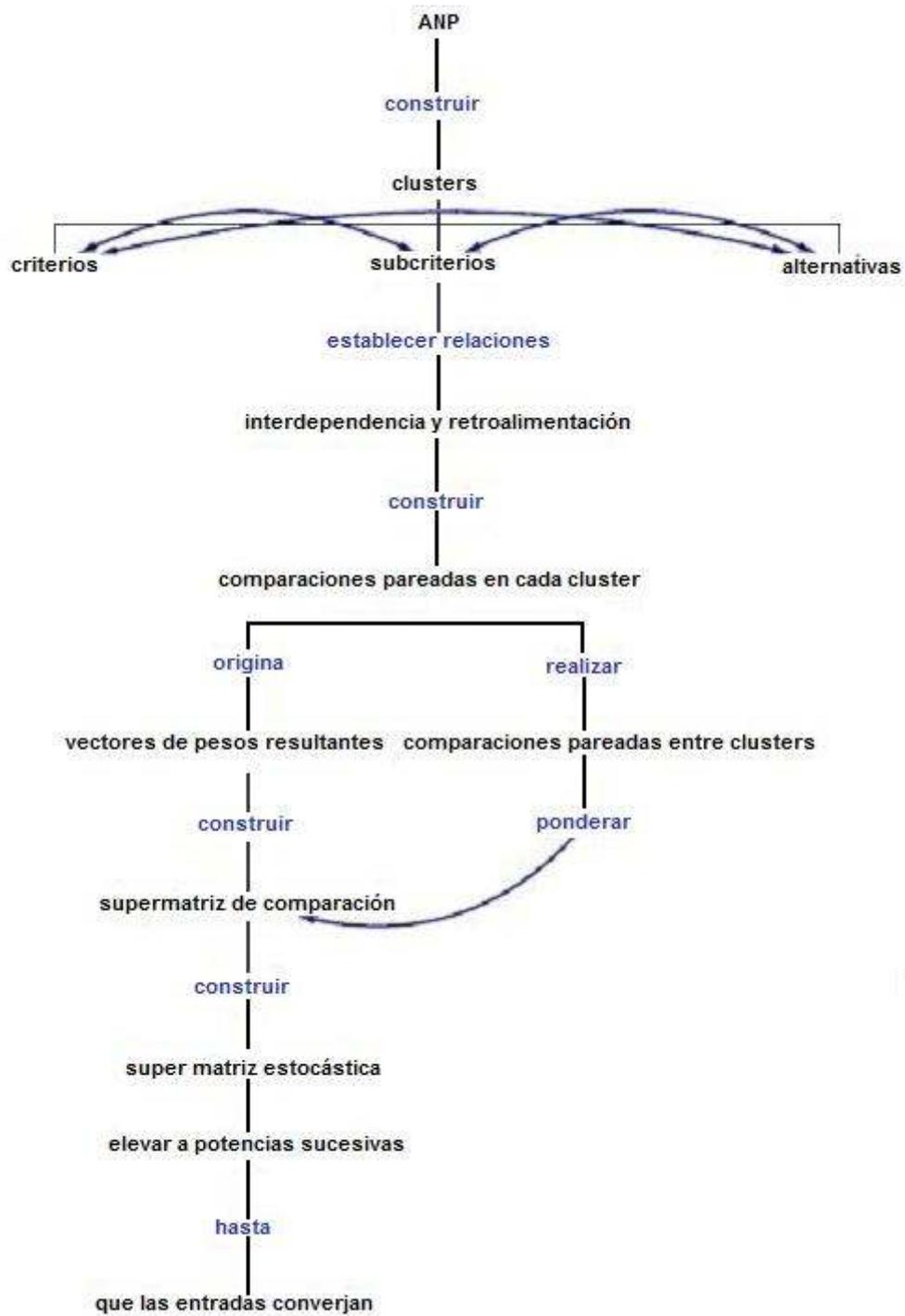


Figura II - 3: Esquema del ANP para resolución de problemas

En la tabla siguiente, se muestran algunas aplicaciones del Proceso Analítico en Red que se han desarrollado en los últimos años y que tiene algún componente en común con el problema que aquí nos planteamos.

Área	Aplicaciones	País	Año	Autor
Informática	Selección de sistemas de información	Brasil	2008	Costa, A.P.
Industria	Selección de refrigerantes	Colombia	2008	Díaz, P.P. y García, M
Empresa	Selección de Proyectos Seis Sigma	Venezuela	2008	Chacón, E. and García, M.
Ingeniería	Evaluación de riesgos	China	2007	Shih-Tong, Cheng-Wei, Ping-Hui
Logística	Selección de proveedores	India	2007	Jharkharia, Sanjay and Shankar, Ravi
Empresa	Construcción de un modelo PMS	Turquía	2007	Isik, Z., Dikmen, I. and Birgonul, M. T
Ingeniería	Selección de la ubicación de generadores eléctricos	Chile	2007	Zolezzi, J.M.
Producción, logística	Cadena de suministro	India	2006	Agarwal, Shankar y Tiwari
Industria	Evaluación tipos de conexión	Turquía	2006	Güngör
Tecnología	Selección de tecnología	Turquía	2005	Erdogmus, Kapanoglu y Koc
Medioambiente	Administración ambiental	Austria	2005	Wolfslehner, Harald y Manfred

Tabla II – 4: Aplicaciones más recientes del Proceso Analítico en Red (ANP)

### II.3.2.9 Integración de AHP y ANP con otras técnicas

De todos los métodos y técnicas revisadas en el presente Capítulo, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Proceso Analítico en Red (ANP), desarrollados por Saaty (Saaty, 1980, 1986, 2003) (Saaty and Ozdemir, 2003), han sido los más estudiados y utilizados en casi todos los campos relacionados con la toma de decisión multicriteria (MCDM), como lo demuestran Gass and Forman (2001) y Kumar and Vaidya (2006) entre otros, quienes analizan en su trabajo 150 artículos en los cuales se aplicó el método AHP en Ingeniería, Industria, Empresa, Medioambiente, etc.

Esta gran diversidad de aplicaciones, se debe a la simplicidad, facilidad de empleo, y flexibilidad que presentan estos métodos, permitiendo además su integración con otras técnicas, como lo muestra Ho (2007), quien en el texto citado presenta una revisión de aplicaciones de 1997 a 2006 del método AHP combinado a otras técnicas como QFD, metaheurística, SWOT y DEA. Al igual que AHP, ANP también permite resolver diversidad de problemas como lo demuestra su aplicación a la evaluación del medio ambiente (Sarkis, 1998), adquisición de nueva maquinaria (García, Noriega y Díaz, 2006), predicción de crisis financieras (Saaty and Niemira,(2004), selección de la mejor alternativa de gestión de la cadena de suministro (Agarwal, Shankar and Tiwari, 2006), y especialmente interesante resulta, para los objetivos de la presente tesis, la utilización de ANP integrado con otras técnicas en la evaluación de tecnología: (Huang, Tzeng and Ong, 2005), (Kahraman, Ertay and Büyüközkan, 2006), (Osorio y Herrera 2006), en esta área, queremos resaltar la posibilidad abierta por el trabajo de Tuominen y Kengpola (2006), que integra ANP y Delphi para seleccionar y evaluar tecnología.

En la revisión bibliográfica efectuada para realizar este Estudio del Arte, también hemos constatado que existe un conjunto de problemas que debido a su gran complejidad y limitaciones del mundo real, requieren para encontrarles solución, integrar técnicas de lógica difusa con AHP o ANP, como nos muestra Duarte (2000). También para abordar el problema de la imprecisión, inexactitud o la falta de determinación del decisor que puede presentarse en AHP y ANP, se ha utilizado la integración de la Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) con alguno de los métodos y técnicas mencionadas anteriormente.

En este sentido, Lee et al. (2001) expone una serie de inconvenientes en la utilización de la metodología AHP para casos concretos en los que los valores a asignar por el decisor no se pueden adaptar estrictamente a la Escala de Saaty (tabla II-2). Estos inconvenientes son: la utilización de una escala desbalanceada de juicios u opiniones, la incertidumbre asociada a representar la opinión del experto en la forma de un solo número y el hecho de que los juicios, selección y preferencias subjetivos tienen un alto impacto en el método AHP. Para solucionar o por lo menos aminorar los problemas citados anteriormente, Lee propuso la utilización de *números triangulares* o fuzzy (Lógica Difusa) integrada en la metodología AHP, permitiendo utilizar el método donde existe imprecisión e incertidumbre para realizar los juicios y comparaciones entre los elementos de la jerarquía. Los números difusos de tipo triangular, vienen representados por una tripleta (l,m,n) donde m, n y l corresponden al valor medio, y a

los límites superior e inferior respectivamente. Esta solución, así como diversos ejemplos de integración de AHP con Lógica Difusa, podemos encontrarlo en Mikhailov y Tsvetinov (2004), Shamsuzzaman et al. (2003), Shamsuzzaman (2000), Hsu et al. (2007), Durán y Aguiló (2006) y Kahraman (2006).

Desde otra perspectiva, la estructura jerárquica de AHP y la estructura en Red de ANP permiten una mayor comprensión del problema a resolver y además proporcionan un gran nivel de seguridad en su aplicación, debido a que han sido ampliamente utilizados en una gran diversidad de áreas y durante muchos años (AHP desde la década de los 80). Ambos Procesos nos permiten resolver problemas con múltiples criterios aunque algunos se encuentren en conflicto, con información incompleta. Además, permiten evaluar diferentes alternativas y un factor muy importante, sobre todo en problemas complejos: permite la interacción de grupos de decisores, y decimos que esto es importante, porque en la gran mayoría de los problemas del mundo real se deben tener en cuenta estos aspectos y ambos métodos permiten encontrar la mejor solución teniendo en cuenta todos los aspectos a la vez. Al respecto, hemos de resaltar que ANP hereda las principales características del AHP y además ofrece una mayor ventaja al permitir la retroalimentación entre los diferentes criterios.

En cuanto a las áreas de aplicación se observa en la Tabla II-5, que en los métodos AHP, ANP y Lógica difusa, el área de mayor utilización es la selección y la evaluación, debido a que este tipo de problemas, presentan una estructura que puede representarse fácilmente de forma jerárquica. Algunas de las aplicaciones realizadas con estos métodos son la evaluación de tecnología, selección de tecnología (recordemos que el objetivo de esta tesis es seleccionar un aerogenerador-tipo), selección de proyectos, selección de rutas de transporte, selección de proveedores, selección de diseños de productos, evaluación de productos, entre otras.

Programación por Metas (GP) también se puede integrar con el Proceso Analítico Jerárquico. Uno de los pioneros en integrar GP con otros métodos fue Gass (1986) quien combinó GP con AHP para la determinación de los pesos o ponderaciones de los criterios mediante la Programación por Metas Ponderadas (WGP). Este método resulta un procedimiento alternativo a la realización de las comparaciones pareadas y al posterior cálculo del autovector.

Chandran, Golden y Wasil (2005) proponen unos nuevos modelos de programación lineal para estimar también los pesos de los criterios en AHP. Estos modelos, según argumentan los autores, son fáciles de entender y formular, se pueden resolver con apoyo del software que existe en el mercado (como LINDO o LINGO), permiten realizar análisis de sensibilidad, son capaces de trabajar con juicios por intervalos y sirven también para resolver problemas de decisión multiexperto. La combinación de estas dos técnicas de decisión multicriterio permite trabajar en decisiones individuales y colectivas e incorporar tanto la información objetiva asociada a los aspectos tangibles de un problema como el conocimiento subjetivo del mismo vinculado al factor humano. La primera (el AHP) permite capturar, mediante la utilización de comparaciones pareadas, la información tangible e intangible derivada de los elementos conocidos. La segunda (GP), además de proporcionar una estimación bastante robusta del modelo de regresión, posibilita la integración en el proceso de valoración de la escasa información existente y la actitud personal ante la valoración.

Respecto a las aplicaciones en campos específicos, en las tablas II-3 y II-5 observamos que el método AHP tiene mayor aplicabilidad en la Ingeniería, Tecnología y Energía y Empresa. El método ANP (tablas II-4 y II-5) presenta un menor número de aplicaciones y además de las mencionadas para AHP, también se aplica para Medioambiente, Urbanismo y Logística.

La Tabla II-5 muestra un resumen de las aplicaciones de los métodos multicriterio AHP y ANP integrados con otras técnicas. AHP ha presentado resultados satisfactorios en trabajos en los que ha sido combinado con las siguientes técnicas (Ho 2007): Delphi, Lógica Difusa (LD), DEA, y QFD, SWOT, DEA, Programación por metas, Programación multiobjetivo, MCE, Teoría de Grafos, Modelos escala, PROMETHEE, Probabilidad, MAH, Procesos Estocásticos, Programación dinámica, SMART, ELECTRE, SMAA, ISM, entre otros, debido a su gran versatilidad. Por otra parte, encontramos que ANP comenzó a aplicarse con mayor asiduidad a partir de 1999 cuando el software que implementa el ANP, SuperDecision, fue desarrollado por William J. Adams de la Embry Riddle Aeronautical University, trabajando conjuntamente con Saaty. Desde entonces, se utiliza integrado con los métodos PM, SWOT, MCE, Lógica Difusa, BSC, ISM, Delphi y MAH.

Área	Aplicaciones	País	Año	Autor	método	Combinado con
Empresa	Desarrollo sistemas ERP	Austria	2008	Dimitrova, V.A	ANP	Priority Matrix (PM)
Ingeniería	Selección de localización para planta	Iran - USA	2008	Pirdashti, Mohammadi, Rahimpour and Kennedy	AHP	Delphi
Empresa	Evaluación del entorno	Turquía	2007	İhsan Yüksel and Metin Dagdeviren	ANP	SWOT
Urbanismo	Planificación urbana	Italia	2007	Roccasalva, Lami y Lombardi	ANP	MCE
Empresa	Selección para franquicia	China	2007	Hsu, Pi-Fang, Chen, Bi-Yu	AHP	Lógica Difusa
Mecánica	Evaluación de maquinaria	China	2007	Chang, C., Wu, C. and Chen, H	ANP	Lógica Difusa
Empresa	Evaluación financiera	China	2007	Ing-Chang, Ming-Cheng, Hsiao-Wen, Hsiu-Yuan	ANP	BSC
Ingeniería	Optimización del sistema ferroviario	Irán	2007	Azadeha, Ghaderia and Izadbakhsh	AHP	DEA
Tecnología	Evaluación de tecnología	China	2007	W. Jiwu, H. Lucheng, L. Wenguang, L. Jian	ANP	Delphi
Industria	Selección de máquinas de control numérico	Venezuela	2006	Durán y Aguiló	AHP	Lógica Difusa
Industria	Diseño de productos manufactureros	Turquía	2006	Kahraman, Ertay y Buyukozkan	AHP y ANP	Lógica Difusa y QFD
Industria	Selección de maquinaria	Taiwán	2005	Huang, Tzeng y Ong	ANP	ISM
Tecnología	Selección y Evaluación tecnología	Tailandia - Finlandia	2005	Kengpola, Tuominen	ANP	Delphi y MAH
Tecnología	Selección de un robot	India	2005	Arijit Bhattacharya, Bijan Sarkar, Sanat Kumar	AHP	QFD

Tabla II – 5: Aplicaciones más recientes de AHP y ANP integrados con otras técnicas

### ***II.3.3 Técnicas que se apoyan en la articulación progresiva de preferencias***

Este conjunto de técnicas y métodos se denominan también *interactivos* ya que se caracterizan por mantener un continuo diálogo con el decisor durante todo el proceso de decisión, de forma que éste interactúa con el modelo hasta alcanzar una solución. Estas técnicas normalmente operan en tres etapas: (1) encontrar una solución no dominada, (2) tomar en consideración la reacción del centro decisor respecto a esta solución no dominada y modificar consecuentemente las preferencias sobre los objetivos, y (3) repetir los dos pasos previos hasta que el centro decisor está satisfecho o bien ya no es posible conseguir ninguna mejora.

En este grupo de técnicas y métodos se incluyen, entre otros, los siguientes:

- **Método STEP o STEM:** publicado en 1971 por Benayoun, R. de Montgolfier, J; Tergny, J; y Larichev, O.I. fue el primer método interactivo. En un principio, las suposiciones básicas son las de un problema lineal multiobjetivo, pero realmente la linealidad de los objetivos sólo se utiliza en el cálculo de unos parámetros normalizadores. Este método está basado en la minimización de la distancia entre el vector ideal del problema y un determinado subconjunto de puntos del conjunto de oportunidades del mismo. Las preferencias del decisor se ven reflejadas en los parámetros utilizados para calcular dicha distancia (con la métrica de Tchebychev) y la región del conjunto factible a la que se le aplica. Es un método iterativo. Reduce progresivamente (mediante iteraciones) el espacio de soluciones de compromiso, mediante la adición de restricciones a los valores de los criterios.
- **Método SEMOPS:** Este método está basado en el uso cíclico de una función objetivo de sustitución obtenida de compensar un objetivo frente a otro. No puede utilizar variables discretas. Fue introducido por Monarchi D, Kisiel C, y Duckstein L. (1973). Encontramos aplicaciones de este método en Goicoechea et al, Chankong and Haimes (1983); Szidarovszky et al. (1986);
- **Método GPSTEM:** Fue introducido por Fichet (1976) y aplicado por Szidarovszky et al (1984). Es un método que puede ser considerado como una unión entre los métodos STEM y programación por metas.

## II.4 Conclusiones

En el presente Capítulo hemos efectuado una amplia revisión de la bibliografía correspondiente a los métodos y técnicas de Decisión Multicriterio (DM), de acuerdo con el objetivo que nos planteamos en la Introducción y que es coincidente con el primer objetivo específico de nuestra investigación (apartado *1.4.2.1 Objetivos de la investigación*). Hemos visto la necesidad de efectuar esta revisión de una forma sistemática, para lo cual tomamos como referencia la clasificación propuesta por Cohon & Marks (1975) ya que es la más comúnmente utilizada en el ámbito de OR (*Operations Research*).

Una vez estudiado el Estado del Arte de la DM, es necesario describir el marco teórico en el que se asientan los Métodos de Decisión Multicriterio Discretos ya que sirven de base al Proceso Analítico Jerárquico (Saaty 2008), que aplicamos en nuestra investigación. También deberemos justificar porqué creemos adecuada esta aplicación y ampliar el estudio del AHP que ya hemos comenzado a exponer en el presente Capítulo.

**Capítulo III**  
**El Proceso Analítico Jerárquico. Fundamentos**  
**y justificación de su empleo.**



### **III.1. Introducción**

El objetivo de este Capítulo es describir el marco teórico en el que se asientan los Métodos de Decisión Multicriterio Discretos (MDMD), los fundamentos del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y justificar su aplicación en nuestra investigación.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo fijado, introducimos el proceso de toma de decisiones, el marco teórico de los MDMD ya que sirve de base al AHP, el cual aplicamos en nuestra investigación. Por este motivo, también describimos los fundamentos de este Proceso: axiomas, principios, estructura matemática y escala y, posteriormente, justificamos porqué se ha elegido este método para formar parte del criterio que nos permitirá identificar y priorizar los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado.

### **III.2. El Proceso de Toma de Decisiones**

En la introducción (apartado II.1) del Capítulo II, mencionamos los conceptos básicos de decisión según León (2001) y en este apartado lo retomamos, para establecer el proceso que nos permite llevar a cabo la toma de decisiones.

Según H. Simon (1960): “La toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos”. En este contexto, un proceso de toma de decisión comprende las siguientes etapas:

- Análisis de la situación.
- Identificación y formulación del problema.
- Identificación de criterios relevantes que permitan evaluar las posibles soluciones.
- Identificación de soluciones factibles.
- Aplicación de un modelo de decisión para obtener un resultado global.
- Realización de análisis de sensibilidad.

- Conclusiones.

La opinión de una única persona en la toma de decisión puede ser insuficiente cuando se analizan problemas complejos que deben contemplar para su solución múltiples criterios y alternativas, el investigador debe proporcionar los medios para que se genere la discusión e intercambio entre los actores que por su experiencia y conocimiento pueden ayudar a estructurar el problema y a evaluar las posibles soluciones.

Para abordar un problema de toma de decisión de estas características, en el que se presentan diversos objetivos o criterios que deben ser considerados simultáneamente, ha surgido la Metodología Multicriterio como Sistema de Ayuda a la Decisión del ser humano.

Según Eduardo Martínez (1998), “Los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas, un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistentes”. Estos métodos son especialmente indicados cuando hay que tomar decisiones frente a problemas que contienen aspectos intangibles que deben ser evaluados.

En función de las preferencias del agente decisor y de objetivos predefinidos el problema central de los métodos de evaluación y decisión multicriterio consiste en:

1. Seleccionar la mejor o mejores alternativas.
2. Aceptar aquellas alternativas consideradas como adecuadas y rechazar las demás.
3. Ordenar, de más a menos adecuadas, las alternativas consideradas mediante un determinado enfoque o método.

El número, finito o infinito, de criterios existentes frente a un problema determinado conlleva la utilización de una metodología específica. Cuando las funciones objetivo, toman un número infinito de valores distintos, que conducen a un número infinito de alternativas posibles del problema estamos ante el caso de una Decisión Multiobjetivo. En el caso de problemas en los que las alternativas de decisión son finitas, nos encontramos ante problemas denominados de Decisión Multicriterio

Discretos y son los que vamos a considerar en el presente trabajo de investigación, dada la naturaleza de nuestro problema de selección.

Como ya hemos visto en el Capítulo II, los métodos de Decisión Multicriterio Discretos se utilizan para realizar una evaluación y decidir sobre problemas que admiten diversas alternativas de solución mediante:

1. Un conjunto finito de alternativas estables y que cada una de ellas está perfectamente identificada, aunque no sean conocidas de forma exacta y completa todas sus consecuencias cuantitativas y cualitativas.
2. Una familia de criterios de evaluación (atributos, objetivos) que nos permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos (o ponderaciones) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio.
3. Una matriz de decisión o de impactos que resumen la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio, una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones en función de cada uno de los criterios. La escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escalas cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal, y probabilística.
4. Una metodología o modelo de agregación de preferencias que proporcione justificadamente una ordenación o jerarquización de los juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones.
5. Un proceso de toma de decisiones en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (experto, decisor y usuario).

Los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos son: Ponderación Lineal, Utilidad multiatributo (MAUT), Proceso Analítico Jerárquico (AHP- Analytic Hierarchy Process) y Proceso Analítico en Red (ANP - Analytic Network Process). Especialmente estos dos últimos, desarrollados por Saaty (1980 y 1996), son los más utilizados en los problemas de selección y evaluación de tecnología (ver tablas II-3 y II-4). En los últimos años, con objeto de eliminar algunas deficiencias que presentan cuando se aplica uno de ellos de forma exclusiva a determinados problemas, se encuentran aplicaciones en las que aparecen complementados con otras técnicas, entre ellas podemos citar las desarrolladas por Lee et al. (2001);

Huanga, Tzengb y Ong (2005); Kengpola y Tuominen (2005); Kahraman, Ertay y Buyukozkan (2006); Herrera y Osorio (2006) y Pirdashti et al. (2008) y el resto de aplicaciones contempladas en la tabla II-5.

A continuación procedemos a describir los fundamentos teóricos en los que se asientan ambos procesos (AHP y ANP) junto a los métodos que los complementan para lograr la resolución de problemas de selección y evaluación.

### **III.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

La toma de una decisión implica fijar prioridades y el Proceso Analítico Jerárquico es una metodología adecuada para hacerlo<sup>1</sup>. Esta toma de decisión conlleva la elección de alternativas y criterios que necesitan ser priorizados.

El AHP fue propuesto por Thomas Saaty (1980) como una metodología para la resolución de problemas de toma de decisión en ámbito socioeconómico y posteriormente ha sido aplicado a numerosos campos, siendo uno de los métodos más difundidos para la resolución de problemas de Técnicas de Decisión Multicriterio, especialmente en los problemas de selección y evaluación de proyectos, tecnología y maquinaria.

En el AHP, se representan los elementos de un problema jerárquicamente, organizándolo en pequeñas partes, las cuales expresan la intensidad o impacto de los elementos en la jerarquía. Estos juicios o intensidades (información cualitativa suministrada por expertos) posteriormente son sintetizados y cuantificados mediante procedimientos y principios, entre los que destaca la escala de Saaty, y pueden ser tratados cuantitativamente.

Este proceso, tiene su base en una serie de atributos que posee el ser humano y que le permiten la observación de lo que le rodea, comunicar a otros seres humanos el resultado de su observación pudiendo efectuar discriminaciones y establecer relaciones sobre lo observado y sintetizarlo. Esta capacidad humana se ve reflejada en

---

<sup>1</sup> Saaty T.L.1980, 1986, 1998, 2003, 2004; Moreno-Jiménez, 2002; Katayama 2005; Wei 2005; Erdogmus et al. 2005; Castro 2006; Osorio y Herrera 2006; Carmignani et al. 2006; García, Noriega, et al. 2005; Tzeng et al. 2007; K. Elfvengren 2007; Chang C.W. 2007; González 2008; van Til J.A. et al. 2008 y Seong Kon et al. 2008, entre otros

tres principios: Principio de identidad y descomposición, Principio de discriminación y comparación de juicios y Principio de síntesis. AHP soporta su teoría en base a estos tres principios:

*Principio de Identidad y descomposición:* Establece la estructura jerárquica del problema. Esta estructura posee los siguientes elementos:

- Un objetivo (o meta), que ocupa el nivel superior.
- Los criterios, situados en un nivel intermedio, que son evaluados según su importancia para alcanzar la meta.
- Las alternativas, situadas en un nivel inferior, que son evaluadas con respecto a cada criterio.

La meta, los criterios y las alternativas son todos los elementos en un problema de decisión y, en la representación gráfica del modelo, aparecen como nodos situados en los niveles correspondientes.

Las líneas que conectan la meta con cada criterio significan que el criterio debe compararse, por parejas, según su importancia respecto a la meta. Igualmente, las líneas que conectan cada criterio con las alternativas significan la dependencia existente y que éstas deben ser comparadas con el correspondiente criterio para establecer su orden de preferencia respecto de dicho criterio.

En la siguiente figura se muestra un esquema similar al de la fig. I-2 y sirve de ejemplo para mostrar lo expuesto anteriormente, se aprecian seis pares de comparaciones, una para los criterios con respecto a la meta y cinco para las alternativas con respecto a cada criterio.

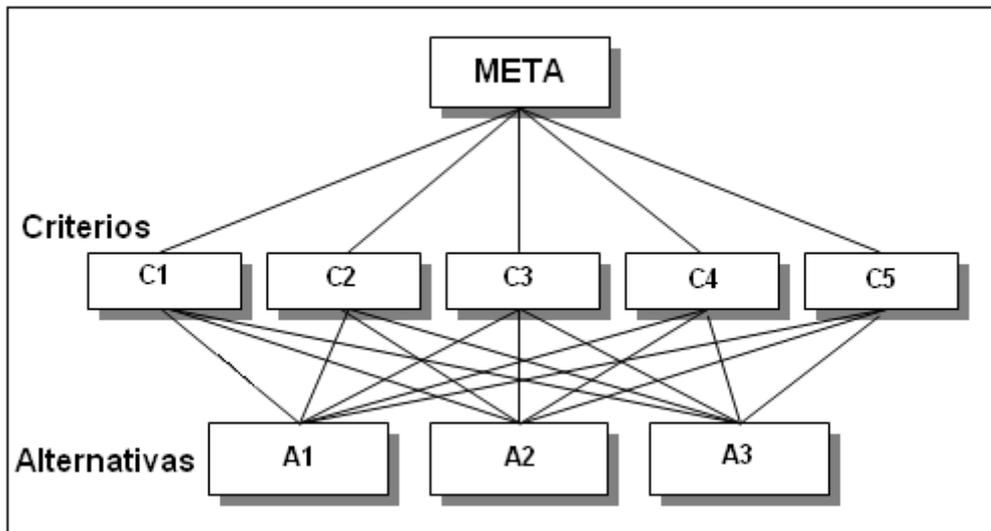


Fig. III – 1: Modelo jerárquico con tres niveles

*Principio de discriminación y juicios comparativos:* Los elementos que integran un problema son comparados por parejas en función de su importancia relativa o de una propiedad en común. Saaty (1980) propone una escala (tabla II-2), basada en estudios psicológicos<sup>2</sup>, para establecer recomendaciones.

*Principio de síntesis:* Es la aproximación a través de la planificación multicriterio de problemas mediante la combinación de cada nivel de jerarquía con la escala de importancia relativa asignada. Las prioridades son sintetizadas para el segundo nivel multiplicando las prioridades locales por la prioridad de su correspondiente criterio en el nivel de arriba y adicionándolos por cada elemento en un nivel acorde a los efectos. El procedimiento matemático, con la notación correspondiente, se aborda más adelante. En el principio de síntesis se incluyen dos alternativas para efectuar la evaluación:

- Modalidad distributiva: Es aplicable cuando la calidad de una única alternativa afecta a su rango. El número de copias de cada alternativa también afecta la participación que cada una recibe al asignar un recurso. En la planificación, los escenarios considerados deben ser exhaustivos y por lo tanto sus prioridades dependen de cuantos hay. Esta modalidad es esencial para ordenar los criterios y subcriterios, y cuando hay dependencia. Para esta modalidad, el denominado vector prioridad se obtiene mediante la normalización, es decir, dividiendo cada

<sup>2</sup> Thurston, L.L. (1927); Yela, M. (1990); Nathan, B.R. and Alexander, R. A. (1988).

dato por el total que se obtiene sumando la columna en la que se encuentra situado.

- Modalidad ideal: Se utiliza para escoger la mejor alternativa independientemente de otras alternativas similares que puedan existir. Su vector prioridad se obtiene dividiendo cada dato por el máximo valor de la columna en la que se encuentra situado.

Existen diferentes alternativas de medición que básicamente se diferencian por el objetivo a alcanzar y de la dependencia entre sus criterios y alternativas.

- Medición relativa: Se asigna una evaluación de preferencia a cada par de elementos con respecto a una propiedad que tienen en común o sea que se compara a un par de elementos que se encuentran en un nivel de jerarquía con respecto a los elementos con los que se relacionaban en el nivel anterior.
- Medición absoluta: las prioridades de un elemento son comparadas frente a un estándar (o propiedad ideal).
- Medición benchmark: En vez de usar intensidades, podemos comparar todas las alternativas con respecto a alternativas bien conocidas llamadas benchmarks (modelos de comparación o puntos de referencia) que son diferentes y van desde lo mejor a lo peor para cada criterio.

### **III.3.1. Escala del AHP y su justificación**

Saaty (2008) basándose en los antecedentes de teorías sobre la medida de Lebesgue, A. F. MacKay, Davis and Hersh y Henri Bergson<sup>3</sup>, entre otros, construye su Escala Fundamental (tabla II-2) y establece que cuando utilizamos juicios para estimar el elemento dominante al realizar una comparación entre dos elementos, y

---

<sup>3</sup> MacKay, A. F., (1980). *Arrow's Theorem : The Paradox of Social Choice - A Case Study in the Philosophy of Economics*, Yale University Press, New Haven.

Davis, P. J. and Hersh, R., (1986). *Descartes Dream*, Harcourt Brace and Jovanovich, New York.

Bergson, Henri: "The Intensity of Psychic States". Chapter 1 in, *Time and Free Will: An Essay on the Immediate Data of Consciousness*, translated by F. L. Pogson, M. A. London: George Allen and Unwin (1910): 1–74,

especialmente cuando el criterio de comparación es un intangible, en lugar de usar dos números  $w_i$  y  $w_j$  de una escala, es más adecuado utilizar su cociente ( $w_i / w_j$ ). En este contexto, Saaty asigna un solo número de su escala para representar el cociente  $w_i / w_j$ .

AHP ordena las alternativas según esta escala de prioridades lo que hace posible asignar recursos y escoger la mejor alternativa. La escala se utiliza para responder las preguntas básicas en una comparación por pares. Presenta las siguientes características:

- La escala representa las distintas percepciones de la gente cuando efectúa las comparaciones.
- Si se denota la escala de valores por  $x_1, x_2, \dots, x_p$ , entonces  $x_{i+1} - x_i = 1$  para  $i=1, \dots, p-1$ , el experto puede otorgar todas las valoraciones al mismo tiempo. Para que haya una mayor consistencia y exactitud, un individuo no debe comparar simultáneamente más de siete objetos (más o menos uno), por tanto  $p = 7+2$ . Esta teoría fue establecida por el psicólogo George Miller (1950) y posteriormente fue integrada en el AHP. Utilizando una diferencia de una unidad entre las sucesivas escalas y usando el hecho de que  $x=1$  para la comparación de la identidad se sigue que los valores de la escala ocuparan un rango comprendido entre 1 y 9.

AHP permite cierto grado de inconsistencia la cual es la base del aspecto borroso y ambiguo vinculado al conocimiento cuando se trabaja con intangibles. La inconsistencia surge de la necesidad de la redundancia. La redundancia mejora la validez acerca del mundo real. Matemáticamente la medición de la consistencia debería permitir una inconsistencia no superior a un orden de magnitud del 10%. Esto permitirá variaciones en la medición de elementos de que están siendo comparados, es decir,  $7 \pm 2$  de allí que la máxima gradación que pueda otorgar una persona no exceda de la escala de 1 a 9. Al ser homogéneos recibirán cerca del 10 al 15% del valor relativo total en el vector de las prioridades. Una pequeña inconsistencia cambiaría ese valor por una pequeña cantidad y su valor relativo verdadero sería aún suficientemente grande para mantener ese valor.

En la práctica los juicios numéricos pueden tener aproximaciones pero la cuestión es precisar en que medida esta aproximación nos puede ayudar. No existe una teoría totalmente satisfactoria que pueda soportar los juicios con la realidad. Actualmente se

usa la raíz de la desviación media y la media absoluta de la desviación. Estos indicadores son utilizados cuando se efectúan comparaciones entre escalas o comparaciones de escalas interpersonales en juicios, pero no pueden utilizarse como medidas absolutas de la calidad del ajuste.

En la escala, el conjunto de objetos a comparar debe ser homogéneo, es decir, la valoración del objeto más grande debe ser 9 veces la unidad que se aplica a los objetos más pequeños.

Al recibir estímulos procedentes de los objetos con los que interaccionamos, nuestro cerebro es capaz de percibir, en determinada medida, la relación proporcional que hay entre ellos. En este sentido, en 1846, el psicólogo Weber encontró que las personas eran capaces de distinguir en su mano pesos diferentes de 20 y 21 gramos, pero de 20,5 gramos. Además, eran capaces de distinguir entre dos pesos de 40 y 42 gramos, pero no entre pesos de 40 y 41 gramos. Esto es debido a que necesitamos incrementar un estímulo  $s$  por lo menos en una cantidad  $\Delta s$  hasta alcanzar un punto donde nuestros sentidos son capaces de distinguir entre  $s$  y  $s + \Delta s$ .

El cociente  $r = \Delta s/s$  no depende de  $s$ . La ley de Weber establece que el cambio de sensación se percibe cuando el estímulo es incrementado en un porcentaje constante del propio estímulo. Esta ley se cumple para valores donde  $\Delta s$  es pequeño cuando lo comparamos con  $s$  y falla en la práctica cuando  $s$  es demasiado pequeño o demasiado grande. En 1860 Fechner<sup>4</sup> consideró una secuencia creciente de estímulos que cumplieran la Ley de Weber: para un valor dado del estímulo, la respuesta permanecía estable hasta que el valor del estímulo era incrementado suficientemente en proporción al valor del estímulo. Conservando esta proporcionalidad Fechner construyó una escala, muy conocida en Psicología, cuyo primer valor es  $S_0$ .

Desde el punto de vista matemático, podemos expresar lo anterior y construir la escala, si partimos de la consideración de estímulos sucesivos  $S_0, S_1, \dots, S_n$  habiéndose obtenido cada uno de ellos, a partir del  $S_0$  inicial de la siguiente forma:

---

<sup>4</sup> Fechner, G., (1966). *Elements of Psychophysics*, Adler, H. E. (Trans.), Vol. 2, Holt, Rinehart and Winston, New York. La experimentación de Weber-Fechner también puede verse en Batschelet, S., *Introduction to Mathematics for Life Scientists*, Springer, 1971.

$$S_1 = S_0 + \Delta S_0 = S_0 + \frac{\Delta S_0}{S_0} \cdot S_0 = S_0 (1 + r)$$

$$S_2 = S_1 + \Delta S_1 = S_1 (1 + r) = S_0 (1 + r)^2 = S_0 \alpha^2 \quad \text{donde } \alpha = (1 + r)$$

.

.

.

$$S_n = S_{n-1} \alpha = S_0 \alpha^n \quad \text{siendo } n = 0, 1, 2, \dots$$

La respuesta a estos estímulos viene dada habitualmente en la forma:

$$M_i = i \cdot a \log \alpha^i \quad \text{siendo } i = 1, 2, \dots, n$$

Si se toman los ratios  $M_i / M_1$  (para  $i = 1, \dots, n$ ) de estas respuestas a los estímulos en la cual el primero ( $M_1$ ) es el más pequeño y sirve como unidad de comparación, estos valores enteros de  $1, 2, \dots, n$  son los utilizados en la escala fundamental de Saaty (1980, 2008). Por consiguiente, se considera que dicha escala es derivada de la función logarítmica de respuesta introducida por el psicólogo Weber-Fechner.

Estos números enteros ( $1, 2, \dots, n$ ) parece que son intrínsecos de nuestra habilidad para hacer comparaciones. En un contexto menos matemático, notamos que somos capaces de distinguir entre alto, medio y bajo en un nivel determinado y para un nivel inferior también somos capaces de distinguir, para cada uno de ellos, entre alto, medio y bajo constituyendo de esta forma las nueve categorías diferentes consideradas en la escala fundamental de números absolutos de Saaty. Asignamos el valor de uno (bajo, bajo) como el más pequeño y el valor de nueve (alto, alto) lo consideramos el más alto. Este espectro cubre todas las posibilidades entre los dos niveles.

Como ya hemos comentado anteriormente, en este Capítulo y en el anterior, esta escala de nueve números enteros está vinculada a la importancia asignada por el decisor en sus juicios. En el caso que una medida esté dada con parte entera y parte decimal y nos interese, por homogeneizar, para nuestro juicio la medida sin considerar la parte decimal, podemos hacerlo, tal como estableció Wilkinson (1965): “Pequeños cambios en el juicio conducen a cambios pequeños en las prioridades derivadas”. Al respecto, también hay que considerar, tal como se plasma en la tabla II-1, que si las actividades son muy próximas, se puede añadir un decimal a la unidad para mostrar sus diferencias de una forma más apropiada.

A partir de lo establecido anteriormente y de lo que veremos en el siguiente apartado (*II.2.2. Justificación matemática del método*), Saaty (1994, 1996, 2008) se basó en el método de asignación indirecta de pesos que conlleva la aplicación de los conceptos matemáticos de autovalor, vector propio y la realización de comparaciones pareadas entre los criterios considerados, para establecer las prioridades de dichos criterios.

Cuando le pedimos al decisor que establezca una serie de prioridades mediante comparación pareada a fin de determinar los pesos relativos de los criterios  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , está contribuyendo a la construcción de una matriz  $A$  cuyos elementos  $a_{ij}$  indican, mediante números positivos, la prioridad relativa entre dos de los criterios ( $C_i$  y  $C_j$ ) respecto al elemento del nivel inmediatamente superior en la jerarquía del problema. Con objeto de establecer la prioridad relativa recurrimos a la escala fundamental de Saaty (1980, 2008) que considera pares de elementos que se encuentran en un mismo nivel de jerarquía y los compara considerando exclusivamente una determinada propiedad de un nivel superior, con lo cual se obtiene una prioridad relativa de los objetos respecto a dicha propiedad. La prioridad se mide mediante la escala fundamental de Saaty (tabla II-2).

También vimos en la referida tabla II-2 del Capítulo II que los valores intermedios (2, 4, 6 y 8) entre dos juicios adyacentes se utilizan como compromiso entre dos juicios. Como podemos apreciar en dicha tabla, el incremento considerado en la escala numérica, para pasar de un nivel a otro, es la unidad. Podrían utilizarse valores intermedios entre 0 y 1 para obtener una graduación más fina de los juicios emitidos, para dar una mayor fundamentación matemática e intensidad se pueden aplicar los fundamentos de la Lógica Difusa según podemos estudiar en los trabajos desarrollados, entre otros, por Hsu et al. (2007), Durán y Aguiló (2006), Kahraman, Ertay and Buyukozkan (2006).

En Saaty (2008) podemos ver como incorpora la posibilidad de trabajar con valores intermedios entre 0 y 1, estableciendo la siguiente tabla que amplía la ya mencionada tabla II-2.

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.
2	Débil o leve	
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad frente a la otra
4	Más moderada	
5	Notable importancia	La experiencia y el juicio favorecen notablemente a una actividad frente a la otra
6	Más fuerte	
7	Muy fuerte o demostrada importancia	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en la práctica
8	Muy, muy fuerte	
9	Extremadamente importante	La experiencia favorece a una actividad frente a otra y su magnitud es del más alto orden posible de afirmación.
Recíprocos de los anteriores	Si al comparar la actividad i con la j se ha obtenido uno de los valores anteriores, al comparar j con i se le asigna el inverso	Es una suposición razonable.
1,1 - 1,9	Si las actividades son muy próximas, se añade un decimal a la unidad para mostrar sus diferencias de una forma más apropiada.	Es difícil asignar el mejor valor cuando comparamos actividades muy cercanas con otras más alejadas. Utilizando números pequeños, éstos pueden indicar mejor la importancia relativa de las actividades.

Tabla III-1: Escala fundamental de números absolutos

### III.3.2. Justificación matemática del método

Sean  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  un conjunto de criterios. El juicio cuantificado en pares de actividades  $C_i, C_j$  se representa mediante una matriz de dimensión  $n \times n$

$$A = (a_{ij}) \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{y } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde los elementos de la matriz A son definidos de acuerdo con las siguientes reglas:

- 1) Si  $a_{ij} = \alpha$ ,  $a_{ji} = 1/\alpha$  con  $\alpha \neq 0$
- 2) Si  $C_i$  tiene igual importancia que  $C_j$  para quienes emiten el juicio, entonces  $a_{ij} = 1$  y  $a_{ji} = 1$  verificándose en este caso que  $a_{ii} = 1 \quad \forall i$ .

Por consiguiente, la matriz A será:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Una vez representados los juicios cuantificados de los pares  $(C_i, C_j)$  como elementos numéricos  $a_{ij}$  en la matriz A, el problema ahora es asignar a n criterios  $C_1, C_2, \dots, C_n$  un conjunto de pesos numéricos  $w_1, w_2, \dots, w_n$  que pueden reflejar los juicios registrados.

Tal como está planteado, el problema puede ser transformado en un modelo matemático. Para ello, es necesario que el usuario juzgue el valor y significado de la comparación de acuerdo a sus objetivos, posibilidades y al problema en sí. Además, se deben interpretar y juzgar adecuadamente estos valores por lo que tenemos que describir exactamente como estos pesos se pueden relacionar con los juicios  $a_{ij}$  emitidos. Para realizar esta evaluación comenzamos desde el caso más simple hasta el más general en tres pasos:

1. Partimos de que en el caso ideal, los juicios son el resultado de medidas físicas exactas obtenidas a partir de una escala de precisión. Para este caso ideal, la relación entre los pesos  $w_i$  y los juicios  $a_{ij}$  son dados por:

$$a_{ij} = w_i / w_j \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix}$$

Hay que considerar que este caso ideal puede no ajustarse a la realidad y sólo puede admitirse la relación establecida en el caso más general. Si admitimos esta relación, dada su rigurosidad, puede suceder que en un caso práctico al tratar de resolver en  $w_i$  dado  $a_{ij}$  no exista solución. En cualquier caso, hay que considerar que las medidas físicas no son nunca exactas y existen pueden existir

desviaciones y que los juicios humanos también tienen desviaciones respecto a una realidad objetiva ideal.

2. Para tener en cuenta estas desviaciones, consideramos la fila  $i$ -ésima de la matriz  $A$ . Esta fila vendrá representada por  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{in}$  y en el caso ideal estos valores son iguales a los cocientes:

$$w_i/w_1, w_i/w_2, \dots, w_i/w_j, \dots, w_i/w_n$$

Por consiguiente, para el caso ideal, si nosotros multiplicamos el primer elemento de este vector por  $w_1$ , el segundo por  $w_2$ , y así sucesivamente, obtenemos:

$$\frac{W_i}{W_1} W_1 = W_i, \quad \frac{W_i}{W_2} W_2 = W_i, \quad \dots, \quad \frac{W_i}{W_n} W_n = W_i$$

Vemos que el resultado es una fila con idénticos elementos:  $w_i, w_i, w_i, \dots, w_i$  mientras que, en el caso general, podemos obtener un vector cuyos elementos representan una dispersión estática de valores alrededor de  $W_i$ . Por consiguiente, parece razonable establecer que  $W_i$  sea igual al valor promedio, con lo que la ecuación (1), para el caso más general, sería:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

A pesar que la ecuación anterior representa una relación menos estricta que la establecida en la ecuación (1), aún puede subsistir un nivel de exigencia que impida que el problema tenga una única solución, o sea, que sea posible obtener un solo peso.

3. Vamos a expresar la ecuación anterior (2) de una manera más sencilla. Para ello, debemos buscar un conjunto de condiciones que describan como puede hacerse corresponder al vector de los pesos ( $w$ ) con las cantidades asignadas. Consideremos la situación ideal dada por la ecuación (1) y las desviaciones que ya han sido introducidas en la ecuación 2, la cual decíamos que aún no se aproximaba lo suficiente a la realidad pues no asegura la existencia de un único vector de pesos ( $w$ ) que pueda satisfacer dicha ecuación. Por consiguiente, es

necesario modificar  $a_{ij}$  de tal manera que se aproxime a  $w_i / w_j$  siendo esta una pequeña perturbación para el cociente.

Ahora, como  $a_{ij}$  cambia, resulta que podría existir una solución para la ecuación (2) si  $n$  también cambia. Se denota el cambio del valor de  $n$  por  $\lambda_{m\acute{a}x}$  (autovalor máximo) entonces el problema

$$W_i = \frac{1}{\lambda_{\max}} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

tiene una solución única que es el valor propio. En general, las desviaciones en  $a_{ij}$  pueden conllevar grandes desviaciones en  $\lambda_{m\acute{a}x}$  y en  $w_i = 1, \dots, n$ , pero esto no sucede cuando trabajamos con la matriz recíproca que satisface las reglas 1 y 2. Para este caso existe una solución estable.

Con las ecuaciones planteadas, tenemos una solución aproximada que permite obtener el vector de prioridades que refleja mejor la realidad.

La consistencia de los juicios emitidos se mide mediante el *índice de consistencia*:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Y puede ser utilizado para mejorar dicha consistencia comparándolo con el valor que corresponda del índice de consistencia aleatorio (RI) cuyo valor es función de la dimensión de la matriz A y viene dado en tablas obtenidas mediante simulación de matrices generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (Moreno-Jiménez, Aguarón y Escobar, 2002).

El cociente entre ambos índices proporciona el *ratio de consistencia* (CR):

$$CR = CI / RI$$

Si  $CR \leq 0,10$  decimos que la matriz A es consistente y el vector de pesos ( $w$ ) se acepta. Aguarón y Moreno-Jiménez (2003) han establecido los umbrales, dependiendo del orden de la matriz, que permiten una interpretación de la inconsistencia análoga a

la del 10% para el ratio o Razón de Consistencia de Saaty. Estos valores son 0.31 para  $n = 3$ ; 0.35 para  $n = 4$  y 0.37 para  $n > 4$ .

### **III.3.3. Axiomas en los que se asienta el Proceso Analítico Jerárquico.**

El modelo jerárquico empleado para un determinado proceso de decisión debe cumplir cuatro axiomas principales. Sólo de esta manera son posibles y tienen real sentido los fundamentos teóricos expuestos en el punto anterior. Dichos axiomas son los siguientes:

- Axioma 1 (Reciprocidad): Dadas dos alternativas  $A_i$  y  $A_j \in AxA$ , la intensidad de la preferencia de  $A_i$  sobre  $A_j$  es inversa a la intensidad de preferencia de  $A_j$  sobre  $A_i$ .
- Axioma 2 (Homogeneidad): Cuando se comparan dos alternativas, el decisor nunca juzga a una como infinitamente superior a la otra, bajo ningún criterio. De otra forma; para comparar dos elementos de acuerdo a un criterio dado, hay que disponer de una escala acotada.

Bajo el contexto metodológico, la homogeneidad apunta a que los elementos a comparar deben ser de un mismo orden de magnitud. Al construir el modelo jerárquico todos los elementos que se desprenden (hijos) de un determinado elemento deben ser parecidos, si en un modelo, los subcriterios que describen completamente al criterio padre, no cumplen esta condición es necesario agregar niveles intermedios para separar los distintos órdenes de magnitud.

- Axioma 3 (Dependencia): Los problemas de decisión pueden ser formulados como una jerarquía.

Este axioma apunta a la posibilidad de comparar elementos en la jerarquía, es necesario tener controlada la dependencia entre los elementos de dos niveles consecutivos (externo-dependencia) y dentro de un mismo nivel (interno-dependencia). Un modelo jerárquico se caracteriza por que sus elementos tienen externo-dependencia unidireccional, es decir, los hijos dependen de sus padres y no hay relación entre ellos.

- Axioma 4 (*Expectativas*): La jerarquía es un modelo que representa todos los criterios y alternativas.

Este axioma está relacionado con la necesidad de agregar o eliminar alternativas a modo de representar fielmente la percepción de los actores involucrados en el proceso de decisión.

Los axiomas anteriores constituyen el marco que delimita como abordar las dos principales tareas del método AHP: formular y resolver el problema como una jerarquía y explicitar los juicios en forma de comparaciones de a pares.

Explicitar las prioridades para cierto conjunto de alternativas bajo un criterio dado implica, como hemos visto en los apartados anteriores, completar una matriz de dimensión  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de alternativas a comparar. Sin embargo, dado que las comparaciones son recíprocas por el Axioma 1, sólo se necesita hacer  $n(n-1)/2$  comparaciones de pares.

#### **III.4. Proceso Analítico en Red (ANP)**

Como complemento a lo expuesto anteriormente sobre el Proceso Analítico Jerárquico y teniendo en cuenta que ANP fue desarrollado con el objetivo de extender las capacidades de AHP a casos en los que existe interdependencia y retroalimentación entre los elementos del sistema (Saaty, 1996), hemos considerado oportuno ampliar, en este punto, la información aportada sobre este método en el Capítulo II.

ANP puede ser utilizado como un instrumento eficaz en casos en los cuales las interacciones entre los elementos de un sistema forman una estructura de red. ANP sustituye las jerarquías utilizadas en AHP por redes y contempla dos fases: la primera es la construcción de la red y la segunda comprende el cálculo de las prioridades de los elementos en la red. Para construir la estructura del problema, todas las interacciones entre criterios y alternativas deben ser consideradas. Una vez que la red está completada, se realizan las comparaciones por parejas en función de las interacciones que existan entre los criterios considerados.

A partir de ese punto, podemos ya considerar que el método está compuesto por jerarquías de control, conglomerados, nodos, interrelaciones entre nodos e

interrelaciones entre conglomerados. El proceso de modelización puede descomponerse en varios pasos o etapas operativas (Saaty 2001):

- 1) En primer lugar, hay que representar el problema mediante un modelo en red que es un sistema constituido por subsistemas que a su vez integran componentes o nodos (clusters) que contienen elementos. Estos elementos pueden interactuar o influir sobre algunos o todos los elementos de otro nodo (dependencia externa) respecto de una propiedad que gobierna las interacciones de todo el sistema. También puede existir una relación entre los elementos de un mismo nodo (dependencia interna) respecto a una propiedad común. Estas relaciones, se pueden apreciar en el gráfico siguiente.

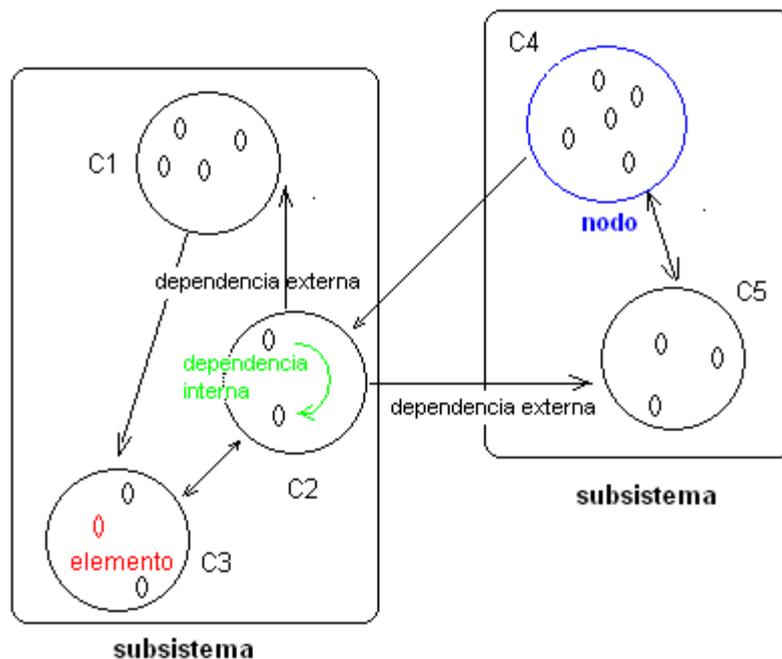


Fig. III – 2: Relaciones en un sistema ANP

La red podría haber sido más simple y estar constituida únicamente por nodos (criterios) y elementos (subcriterios) o más compleja y estar integrada por más de dos subsistemas cada uno integrado por un mayor número de nodos.

Por C1, C2, ..., C5 se han representado los nodos del sistema. Siempre ha de existir un nodo (o componente) denominado alternativas cuyos elementos son las diferentes alternativas posibles. La red de componentes y sus relaciones se mide en función de los denominados criterios de control que pueden ser varios o uno

sólo, en este último caso la red se construye desde un único punto de vista y éste único criterio de control es la meta.

- 2) En la siguiente etapa operativa, tiene lugar la realización de las comparaciones pareadas y valoración de las ponderaciones relativas. La determinación de las ponderaciones relativas en ANP está basada en la realización de comparaciones pareadas al igual que en AHP. La calificación  $a_{ij}$  en la matriz de comparaciones pareadas  $\mathbf{A}$  representa la importancia relativa del elemento situado en la fila  $i$ -ésima respecto del componente situado en la columna  $j$ -ésima, es decir,  $a_{ij} = w_i / w_j$ .

Siguiendo la idea central de AHP, en lugar de realizar una asignación de ponderaciones  $w_i$  y  $w_j$  a los elementos  $i$  y  $j$ , se evalúa el peso relativo  $w_i / w_j$  para cada par de elementos. Una vez realizadas todas las comparaciones, el vector de prioridades  $\mathbf{w}$  se calcula por medio de la solución única del sistema:

$$\mathbf{Aw} = \lambda_{\max} \mathbf{w},$$

donde  $\lambda_{\max}$  es el autovalor principal de  $\mathbf{A}$  y  $\sum_i w_i = 1$ , la normalización modo distributiva que garantiza la unicidad.

Al igual que hemos visto anteriormente en el caso del AHP, también ANP permite valorar la inconsistencia en la emisión de juicios mediante el índice de consistencia (IC) que viene dado como:

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1).$$

Siendo la razón de consistencia  $RC = IC/IC(A)$ , donde  $IC(A)$  es el índice de consistencia aleatorio (promedio) obtenido al simular juicios de  $\mathbf{A}$  en la escala de Saaty. Si es menor que 0,1 la consistencia suele considerarse aceptable (Saaty, 1980).

- 3) A continuación debe obtenerse la supermatriz original (o inicial), colocando las ponderaciones dentro de una matriz que traduce las interrelaciones entre todos los elementos del sistema. La supermatriz tiene la siguiente forma:

		$C_1$				$C_2$				....	$C_m$			
		$e_{11}$	$e_{12}$	....	$e_{1n1}$	$e_{21}$	$e_{22}$	....	$e_{2n2}$	....	$e_{m1}$	$e_{m2}$	....	$e_{mnm}$
$C_1$	$e_{11}$	$P_{11}$				$P_{12}$				....	$P_{1m}$			
	$e_{12}$													
	....													
	$e_{1n1}$													
$C_2$	$e_{21}$	$P_{21}$				$P_{22}$				....	$P_{2m}$			
	$e_{22}$													
	....													
	$e_{2n2}$													
....		....				....				....	....			
$C_m$	$e_{m1}$	$P_{m1}$				$P_{m2}$				...	$P_{mm}$			
	$e_{m2}$													
	....													
	$e_{mnm}$													

En la matriz anterior, consideramos que:

$C_i$  son los nodos del sistema.

$n$  es el número de elementos de cada nodo.

$e_{ij}$  son los elementos del nodo  $C_i$  siendo  $j = 1, 2, \dots, n_i$

$P_{ij}$  es el bloque  $ij$  de la supermatriz y recoge la influencia de los elementos de  $C_i$  sobre los de  $C_j$ . Los bloques  $P_{ii}$  recogen la dependencia interna correspondiente a los elementos que integran el nodo  $C_i$ .

- 4) Posteriormente, debe generarse la supermatriz ponderada, transformando la supermatriz inicial en una matriz donde cada una de sus columnas sume uno (estocástica por columnas). Para ello cada uno de los elementos incluidos en un bloque de la supermatriz se multiplica por la ponderación asociada al conglomerado. El autovector obtenido a partir de las comparaciones en el nivel conglomerado se emplea para ponderar los bloques asociados a los conglomerados.

5) A continuación, se tienen que calcular los vectores y ponderaciones de prioridad globales. La supermatriz ponderada se eleva a potencias sucesivas (Saaty, 1996) hasta que converge, a la matriz que obtenemos en este proceso se le denomina supermatriz límite, existiendo dos tipos de ella:

- *Cíclica*: Se da cuando no existe un único límite de la supermatriz, produciéndose tras varias iteraciones un proceso en el que aparecen varias matrices límite. En este caso, la supermatriz límite se considera que es la obtenida hallando la media aritmética de las prioridades obtenidas en cada una de las matrices límite mencionadas.
- *No cíclica*: el proceso de potencias sucesivas converge hacia un límite que es la supermatriz límite.

El proceso de elevar a potencias sucesivas la supermatriz ponderada, hasta que converge o se obtienen ciclos, tiene como finalidad obtener una secuencia infinita de matrices de influencia (recogen la transmisión de influencia entre todos los posibles caminos de la supermatriz) que denotaremos por  $\mathbf{W}^k$  siendo  $K = 1, 2, 3, \dots$ . Como comentamos anteriormente, es posible considerar el límite de la media aritmética de la secuencia de potencias para obtener las prioridades límite que consideran todo tipo de influencias (directas e indirectas):

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{W}^k$$

Dado que si una serie converge a un límite su suma de potencias sucesivas también converge hacia el mismo límite, para calcular el límite de la serie de potencias sucesivas de la supermatriz basta con conocer el límite de esta serie y además este límite existe y es único.

6) Finalmente, con objeto de verificar la consistencia de los resultados obtenidos, realizaremos el Análisis de sensibilidad que consiste en variar (menos del 10%) el valor de los pesos finales de algún criterio o alternativa y observar qué influencia tiene este cambio sobre los demás pesos.

### **III.5. Justificación del empleo de AHP en la investigación**

Como se ha visto el principal problema de la toma de decisiones en problemas complejos es hallar la mejor solución entre un conjunto de alternativas, que son evaluadas por múltiples criterios en conflicto. Estos criterios pueden ser intuitivos, racionales e irracionales y en su valoración participan diversos actores. Para resolver este tipo de problemas surgió en 1970 el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) desarrollado por el matemático Thomas Saaty, quien formalizó la comprensión intuitiva de éste tipo de problemas mediante la construcción de un Modelo Jerárquico que ya hemos estudiado ampliamente en el presente Capítulo.

Posteriormente, diversos autores han realizado estudios comparativos, en los cuáles se busca comparar el método AHP con otros métodos de decisión multicriterio discretos (Teoría del Valor Multiatributo, VISA, ELECTRE, PROMETHEE, etc.) en este contexto, Brugha (2004) muestra que el método AHP requiere un mayor esfuerzo cognitivo y ofrece mayores ventajas para visualizar, ordenar y escoger la mejor solución entre diversas alternativas, esto último lo ratifica el análisis de Cho (2003) que realiza la comparación detallada de los datos por parejas, concluyendo que el método AHP presenta la mejor selección de alternativas. Ambos estudios ratifican la superioridad del Proceso Analítico Jerárquico sobre otros métodos, que han sido revisados en el Capítulo II, para resolver problemas que implican una decisión multicriterio.

Además, Saaty (2008) nos refiere que hasta 2008 se han realizado centenares de aplicaciones del AHP por parte de equipos de investigación y desarrollo pertenecientes a universidades, empresas y gobiernos, entre ellas podemos citar su uso por IBM para seleccionar su estrategia de mejora de la calidad para diseñar el sistema AS/400. En 2001 fue utilizado para seleccionar el mejor lugar para reedificar la ciudad turca de Adapazari destruida por un terremoto. British Airways lo usó en 1998 para seleccionar el sistema de entrenamiento para su flota de aviones. En 1987 se utilizó para seleccionar el mejor tipo de plataforma de extracción petrolera que sería necesario construir en el Atlántico Norte, y uno de los factores que tuvo un mayor peso fue el costo de su posterior desguace (como ocurre en el caso de los aerogeneradores, que su instalación y desinstalación son operaciones muy costosas). Xerox Corporation utilizó AHP, en 1999, para seleccionar sus proyectos de investigación de forma que se

ajustaran al presupuesto disponible. En ese mismo año, Ford Motor Company también utilizó AHP para establecer las prioridades a la hora de lograr una mayor satisfacción del cliente con sus productos y servicios.

Más recientemente, también encontramos aplicaciones de AHP, sin integración con otras técnicas, para resolver problemas de selección de proveedores, materiales, tecnología y maquinaria, entre dichas aplicaciones, podemos mencionar: selección de proveedores para una empresa de construcción (Bayazit, 2006), selección de una tecnología de red de acceso inalámbrica (Martín y Moreno, 2007), selección de sistemas automáticos para edificios inteligentes (Wong, 2008), evaluación de alternativas tecnológicas y operativas para la recogida de aceite en la industria petrolera (Castillo, 2009), selección de sistemas de limpieza para motores (García, 2009), selección de materiales aislantes (Azizi, 2009), selección de paquetes de software (Jadhay, 2009), selección de plantas de energía solar (Aragónés, 2009) selección de tecnologías nucleares (Lee, 2010).

Muchas otras aplicaciones de AHP a procesos de evaluación y selección de tecnología, proyectos de ingeniería y maquinaria, podemos encontrarlas descritas en detalle en el Capítulo II (apartados II.3.2.7 y II.3.2.9) de la presente tesis y en las memorias de las diez reuniones del ISAHP (International Symposium on the Analytic Hierarchy Process) que se han llevado a cabo hasta agosto de 2009. Desde el Octavo Congreso (ISAHP 2005) hasta el celebrado en 2009 se pueden encontrar en sus actas múltiples aplicaciones del AHP en el campo de los negocios, la industria y el medio ambiente y, de entre ellas, aplicaciones relacionadas con nuestro ámbito de trabajo: Identificación de tecnologías para la disposición de basura en condominios, Programación óptima de sistemas de aire acondicionado, Marco estratégico para la integración de ciencia y tecnología en el desarrollo de productos, Selección de biotecnológicas para la agricultura, Evaluación de compatibilidad de software en procesos industriales, Evaluación de impacto ambiental, Selección de software, Selección de materiales para la construcción, Selección de maquinaria industrial y Selección de plantas de energía solar.

Por todos los motivos expuestos anteriormente, el proceso que elegimos para analizar y proponer una solución al problema de selección de aerogeneradores mediante métodos de decisión multicriterio es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), ya que es un método discreto y ofrece ciertas ventajas respecto a otros procedimientos, como son: su simplicidad y claridad.

AHP es una sencilla, lógica y estructurada metodología de trabajo, basada en la descomposición del problema en una estructura jerárquica; el hecho de que este procedimiento permita adicionalmente realizar el análisis de sensibilidad, para observar y estudiar otras posibles soluciones al hacer cambios en la importancia (ponderación) de los elementos que definen el problema de decisión.

AHP frente a ANP, que hemos revisado en el apartado III.4, tiene la ventaja de que, a pesar de que ANP fue desarrollado con el objetivo de extender las capacidades de AHP, lo fue para casos en los que existe interdependencia y retroalimentación entre los elementos del sistema (Saaty, 1996) y en nuestro problema no existen ninguno de esos dos tipos de relación. Sólo existen relaciones jerárquicas entre niveles claramente definidos.

También influye en nuestra decisión, aunque en menor medida, la existencia de diversas herramientas informáticas, disponibles en el mercado, que proporcionan apoyo para la aplicación de AHP. Entre ellas cabe destacar Expert Choice que trabaja en ambiente Windows y DOS, es de fácil uso y sirve como mecanismo de derivación de consensos participativos y que será una de las herramientas que utilizaremos en nuestra investigación. El desarrollo del Expert Choice ha sido supervisado por Saaty, al igual que otra herramienta denominada Superdecision. Ambas, han demostrado su alta fiabilidad tras ser aplicadas reiteradamente, y con resultados satisfactorios, en investigaciones de naturaleza similar a la nuestra. La utilización de este software permite estudiar, de forma rápida y sencilla, la sensibilidad de los resultados (decisión) a los diferentes cambios posibles, pudiendo analizarse el problema planteado en escenarios distintos, como veremos dentro del Capítulo VI para el caso de Expert Choice (versión 11). También proporcionan ambas el soporte de cálculo necesario a partir de la definición de la jerarquía y el establecimiento de prioridades por parte de los expertos (decisores) basándose en la escala de Saaty que se muestra en la Tabla II-2.

### **III.6. Conclusiones**

Con la información contenida en este Capítulo se ha cumplido el objetivo inicial descrito en el apartado III.1 y el segundo objetivo específico de la investigación (apartado *I.4.2.1 Objetivos de la investigación*), pues se ha descrito el marco teórico en el que se asientan los Métodos de Decisión Multicriterio Discretos (MDMD) en los cuales se haya integrado el Proceso Analítico Jerárquico. También se han descrito los fundamentos del AHP, exponiendo sus axiomas, la justificación matemática del método y de la escala utilizada. Tomando como referencia los trabajos y opiniones de los autores que aparecen en la literatura revisada, concluimos que AHP es el método de Decisión Multicriterio Discreto más apropiado para llevar a cabo nuestra investigación.

Alcanzado el segundo objetivo específico, y siguiendo la secuencia trazada en el Capítulo I, será necesario proceder, en el Capítulo IV, al análisis de los sistemas de generación de energía eólica existentes y con mayor implantación en el mercado español.



## **Capítulo IV**

**Sistemas de generación de energías renovables.**

**Aerogeneradores.**



## IV.1 Introducción

Uno de los objetivos específicos de la presente investigación es analizar los sistemas de generación de energía eólica existentes y con mayor implantación en el mercado español. En cumplimiento de este objetivo, en el presente capítulo, hacemos una revisión de las principales características de la energía eólica y de la producción de electricidad a partir de ella mediante los distintos tipos de generadores que se encuentran en el mercado o que están en vías de diseño y desarrollo.

También nos planteamos la necesidad de conocer las tendencias en la generación de energías renovables para el año 2015, para lo cual revisamos que investigaciones se están llevando a cabo en torno a la producción de aerogeneradores y sus componentes.

La primera finalidad que nos planteamos con este proceso de revisión es obtener la información necesaria para diseñar un cuestionario que nos permita conocer la opinión de los expertos en el área de las energías renovables y, a partir de ella, aplicar AHP para establecer que alternativa de aerogenerador será la mejor en el horizonte temporal fijado y, de acuerdo con ella, proporcionar pautas a la industria.

Para llevar a cabo lo expuesto anteriormente, tomamos como referencia los estudios realizados por Red Eléctrica Española (REE), Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), Asociación Empresarial Eólica (AEE) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT); analizamos la evolución de la producción eléctrica a partir de energía eólica, la comparamos con las obtenidas a partir de otras fuentes de energías renovables y planteamos las tendencias tecnológicas en el sector a medio y largo plazo. También abordamos, dentro de los temas que acabamos de mencionar, la normativa reguladora y la incidencia de la subvención a la producción.

## IV.2. Características de la energía eólica

Energía es la cantidad de trabajo que un sistema físico es capaz de producir. La energía puede ser convertida o transferida en diferentes formas: la energía cinética del movimiento de las moléculas de aire puede ser convertida en energía rotacional por el rotor de una turbina eólica, que a su vez puede ser convertida en energía eléctrica por el generador de dicha turbina. En cada conversión de energía, parte de la energía proveniente de la fuente es convertida en energía calorífica.

La producción de energía aprovechando la energía cinética del movimiento de las moléculas de aire (viento) es lo que denominamos energía eólica (Rittenhouse 2003). Con una máquina eólica aprovechamos la diferencia de velocidades del viento entre la entrada y la salida mediante una aeroturbina. La energía por unidad de tiempo, o potencia extraída, viene dada por la ecuación:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Energía}}{\text{tiempo}} = C_p \left( \frac{l}{2} V_1^2 \right) \left( \rho V_1 \frac{\pi D^2}{4} \right) = C_p \frac{l}{2} V_1^3 \frac{\pi D^2}{4}$$

Vemos que la potencia es función de la velocidad de entrada en la máquina, del diámetro de los álabes, la masa por unidad de tiempo y del factor  $C_p$ , que tiene en cuenta que el área de captación es menor que el de la aeroturbina y tiene un valor máximo posible, denominado límite de Betz, para el que  $C_p = 16/27$ . En la práctica oscila entre 0,4 y 0,5.

La aeroturbina, según el lugar de su instalación, está sometida a vientos de diferente intensidad, y las condiciones de funcionamiento para el máximo coeficiente de potencia antes indicado corresponden a una velocidad determinada del viento, que depende fundamentalmente del tipo de aeroturbina, tamaño y velocidad de giro. Podría conseguirse un funcionamiento siempre con la máxima potencia si la velocidad de giro variase proporcionalmente al viento incidente. Esto presenta una serie de problemas técnicos (Fariñas y Bermúdez, 2006), a los que se está encontrando solución y de hecho existen ya aerogeneradores, que contemplamos en este Capítulo e incorporamos a la encuesta, que dan respuesta positiva a este problema aunque continua la investigando en este terreno, siendo actualmente una de las líneas prioritarias de investigación.

Las máquinas eólicas tienen limitaciones de funcionamiento incluso en el caso de que haya viento. Su funcionamiento está limitado a unas velocidades intermedias de viento, entre 3,5 m/s y 25 m/s aproximadamente, consiguiendo que la potencia producida desde la mínima a la nominal aumente linealmente. Al instalar una aeroturbina aislada o un parque eólico, se busca fundamentalmente que la energía obtenida sea máxima y que las cargas turbulentas que deben soportar las máquinas, y que acortan su vida, sean lo menores posibles.

En el caso de los parques eólicos, hay que tener en cuenta la interferencia entre aeroturbinas, por lo que se busca la forma más adecuada de situar las máquinas, de manera que se aprovechen aquellos lugares con mayor potencial eólico, minimizando los efectos nocivos que se deriven. Si tenemos muchas máquinas situadas en un terreno no uniforme que tiene interferencias, la dirección y la intensidad del viento varían de máquina a máquina, debido a los efectos orográficos y al de las estelas que producen al funcionar.

En el caso de una aeroturbina aislada, si se conoce la velocidad del viento, a partir de las curvas que relacionan la velocidad media con la nominal se puede estimar la energía anual que daría esa máquina. En este caso, el factor de utilización es el siguiente:

$$\text{Factor de utilización} = \frac{\text{Energía anual}}{(\text{Potencia nominal}) \times 8.760 \text{ horas}}$$

Se considera que factores de utilización mayores que 0,25 son aceptables.

El factor de utilización depende solamente del cociente:  $V_{\text{media}} / V_{\text{nominal}}$ . El factor de utilización será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad media del lugar y menor sea la velocidad de diseño de la aeroturbina. Las máquinas modernas tienen una velocidad nominal que oscila entre los 12 y 15 m/s, por lo que los valores del factor de utilización corresponderán a unos valores de la velocidad media del lugar calculada entre 4,8 m/s y 6 m/s siendo el factor de utilización de 0,2.

### **IV.3 Aerogeneradores. Tipología.**

La primera referencia de un molino de viento corresponde a Hero de Alejandría, y se sitúa en el siglo I o II a.C. Según Golding (1955), se trataba de un molino de viento de eje horizontal usado para mover el fuelle de un órgano.

En China, en cambio, ya se utilizaban molinos de eje vertical, con velas radialmente dispuestas constituyendo un rotor horizontal. La referencia documental más antigua se remonta al año 1219 d.C., por lo que no es demostrable que los molinos de viento en China daten de hace más de 2.000 años. Los primeros molinos de viento realmente útiles para realizar trabajos se utilizaron en Persia en el siglo VII d.C.

Sobre el 1100 d.C. se empiezan a construir en Inglaterra y Francia los primeros molinos de viento de eje horizontal y cuatro palas y, posteriormente, en el siglo XIII, se encontraron en Alemania, Dinamarca y Holanda. Su uso era la molienda de grano. Los molinos holandeses, desde el siglo XIV, se empleaban para el bombeo de agua.

Todo ello hace ver que la tecnología para el aprovechamiento de la energía eólica es muy antigua, aunque sólo desde 1890 se ha iniciado su empleo para producir energía eléctrica. Fue William Thomson el primero que propuso su uso para producir electricidad en dicho año (Ríos 2005).

#### ***IV.3.1. Tipos de aerogeneradores según la posición del eje***

##### ***a) De eje horizontal***

Los aerogeneradores más usuales son los de eje horizontal. Las máquinas de eje horizontal pueden ser lentas o rápidas, según sea la velocidad típica de la punta de la pala, definida a través de su velocidad específica. Son máquinas lentas las que se caracterizan porque su velocidad de rotación es baja, por lo que tienen un gran número de palas (multipalas), habitualmente entre 12 y 14 que cubren casi toda la superficie del rotor. Tienen un elevado par de arranque, gracias al cual pueden ponerse en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas. Su velocidad de rotación (velocidad específica entre 2 y 5 m/s) hace que sean poco útiles para producir energía eléctrica, por lo que se emplean fundamentalmente para el bombeo de agua generalmente en zonas aisladas.

Las máquinas de eje horizontal rápidas tienen una velocidad específica entre 8 y 10 m/s, su velocidad de rotación es elevada y el número de palas reducido (dos, tres o cuatro). Su par de arranque es menor y necesitan que el viento tenga mayor velocidad para arrancarlas, o bien disponer de algún medio auxiliar. Son más ligeras, soportan esfuerzos menores y su conexión a la red eléctrica es más fácil. Por todo ello, son los dispositivos aeromecánicos más utilizados para la generación de energía eléctrica.

#### *b) de eje vertical*

Son máquinas en las que el rotor se mueve debido a los esfuerzos de arrastre que el viento origina en dirección perpendicular al eje de giro. Se caracterizan porque los álabes sólo soportan esfuerzos de tracción. Este tipo de máquina presenta ciertas ventajas sobre las de eje horizontal: no necesita regulación frente al cambio de velocidad del viento puesto que se autorregula, entra en pérdida a velocidades elevadas del viento y permite instalar el generador sobre el terreno, lo que facilita el mantenimiento. Pero presenta inconveniente de necesitar un motor de arranque, y su rendimiento es menor que el de las máquinas de eje horizontal, a igualdad de potencia.

### **IV.3.2. Tipos de aerogeneradores según el generador utilizado**

#### *a) De corriente continua*

Generalmente se caracterizan por ser aerogeneradores pequeños que funcionan de forma aislada, no están conectados a la red eléctrica y tienen como función alimentar baterías que cubren las necesidades de energía eléctrica de pequeños enclaves en zonas habitualmente aisladas (casas, granjas, etc.).

#### *b) De corriente alterna*

b.1 asíncronos: Se caracterizan por su facilidad de conexión a la red, la ausencia de contactos móviles, por admitir un ligero deslizamiento de velocidad con respecto a la de sincronismo, su sistema de control es sencillo, su coste es el menor de entre los de

corriente alterna y son más robustos que los demás de este tipo. Presentan el inconveniente de que requieren estar acoplados a la red eléctrica para funcionar.

b.2 síncronos: Se caracterizan porque son capaces de producir energía reactiva y funcionar de forma autónoma, su rendimiento suele ser mayor que los generadores asíncronos y soportan bien los huecos de tensión (Bueno 2005). Presentan una serie de inconvenientes respecto a los asíncronos: No admiten deslizamiento con respecto a la velocidad de sincronismo, su control y conexión a la red es más complicada.

### ***IV.3.3 Aerogenerador de eje horizontal. Componentes***

El aerogenerador más empleado es el de eje horizontal con tres palas, de perfil aerodinámico. La aeroturbina de eje horizontal es la que da un mayor coeficiente de potencia con una mayor velocidad específica. Esta alta velocidad es conveniente para facilitar el acoplamiento a la red sin tener que hacer grandes inversiones en el generador, por el número de polos o el empleo de transmisiones que incrementen su velocidad mediante una relación de multiplicación elevada.

Los componentes de una aeroturbina de eje horizontal son las palas, que es el elemento fundamental que capta la energía del viento, mediante la acción de las fuerzas aerodinámicas, que transmiten su giro a un eje alojado en la góndola, donde están situados, entre otros elementos, el generador eléctrico, el multiplicador, la caja de cambios, y los sistemas de control, orientación y freno. La góndola reposa sobre una placa sobre la que gira, cambiando el ángulo de guiñada, orientando la aeroturbina para que su eje de giro sea paralelo al viento. La placa está sobre una torre, que se cimenta en el terreno. La góndola soporta toda la maquinaria de la turbina y debe ser capaz de rotar para seguir la dirección del viento, por lo que se une a la torre mediante rodamientos. El diseño de la góndola está condicionado a la posición de los componentes del tren de fuerza (eje del rotor con los cojinetes, caja multiplicadora, generador, acoplamiento y freno). En aeroturbinas de velocidad variable, la pala puede girar alrededor de su eje longitudinal. Los demás componentes fundamentales de una aeroturbina de eje horizontal son:

- Generador eléctrico: El generador puede ser síncrono o asíncrono, cada uno de los cuales posee las características que vimos anteriormente, entre ellas cabe destacar aquí que el generador asíncrono es más barato y permite que tenga un

cierto deslizamiento lo que hace que el funcionamiento de la aeroturbina sea más suave. En cambio, consume energía reactiva lo que disminuye la calidad de la energía producida. En la actualidad hay máquinas que funcionan con velocidad variable, lo que tiene algunas ventajas. El aerogenerador da mayor potencia para una menor velocidad dado que se consigue extraer más energía del viento porque se puede modificar la velocidad de giro proporcionalmente a la velocidad del mismo. También se reduce el ruido aerodinámico en el caso de vientos con baja velocidad ya que las palas giran más despacio y el rotor actúa como un volante de inercia, suavizando las oscilaciones del par motor. En aplicaciones comerciales ya hay generadores de dos velocidades. En los aerogeneradores de dos velocidades se ha pasado de tener dos generadores a generadores con doble bobinado, por lo que, según sea necesario, el generador funciona como una máquina de diferente número de polos. Los generadores actuales pueden funcionar como si tuviesen 4 ó 6 polos. Los inconvenientes de este diseño son la elevada complejidad de funcionamiento de los conmutadores y que se pierde energía cuando el generador se desconecta para cambiar de velocidad. En el caso de las máquinas síncronas se puede eliminar la caja de cambios; en este caso, el número de polos del generador es elevado, por consiguiente de mayor peso.

- Eje de alta velocidad gira aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (r.p.m.), lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia.
- Freno mecánico: Además de los frenos aerodinámicos, los aerogeneradores llevan por normativa un freno mecánico. Normalmente, cuando el aerogenerador se para con el freno aerodinámico entra en funcionamiento el mecánico. Los frenos suelen estar actuados hidráulicamente. Mediante el sistema hidráulico es posible restaurar los frenos aerodinámicos del aerogenerador.
- Eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de pequeña potencia (600 kW) el rotor gira a unas 19 a 30 r.p.m. El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.
- Control de orientación: En casi todos los aerogeneradores la góndola y las palas giran, de manera que se orienten alineadas en función de la dirección del viento. El control de la orientación es activo. Cuando un motor mueve la góndola mediante

una reductora, consiguiendo que la velocidad de giro sea muy reducida. También existen aeroturbinas auto-orientables, aunque deben tener algún sistema que reduzca su velocidad de orientación para evitar cargas excesivas (ver Figura 3). Casi todos los aerogeneradores de eje horizontal emplean orientación forzada, es decir, utilizan un mecanismo que mantiene la turbina orientada en contra del viento mediante motores eléctricos y multiplicadores.

- Torre: Es el elemento que soporta la góndola y el rotor. Su altura viene a ser aproximadamente igual al diámetro del rotor. Se han construido hasta 2007 exclusivamente en estructura tubular tronco - cónica de acero, pero actualmente se están desarrollando en otros materiales, siendo las de próxima implantación (2008) de tecnología de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en el caso de aerogeneradores pequeños.
- Anemómetro y veleta: su misión es medir la magnitud de la velocidad del viento e indicar su dirección. Los más utilizados consisten en tres o cuatro cazoletas soportadas por la misma cantidad de brazos radiales que giran el conjunto horizontalmente. Proporcionan esos datos al sistema de control de orientación.
- Unidad de refrigeración: contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad de refrigeración del aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.

Además de los componentes descritos, hay que considerar que la mayoría de generadores que se comercializan incorporan caja multiplicadora cuya función es acoplar las bajas velocidades de rotación del rotor y las altas velocidades del generador, y soportar las amplias variaciones de la velocidad del viento. La relación de transmisión del multiplicador está determinada por su tren de engranajes (planetario o tándem o híbridos), constituido en los aerogeneradores actuales por ruedas dentadas cilíndricas de ejes paralelos, cuyos dientes al engranar vinculan sus frecuencias de rotación.

En la figura siguiente se muestra un aerogenerador de eje horizontal y se detallan todos los componentes mencionados anteriormente.

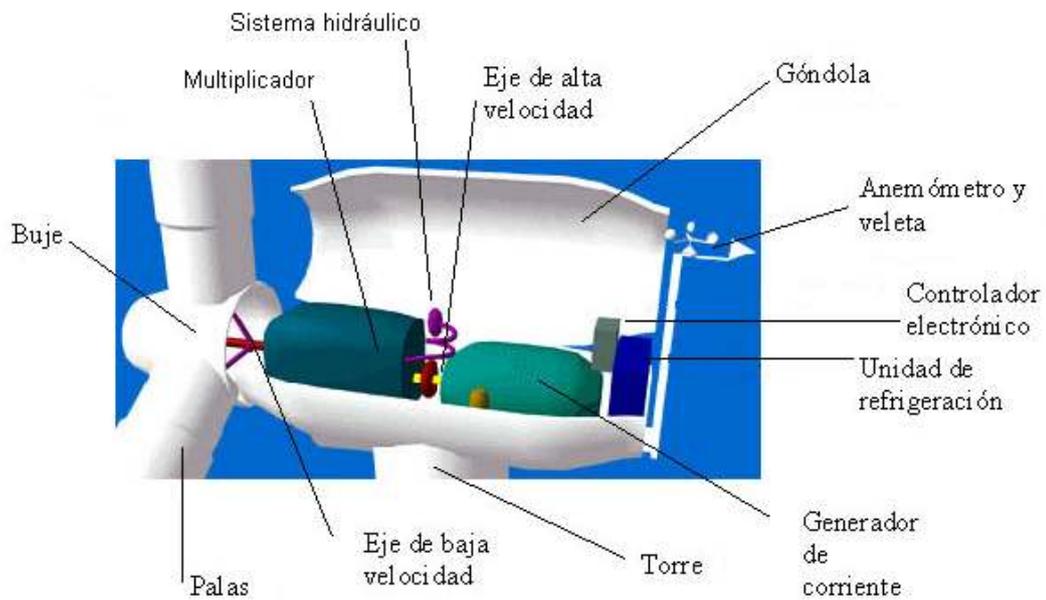


Fig. IV-1: componentes básicos de un aerogenerador

Para complementar la gráfica anterior, se pueden ver, en la fig. IV-8, los elementos de un generador real de 3Mw. Las nuevas tecnologías aplicadas en la fabricación de los componentes de los aerogeneradores, son descritas en los apartados siguientes.

#### IV.4. Evolución de la producción eléctrica a partir de energía eólica

En este apartado vamos a comparar la producción eléctrica obtenida a partir de la energía eólica, con la obtenida a partir de otras fuentes de energías y además analizaremos la evolución en la producción de energía eólica. Para ello utilizaremos fundamentalmente gráficos, el primero de los cuales se muestra a continuación y en él podemos apreciar que, en promedio anual, la energía eólica producida contribuía con un 11% a la cobertura de la demanda total de energía eléctrica en España (sistema peninsular) durante 2008. En el avance facilitado por Red Eléctrica Española (REE) se estima en un 13% esta cobertura.

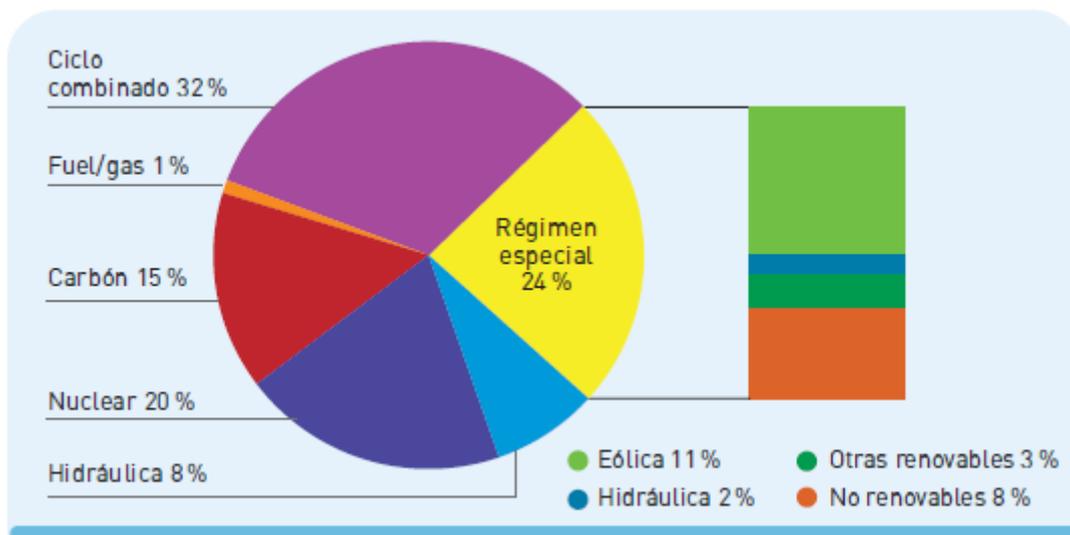


Fig. IV-2: Cobertura de la demanda anual (2008) de energía eléctrica en España peninsular

Fuente: Red Eléctrica Española

Ante el incremento de la demanda de energía eléctrica, el interés social por la conservación del medio ambiente y por lograr una relativa independencia energética del país hace que el futuro de la producción eléctrica implique el concepto de generación distribuida, optimizando recursos y minimizando pérdidas, en un contexto de respeto al entorno. Por todo ello, las energías renovables se presentan como fundamentales tanto en la actualidad como en el futuro y, en concreto, la producción de energía eólica que ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años apoyada por una política de subvención de la producción. En los dos gráficos siguientes podemos constatar esta afirmación observando en el primero la evolución anual de la potencia eólica instalada en España hasta diciembre de 2009 (fig. IV-3) y en el segundo (fig. IV-4) el incremento anual de la potencia eólica instalada, que en 2009 experimentó un aumento del 12,85% con respecto a 2008.

**EVOLUCIÓN ANUAL Y ACUMULADA DE LA POTENCIA EÓLICA. 1998-2009**

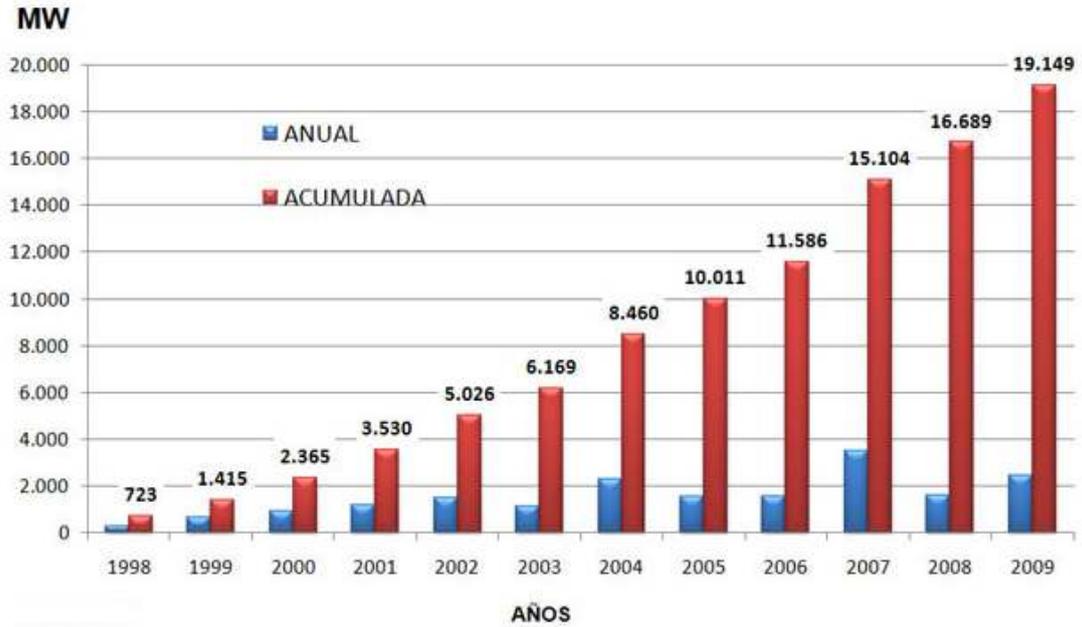


Fig. IV-3: Evolución anual de la potencia eólica instalada (1998-2009)

Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE)

**INCREMENTO ANUAL Y TASA DE VARIACIÓN DE LA POTENCIA EÓLICA INSTALADA**

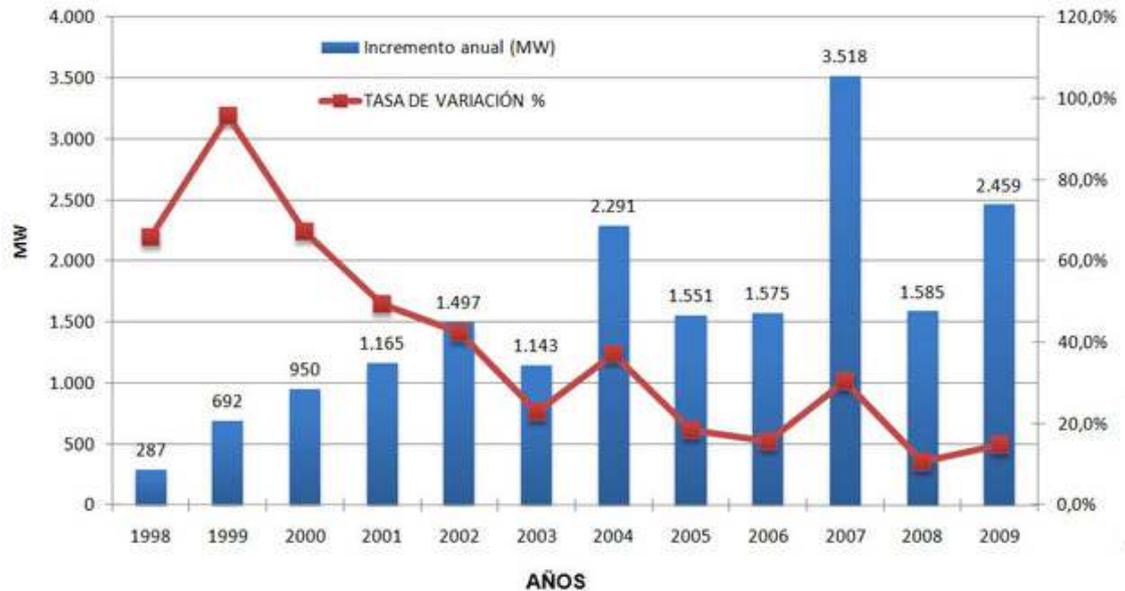


Fig. IV-4: Incremento anual de la potencia eólica instalada y tasa de variación (1998-2009)

Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE)

A 31 de diciembre de 2010 (cifra provisional de REE) la demanda peninsular de energía eléctrica se situó en 251.305 GWh, un 4,6% inferior a la del 2008, la primera tasa negativa anual de la serie histórica de registros de evolución de la demanda que arranca en 1985. Corregidos los efectos de la laboralidad y la temperatura el descenso anual fue del 4,3%.

Este notable descenso es el resultado de la acumulación de tasas negativas registradas en todos los meses del año, aunque se aprecian dos periodos diferenciados. Un periodo de fuerte caída que finaliza en abril con el mayor descenso (un 11,8%), a partir del cual se inicia una senda de descensos más moderados hasta situarse en diciembre en una tasa negativa del 2,3%. Los datos anteriores son un reflejo de la crisis que afecta a la economía española en el período mencionado.

La potencia instalada tuvo un crecimiento neto de 2.682 MW, lo que supone un incremento del 3% respecto al ejercicio anterior. Este aumento procede de la entrada de 568 MW de ciclo combinado y principalmente, de 2.576 MW de potencia eólica que ha llegado a los 18.119 MW al finalizar el año. En cuanto a las bajas, durante este ejercicio se ha producido el cierre de dos grupos de fuel con una potencia conjunta de 474 MW.

En cuanto al balance de generación, el 2009 se ha caracterizado por un descenso generalizado de casi todas las tecnologías que componen el régimen ordinario cuya producción ha disminuido un 12,7% respecto al año anterior, absorbiendo todo el descenso de la demanda. Por el contrario, el régimen especial ha aumentado su producción un 18,3%.

Respecto a la cobertura de la demanda, destaca el aumento del peso de las energías renovables que han cubierto este año, según datos provisionales, el 26% de la demanda, frente al 24% en el 2008. Analizando este dato por tecnologías, se observa que el mayor crecimiento lo registran la eólica y solar cuyas aportaciones a la demanda se han elevado al 13% y 3% respectivamente, (un 11% y un 1% en 2008). En el otro extremo se sitúan, los grupos de carbón que han reducido su producción un 25,8%, cubriendo apenas

el 12% de la demanda, dando lugar a que por primera vez en la historia la energía eólica supere a la de carbón en la cobertura de la demanda.

La energía eólica superó en varias ocasiones los anteriores máximos históricos de potencia instantánea, de energía horaria y de energía diaria. El 8 de noviembre se registró el último récord de energía diaria con 251.543 MWh, una producción que permitió cubrir el 44,9% de la demanda de ese día. Así mismo, en noviembre se produjo un máximo mensual de energía eólica que cubrió el 22,7% de la demanda de ese mes, superando por primera vez la aportación de la nuclear (un 19,5%). Sin embargo, la variabilidad que caracteriza esta energía ha dado lugar a situaciones extremas como la producida el mismo día 8 de noviembre (3.59 horas) en la que el 53,7% de la demanda fue cubierta con esta energía, mientras que el día 27 de agosto a las 9.49 horas apenas cubrió el 1%.

La demanda anual de energía eléctrica en el conjunto de los sistemas extrapeninsulares alcanzó los 15.569 GWh, un 1,9% inferior a la del año anterior. En Canarias el descenso fue del 2,1% y en Baleares el 1,9%. Por el contrario, Ceuta y Melilla registraron crecimientos del 1,8% y 1,5% respectivamente.

En la figura siguiente observamos, por comunidades autónomas, la potencia instalada en energía eólica en el período 2004 - 2008. El crecimiento diferenciado por comunidades se ha debido según la consultora Deloitte (informe 2008) a la existencia del recurso eólico en esa Comunidad, pero también al apoyo recibido por parte de los gobiernos autonómicos, estando en muchos casos el desarrollo de los parques eólicos ligado a planes industriales concretos.

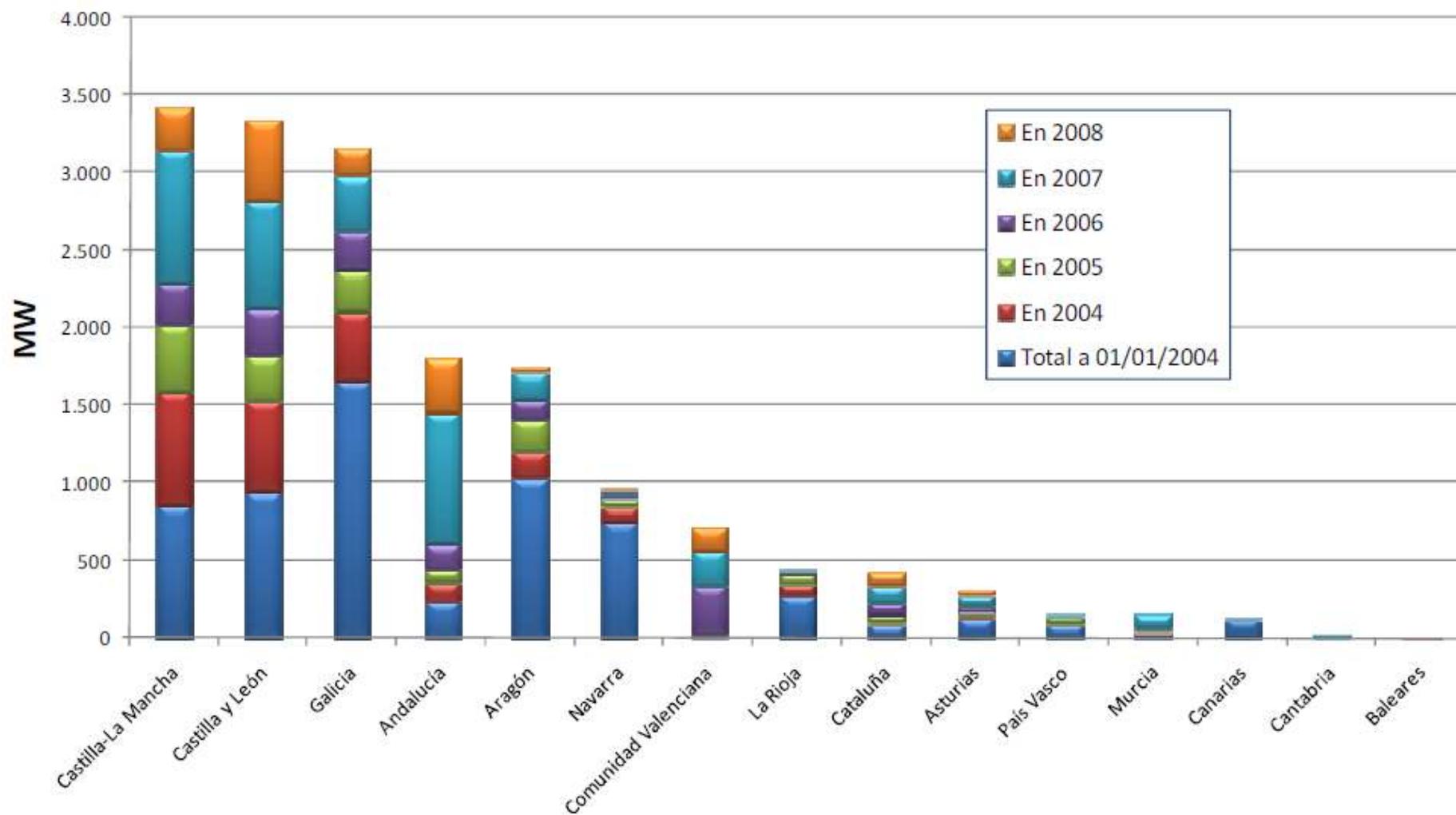


Fig. IV-5: Potencia eólica instalada en el período 2004 - 2008 por comunidad autónoma. Fuente: Observatorio AEE

En la fig. IV-6 observamos que la potencia eólica instalada en España en 2009 (19.149 Mw) superó las previsiones establecidas en el Plan de Energías Renovables (PER) y en los tres primeros meses de 2010 parece mantenerse la tendencia.

EVOLUCIÓN ANUAL DE LA POTENCIA EÓLICA INSTALADA Y PREVISIÓN SEGÚN EL PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2005-2010

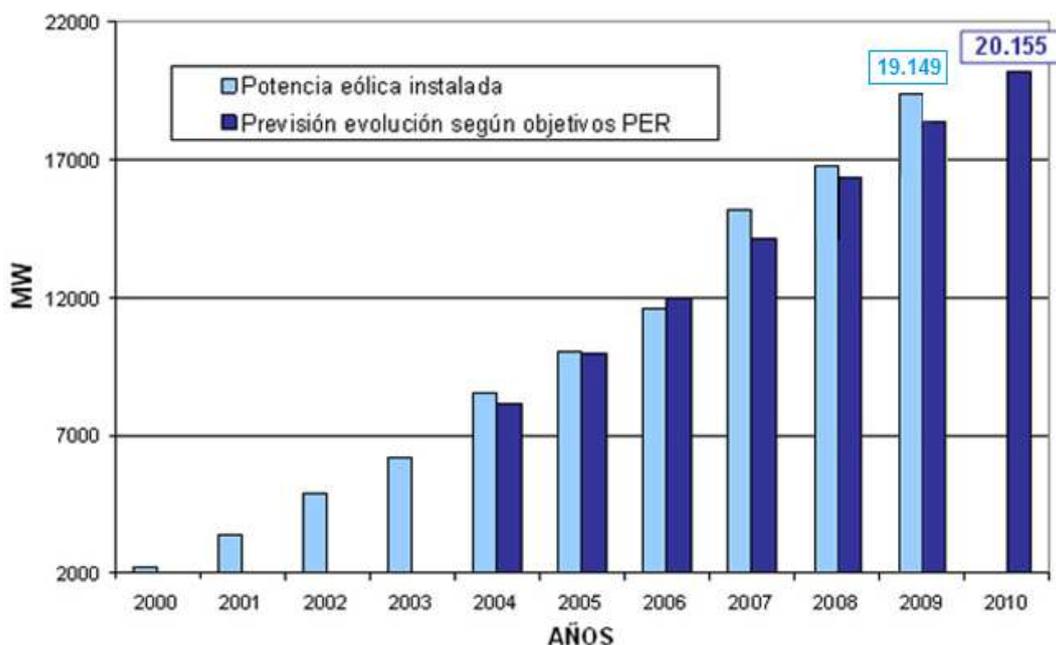


Fig. IV-6: Evolución de la potencia eólica instalada y prevista según PER

Fuentes: Asociación Empresarial Eólica (AEE) y PER

Como se aprecia en el gráfico anterior, mediante la aplicación del adecuado desarrollo tecnológico. El Plan de Energías Renovables 2005-2010 prevé una potencia total instalada de 20.155 MW. para el año 2010 (IDAE 2007).

Con objeto de conocer el dato de potencia eólica instalada en España, a 31 de diciembre de 2009, hemos consultado las cifras facilitadas oficialmente por los principales actores del sector eólico español: Comisión Nacional de Energía (CNE), Red Eléctrica de España (REE), Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA) y Asociación Empresarial Eólica (AEE).

Como resultado de esta consulta, hemos obtenido cifras dispares, tanto para el caso de la potencia eólica instalada durante 2009 en España, como de la acumulada hasta esa fecha. En lo que se refiere al primer dato (potencia instalada el año pasado), las cifras se sitúan entre 1.890 y 2.459 MW Mw eólicos nuevos. En lo que se refiere al segundo dato (potencia acumulada), las cifras facilitadas se sitúan entre 18.263 y 19.149 Mw.

La Comisión Nacional de Energía (CNE), en quien recae la responsabilidad de la facturación de todo el sector eléctrico, facilita la cifra de 2.459 Mw de nueva instalación y 18.970 Mw acumulados. El operador de la red, Red Eléctrica de España (REE), que monitoriza en tiempo real toda la potencia eólica conectada a la red, establece en 2.139 Mw los de nueva instalación y 18.263 Mw la potencia acumulada, estos datos son estimaciones, ya que no ha publicado oficialmente su informe anual. La Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA) estima, provisionalmente, 2.400 Mw de nueva instalación y 19.057 Mw acumulados. Finalmente, la fuente que en la práctica suele tomarse como referencia para el sector a escala mundial, la Asociación Empresarial Eólica (AEE), calcula que durante 2009 se han instalado en España 2.459 Mw y la potencia acumulada la sitúa en 19.149 MW.

Creemos que esta disparidad en las cifras proporcionadas por los cuatro actores se debe a la distinta forma de efectuar las mediciones que aplican los organismos mencionados: la AEE realiza sus estimaciones a partir de la suma de las actas de puesta en funcionamiento de los parques eólicos. Los cálculos de Red Eléctrica tienen su origen en la inscripción de los parques en un Centro de Control (CC), lo que se produce habitualmente entre dos y tres meses después. De hecho, eso explicaría en gran medida la diferencia entre los 19.149 Mw de potencia acumulada que nos facilita la AEE y los 18.263 Mw estimados por REE. No obstante, AEE admite que, aun ajustando las cifras para tener en cuenta este desfase, sigue habiendo una variación no explicable de entre 200 y 300 Mw.

Los Centro de Control (CC) también pueden explicar, en parte, la diferencia entre las cifras de AEE y REE. Como la obligación de inscripción a un CC entró en vigor el uno de enero de 2008, REE no contabilizaba algunos de los parques que entraron en funcionamiento en 2007 hasta que no se formalizó la inscripción en 2008. AEE, sin embargo, ya contabilizaba dichos parques en sus cifras de 2007, dado que disponían del acta de puesta en funcionamiento. Así puede explicarse la variación en las cifras de potencia acumulada.

A la vista de esta disparidad de valores, a 1 de abril de 2010, hemos decidido prescindir de datos posteriores a 31 de diciembre de 2008 en aras de la fiabilidad. Lo único que si podemos extraer como conclusión aplicable a nuestro trabajo de investigación es que continúa, con una tendencia similar a los dos últimos años, el crecimiento de la potencia instalada y de la potencia acumulada.

#### **IV.5. Productos actuales y tendencias tecnológicas en el sector**

En el desarrollo de las tecnologías de generación eólica se ha avanzado de forma muy significativa en el desarrollo de turbinas eólicas y generadores eléctricos. En el campo de las turbinas, y de las palas, los modelos comerciales alcanzan mayoritariamente una potencia de 2Mw y la tendencia es a superar los 3 Mw.

En el ámbito de los generadores eléctricos se ha pasado de las máquinas de inducción de jaula de ardilla con muy limitadas capacidades de control a máquinas síncronas multipolares con regulación de velocidad del rotor y control de potencia reactiva. El modelo de generador asíncrono doblemente alimentado es capaz de generar una tensión de valor eficaz y frecuencia constante aunque su eje gire a velocidad variable dentro de un amplio margen. También se logra realizar una regulación independiente de las potencias activa y reactiva, lo que permite extraer o inyectar la potencia activa generada en el rotor de la máquina y controlar la potencia reactiva intercambiada entre este convertidor y la red (Wizelius, 2007). Por estas razones el generador asíncrono de doble alimentación es uno de los sistemas más utilizados en aerogeneradores de velocidad variable, suponiendo el 67% de los aerogeneradores utilizados hasta final de 2009 en España.

### POTENCIA INSTALADA ACUMULADA EN 2009 POR FABRICANTES

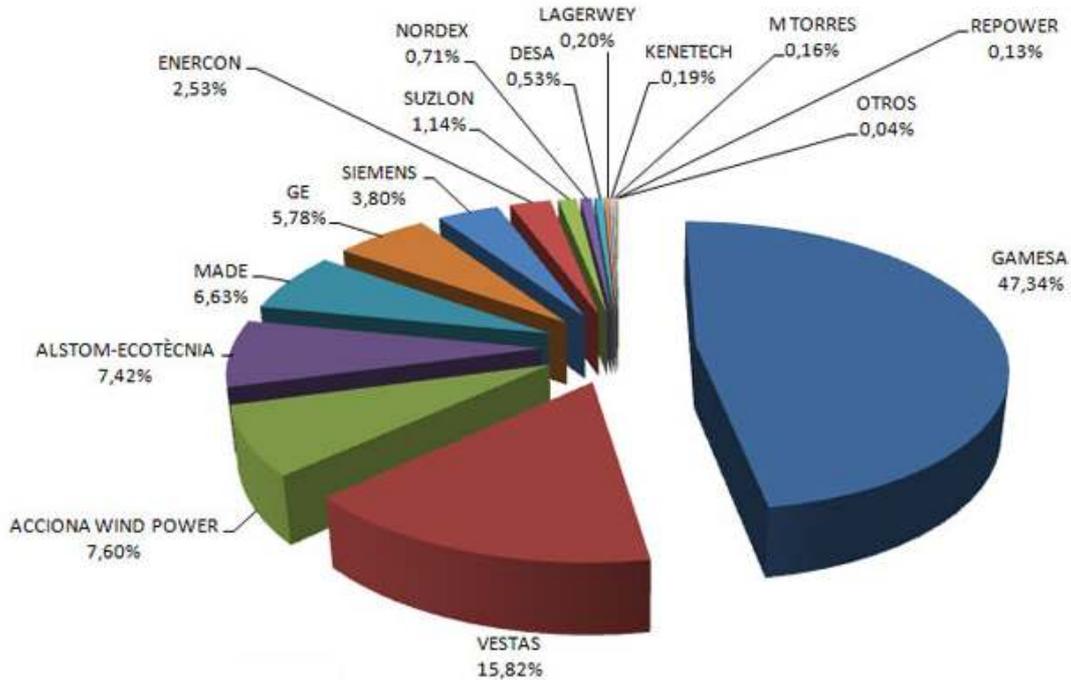


Fig. IV-7: Reparto por fabricantes de la potencia eólica instalada acumulada a 31/12/2009

Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE)

En el gráfico anterior vemos que el mayor fabricante de aerogeneradores de España es el Grupo Auxiliar Metalúrgico, S.A. (GAMESA) cuyos productos contribuyen a proporcionar el 47,34% del total de la potencia eólica instalada en el país a 1 de enero de 2010. Si además consideramos que MADE es una de sus filiales y que, según el gráfico (fig.IV-7) que estamos considerando, contribuye con los productos que fabrica a un 6,63% de la potencia instalada, da un total del 53,97% de potencia instalada que proporcionan los productos fabricados por el Grupo GAMESA. Por consiguiente, sus productos son de mayoritaria implantación en el ámbito territorial de nuestra investigación, entendemos que un estudio de sus aerogeneradores de más reciente instalación y de sus investigaciones nos proporcionará una visión real de las alternativas y de algunas variables explicativas que deben intervenir en el diseño del cuestionario que elaboraremos en el Capítulo siguiente, dirigido a conocer la opinión de los evaluadores y de los expertos en energía eólica sobre la selección de aerogeneradores que presumiblemente tendrán una mayor implantación en 2015.

Si continuamos tomando como referencia el gráfico anterior, vemos que tras GAMESA el fabricante con mayor potencia instalada es VESTAS (15,82%) y en tercer lugar

aparece ACCIONAWINDPOWER (7,60%). Con igual objetivo que en el caso anterior, también estudiamos a continuación los tipos de aerogeneradores que producen actualmente y cuales son sus líneas de desarrollo futuras.

GAMESA fabrica y comercializa en 2009 modelos de aerogeneradores cuya potencia nominal oscila entre los 850 kw (kilowatios) y los 2 Mw (megavatios). Toda la gama de estos productos incluye versiones certificadas para redes débiles, redes de 50 o 60 Hz (frecuencia de red), versiones de bajo ruido y diferentes alturas de torres (de 44 a 100 metros). Actualmente la compañía está inmersa en el desarrollo de la nueva plataforma Gamesa G10X, con una potencia nominal superior a 4 MW. Esta nueva generación de aerogeneradores, de diseño y tecnología propia, permitirá minimizar el Coste de Energía producida mediante la utilización de equipos y utillaje de transporte e instalación similares a los utilizados en la gama Gamesa G8X de 2.0 MW. Es importante considerar esta posibilidad dado lo elevado de los costes de transporte e instalación que requieren los aerogeneradores.

GAMESA comercializa dos tipos de generadores de 850 Kw: el modelo G58 que está diseñado para lograr el máximo rendimiento en emplazamientos con vientos bajos y el G52 pensado para emplazamientos donde la velocidad del viento es media o alta (hasta 25 m/s). Las características comunes más destacables para estos generadores de 850 Kw son las siguientes: Son generadores asíncronos de doble alimentación, dotados de ángulo de calado de pala variable (control tipo pitch), intensidad de turbulencia del 10% y una velocidad variable del rotor (entre 14,6 y 30,8 rpm). La longitud de la pala es de 25,3 o 28.3 metros. Posee un diseño mecánico basado en rodamientos esféricos que evitan que la multiplicadora reciba cargas adicionales, con lo que se reducen las posibilidades de avería además de facilitar su servicio. Su velocidad y potencia (activa y reactiva) es controlada mediante convertidores IGBT y control electrónico PWM (modulación por ancho de pulso), mediante lo cual se consigue un aumento de la eficiencia y de la producción, mejorando la vida útil de la máquina. Están dotados de control remoto y un sistema de mantenimiento predictivo para la detección prematura de posibles deterioros o fallos en los principales componentes del aerogenerador. El diseño aerodinámico de punta de pala y diseño de componentes mecánicos está pensado para minimizar el ruido emitido, con lo que se logra un menor impacto medioambiental. El generador doblemente alimentado dotado de un convertidor sobredimensionado asegura una correcta conexión a red, soportando huecos de tensión.

En el gráfico siguiente podemos ver la potencia suministrada por un aerogenerador de 850 Kw en función de la velocidad del viento.

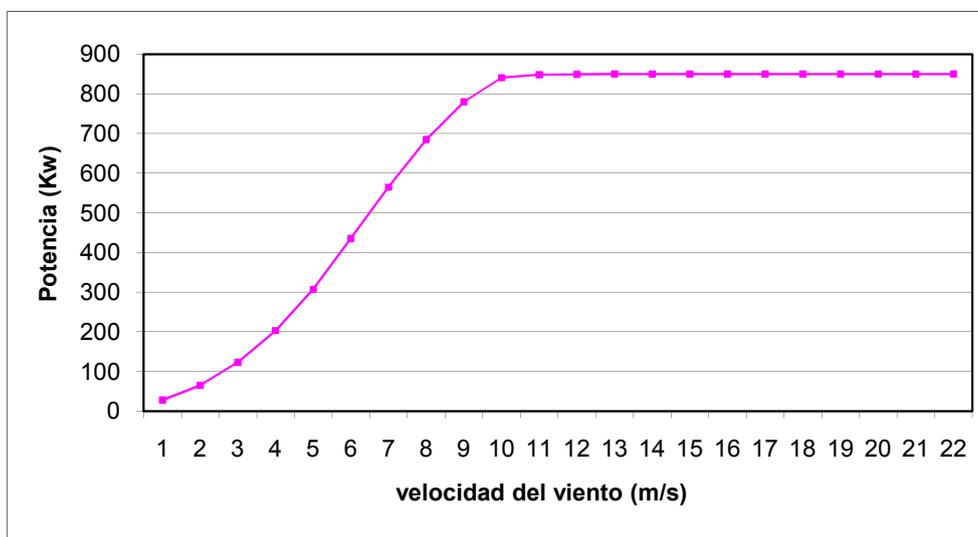


Fig. IV-8: Potencia suministrada por generador de 850 Kw en función de la velocidad del viento

Fuente: GAMESA

Dentro de la gama de generadores de 2 Mw, GAMESA comercializa actualmente cuatro modelos: G80, G83, G87 y G90, de ellos había instalado 1.725 unidades en España, a 31 de diciembre de 2008. Los diferentes modelos surgen para dar respuesta a diferentes velocidades de viento, así, el modelo G80 está diseñado para ser situado en emplazamientos con vientos altos, los G83 y G87 están diseñados para su instalación en lugares dotados de vientos de velocidad media y el modelo G90 ha sido desarrollado para obtener la máxima potencia al mínimo coste por Kwh para el caso de emplazamientos de vientos bajos. Las palas de estos aerogeneradores están construidas con fibra de vidrio y de carbono, su longitud oscila entre los 39 y los 44 metros. Al igual que los generadores de 850 Kw, están dotados de un sistema de control del ruido para evitar la contaminación acústica y que su impacto medioambiental sea mínimo y de un sistema de mantenimiento predictivo. Para su integración en parques eólicos, están dotados de un sistema de control a distancia y su tecnología de conexión a red que asegura cumplimiento total de los requerimientos del operador de red (REE).

Como vimos anteriormente, el fabricante MADE está integrado en el Grupo GAMESA y construye aerogeneradores asíncronos de doble alimentación y síncronos multipolares sin caja de multiplicación. El diseño es propio y comercializa cuatro modelos con potencias de 330, 660, 800 y 1.320 kW. que cuentan con los sistemas de control y regulación que hemos descrito en el caso de los aerogeneradores de GAMESA, ya que al ser adquirida por ella, MADE le aportó su tecnología de control remoto para parque eólicos a través de Internet. A finales de 2007 contaba con más de 1.000 máquinas instaladas.

VESTAS, con un 14,66% de potencia instalada, es el segundo fabricante que instala aerogeneradores en España. Comercializa siete tipos de aerogeneradores con potencias desde 850 Kw hasta 3 Mw. Estos generadores son asíncronos dotados de un sistema que permite que el rotor gire con una velocidad variable. El modelo de 850 kW incorpora multiplicadora de engranajes de ejes paralelos de 2 pasos/1 paso planetario y posee regulación por cambio de paso que garantiza el ajuste óptimo y permanente de los ángulos de las palas con respecto al viento predominante. Posee un rotor de tres palas de 52 metros de diámetro. La velocidad de giro del rotor es variable (entre 14,0 y 31,4 rpm), permitiendo una óptima captación de energía a velocidades de viento tanto bajas como altas.

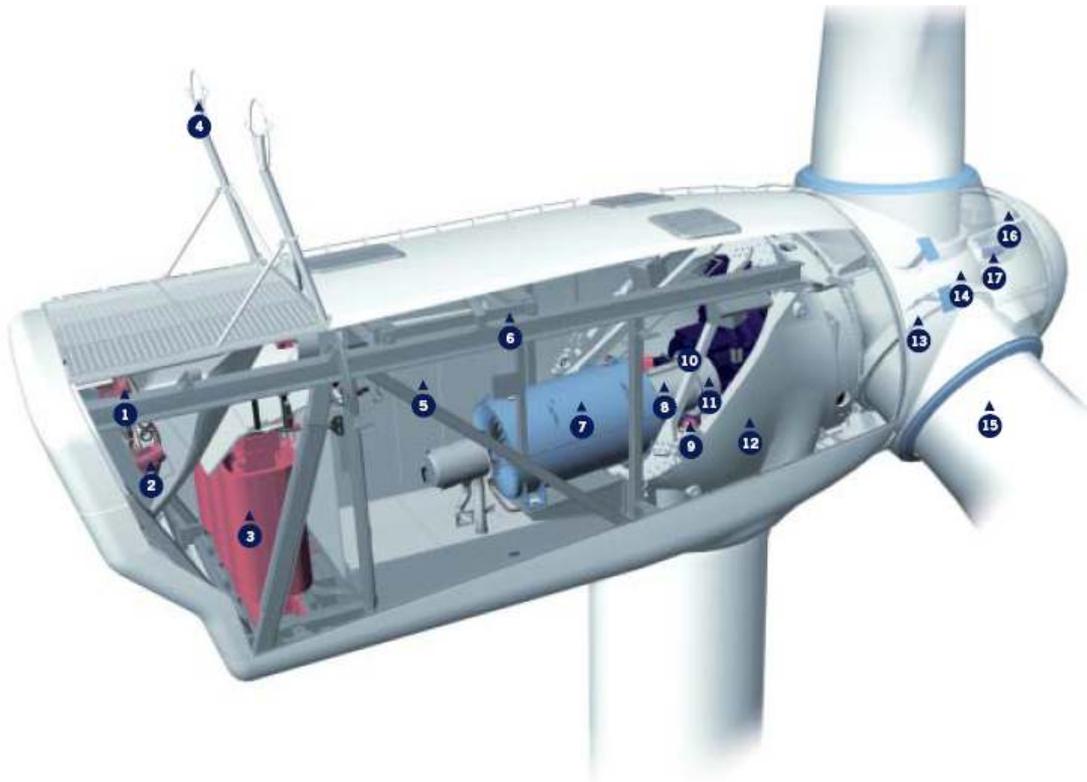
Los modelos de 1500 y 1650 Kw han sido diseñados para trabajar de modo óptimo con velocidades de viento medias o bajas. Aunque equipados con un rotor mayor y un generador asíncrono más potente, posee el resto de características ya mencionadas para el modelo de 850 KW. Además incorpora un sistema de control de potencia que asegura la máxima captación de viento, permitiendo al aerogenerador ponerse en marcha de un modo eficaz con velocidades del viento bajas, conectarse sin ningún tipo de problemas a la red (incluso en el caso de velocidades elevadas del viento) y desconectarse de un modo seguro y rápido cuando las condiciones así lo exijan. Poseen un sistema de control de operación a distancia.

Los aerogeneradores de 1,8 y 2 MW también incorporan regulación por cambio de paso, un rotor de tres palas de 80 o 90 metros de diámetro y velocidad variable del rotor (entre 9 y 19 rpm), debido a esta flexibilidad puede instalarse en zonas con velocidades de viento bajas (velocidad media del viento es de un máximo de 8,5 m/s).

El modelo de 3 Mw está dotado de un generador asíncrono con convertidor. Permite una variación de las velocidades nominales de giro tanto del rotor como del generador de un 60% aproximadamente, con lo que es posible reducir las fluctuaciones no deseadas en la producción suministrada a la red eléctrica y minimizar las cargas en las partes críticas del aerogenerador. Incorpora una innovación, respecto a los modelos anteriormente descritos, en la tecnología de las palas, utilizando fibra de carbono en lugar de fibra de vidrio para la estructura de la pala que soporta la carga. Debido a la resistencia de la fibra de carbono, ha sido posible reducir la cantidad de material utilizado en las palas, reduciendo por lo tanto el peso total y, consecuentemente, las cargas.

Respecto al transporte y la logística que, como hemos visto, tanto inciden en el coste de instalación, el modelo de 3 Mw posee una góndola que ha sido diseñada de forma que se convierte en su propio sistema autoportante, evitando el coste de una estructura adicional de soporte para el transporte. Este modelo puede ser instalado en parques terrestres o marítimos.

En cuanto al impacto medioambiental, VESTAS incorpora en todos sus modelos un sistema de ajuste del nivel de emisión de ruido basado en la variación de la velocidad de giro y el ángulo de paso del aerogenerador. En cuanto al impacto paisajístico, cabe destacar la experiencia del parque eólico de Xiabre, puesto en funcionamiento en 2007, en el que se ha intentado reducir el impacto visual que provoca la instalación de los aerogeneradores en los montes, cubriendo la base de cada uno de ellos con obras pictóricas integradas en el paisaje.



1 – refrigerador de aceite	7 – generador	13 – soporte de pala
2 – refrigerador del generador	8 – acoplamiento	14 – buje
3 - transformador	9 - engranajes de orientación	15 – pala
4 - sensores de viento	10 - multiplicadora	16 – controlador de buje
5 – controlador superior	11 - freno	17 – cilindro de paso
6 – grúa de mantenimiento	12 - chasis	

Fig. IV-9: Generador asíncrono V90

Fuente: VESTAS

En tercer lugar, estudiaremos los modelos de aerogeneradores que produce ACCIONA WINDPOWER que con un 8,21% de la potencia instalada ocupa el tercer lugar del ranking de fabricantes. Actualmente produce un generador asíncrono de doble alimentación de tecnología propia, con una potencia de 1,5 Mw del que ha fabricado 582 unidades en 2007, lo que representa un crecimiento del 36,67% con respecto a 2006. El aerogenerador posee velocidad variable con control de pitch hidráulico independiente para cada pala, para minimizar las cargas, captar la máxima energía y garantizar el control de la velocidad de giro del rotor y la seguridad de la máquina en operación. Posee control para monitorización y operación automática inteligente, que permite mejorar la estabilidad de voltaje y frecuencia, suministrar reactiva a la red cuando sea requerido y operar el factor de potencia en inductivo o capacitivo según se requiera. El aerogenerador de 1,5 Mw se comercializa en tres modelos equipados con rotores entre 70 y 82 metros de diámetro y torres tubulares de acero de 80 y 60 metros de altura y también en torres de hormigón de 80 m. , certificada para la clase II, Opcionalmente incorpora ascensor interior. Está desarrollando, para comercializarlo desde junio de 2008, un aerogenerador de 3 MW de potencia. También está diseñando una torre, basada en su tecnología de hormigón, para 100 metros de altura de buje. Los productos están pensados para se emplazados en parques eólicos de orografía compleja situados en zonas montañosas.

A pesar de que en la Fig. IV-7 podemos apreciar que el fabricante M. TORRES sólo posee un 0,16% del total de la potencia instalada en el país, creemos que merece especial importancia destacar el esfuerzo que realiza en I+D y que produce componentes para otros fabricantes, con lo que si se contabilizara esta producción su porcentaje sobre la potencia instalada sería mayor. Esta empresa, al contrario que las anteriormente citadas que apuestan mayoritariamente por generadores asíncronos, desarrolla un generador síncrono multipolar de velocidad variable para optimizar la eficiencia aerodinámica, con acoplamiento directo (sin multiplicadora) y pitch regulado para control de las tres palas de manera independiente. Posee dos convertidores electrónicos de potencia trifásicos reversibles y un avanzado sistema de control robusto QFT que le permite regular las potencias activa y reactiva, optimizar su rendimiento aerodinámico y aumentar la calidad de onda.

Una vez analizados los productos y la tecnología desarrollada por los tres mayores fabricantes y los tipos de generador que tiene previsto comercializar entre 2008 y 2010, así como el caso especial de M. TORRES, parece oportuno observar las

investigaciones que desarrolla actualmente (2008) el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), con lo cual estaremos en condiciones de alcanzar nuestro objetivo inicial de establecer las alternativas y variables explicativas que serán sometidas a los evaluadores y que posteriormente integrarán el cuestionario que será utilizado para obtener la opinión de los expertos sobre energías renovables.

El CIEMAT se dedica actualmente a investigar sobre sistemas aislados con energía eólica, predicción y caracterización de recursos eólicos. La principal de sus líneas de investigación en este campo está enfocada a la mejora de los sistemas de generación de energía eólica para operación como sistemas aislados de la red eléctrica. En esta línea de sistemas, está monitorizando la instalación de un sistema híbrido eólico (10 kW) –fotovoltaico (5kWp) – diésel (16 kW) con almacenamiento de energía mediante baterías y controlado por un sistema de control y gestión modular denominado CICLOPS, desarrollado por la empresa ECOTECNIA (cuarto fabricante español de aerogeneradores con el 7,3% de la potencia total instalada en el país). Dentro del área de los sistemas eólicos aislados, el CIEMAT está desarrollando un sistema híbrido eólico-diésel de 100 kW, operando en baja penetración eólica. Relacionado con esta aplicación, han realizado las pruebas de operación del almacenador cinético de 50 kW. También se ha realizado la caracterización de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de 15kW, a partir de la cual se pretende desarrollar un algoritmo de control que permita operar al aerogenerador de imanes permanentes a velocidad específica constante, para optimizar la conversión de energía. Asimismo se está colaborando en el desarrollo de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel de hasta 100 kW con doble bus de CA y CC. El CIEMAT está colaborando dentro del Proyecto ANEMOS en el desarrollo de una nueva generación de sistemas de predicción de viento, para la integración a gran escala de la energía eólica mediante parques eólicos convencionales y offshore (marinos). Éstos últimos son objeto de especial atención en el Plan de Energías Renovables 2005 – 2010 (PER), dado el considerable retraso que tenía España en este tipo de parques al iniciarse el PER y continua teniendo en 2008, como veremos en los párrafos siguientes.

Dentro de las tendencias tecnológicas del sector de la energía eólica, hay que considerar la labor que el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) está realizando, apoyando la investigación y desarrollo de sistemas avanzados de control de la calidad de energía cedida a la red, el desarrollo de aerogeneradores multipolares de nueva generación (de 2,5 a 5 Mw) que contemplen, entre otras

características, la aplicación de nuevos materiales para la fabricación de torres y palas, la reducción de peso en el aerogenerador y sus componentes y la adaptación y/o desarrollo de aerogeneradores para su funcionamiento en el mar así como la creación de parques eólicos marinos de demostración que incorporen esta nueva generación de aerogeneradores (REOLTEC 2007).

Como veremos en el apartado de Normativa (IV.6) hasta el año 2008 no se podía solicitar la instalación de un parque eólico marino en España (RD 1028/2007), por consiguiente no podemos analizar este tipo de parques en la presente investigación ya que su ámbito es el territorio español, aunque si estudiamos las características de los aerogeneradores susceptibles de ser instalados en ellos (Portella 2007), las ventajas y desventajas de este tipo de instalaciones, y se recogerá la opinión de los expertos sobre ellos, pues ya serán una realidad en 2015.

El primer parque cuasimarino español se puso en funcionamiento en 2006 y está instalado en el dique del Puerto de Bilbao. Aunque tiene su cimentación en seco, soporta condiciones atmosféricas similares a las marinas.

La generación de energía eólica mediante aerogeneradores integrados en parque eólicos marinos, presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Entre las primeras podemos destacar las siguientes:

- Viento sin obstáculos: mayor intensidad y menores turbulencias.
- Ausencia de conflictos con propietarios de terrenos, ya que están en zonas de dominio público.
- Tendencia a ubicarlos lejos de la costa, con poco o nulo impacto visual.
- El hecho de que puedan conectarse en continua supone la conversión de la potencia y puede favorecer la estabilidad de la Red.

Y entre las desventajas, que suponen barreras para su desarrollo y sobre las que tanto el IDAE como los fabricantes están trabajando, podemos destacar las siguientes:

- Elevadas inversiones en obra civil (montaje e infraestructura eléctrica), que suelen ser un 70% superiores a los parques terrestres.
- Altos costes de operación y mantenimiento.
- Los parques deben ser de elevada potencia para laminar los costes fijos.

- Dudas sobre la vida útil ante la corrosión marina.
- Incertidumbre en los impactos en un nuevo medio.

#### **IV.6. Alternativas, elementos y características a utilizar en la investigación.**

En el apartado IV.3 hemos revisado la tipología de aerogeneradores existentes y observado que los asíncronos de eje horizontal son los de mayor aplicación debido a su facilidad de conexión a la red, la ausencia de contactos móviles, admitir un ligero deslizamiento de velocidad con respecto a la de sincronismo, estar dotados de un sistema de control sencillo, su coste es el menor de entre los de corriente alterna y son más robustos que ellos. Frente a ellos, los generadores síncronos, con menor implantación en España, son capaces de producir energía reactiva y funcionar de forma autónoma, su rendimiento suele ser mayor que los generadores síncronos y soportan bien los huecos de tensión, para asegurar esta característica suelen estar dotados de un convertidor sobredimensionado asegura una correcta conexión a red.

En el apartado IV.5 hemos analizado los productos que actualmente tienen en el mercado los fabricantes españoles y cuales son sus características más destacables. Corroborando lo expuesto en el punto anterior, vemos que los aerogeneradores de mayor penetración en el mercado (> 60%) son los asíncronos doblemente alimentados (Diez Martínez, Marta y Rouco Rodríguez, Luis 2007) capaces de generar una tensión de valor eficaz y frecuencia constante aunque su eje gire a velocidad variable dentro de un amplio margen, con él se regulan independientemente las potencias activa y reactiva, lo que permite extraer o inyectar la potencia activa generada en el rotor de la máquina y controlar la potencia reactiva intercambiada entre este convertidor y la red. Mayoritariamente están dotados de ángulo de calado de pala variable a lo cual se le denomina control tipo pitch, las versiones más actuales lo incorporan de tipo hidráulico independiente para cada pala, a fin de minimizar las cargas, captar la máxima energía y garantizar el control de la velocidad de giro del rotor y la seguridad de la máquina en operación.

Los generadores síncronos que se instalan son del tipo multipolar con regulación de velocidad del rotor (velocidad variable) con acoplamiento directo (sin multiplicadora) y pitch regulado para control de las tres palas de manera independiente y control de potencia reactiva (García-Sanz, M. y Torres, E. 2007). Los modelos en desarrollo, poseen además convertidores electrónicos de potencia trifásicos reversibles y un

sistema de control les permite regular las potencias activa y reactiva y optimizar su rendimiento aerodinámico (Torres M. 2008).

En cuanto a potencia, los modelos comerciales integrables en parques eólicos, alcanzan mayoritariamente, en 2008, una potencia de 2Mw y la tendencia es a superar los 3 Mw, de hecho GAMESA está desarrollando una máquina de una potencia nominal superior a 4 MW, aunque en el mercado se encuentra una amplia gama de modelos a partir de 850 Kw. Los de potencia inferior a 850 Kw, actualmente (2009) se destinan a instalaciones aisladas, aunque hasta 2003, los de más de 600 Kw también se integraban en parques eólicos.

Los aerogeneradores estudiados son capaces de funcionar con velocidades del viento superiores a 4 m/s y pueden estar dotados o no de multiplicadora. La existencia de diferentes modelos capaces de desarrollar una misma potencia, tiene su explicación porque cada uno de ellos es más apropiado en función de la velocidad media de viento en el lugar de instalación.

Todos los fabricantes que hemos estudiado muestran un especial interés por diseñar sistemas que minimicen los costes de transporte (mediante góndolas autoportantes), instalación y mantenimiento (mediante el mantenimiento predictivo). Además, suelen estar dotados de control remoto que permite su operación desde Internet sin desplazamiento de los técnicos y están dotados de un tipo de conexión a red que asegura cumplimiento total de los requerimientos de REE.

Las palas de estos aerogeneradores están construidas con fibra de vidrio y/o de carbono, su longitud oscila entre los 39 y los 90 metros y mayoritariamente el rotor de velocidad de giro variable integra tres palas.

Las torres actualmente son tubulares de acero y se están desarrollando nuevos tipos en hormigón. La altura de la torre suele estar comprendida entre los 60 y 100 metros.

En cuanto a cumplimiento de la normativa medioambiental, los fabricantes han logrado un diseño aerodinámico de punta de pala y de los componentes mecánicos para minimizar el impacto sonoro y en algunos casos se ha recurrido a elementos decorativos para reducir el impacto sobre el paisaje.

Como hemos visto en el apartado IV.5, están en fase de investigación sistemas de generación de energía eólica para operar de forma aislada, sin integración en la red eléctrica y con la finalidad de dar servicio a viviendas, granjas y pequeñas industrias en emplazamientos que carecen de suministro eléctrico o éste no se obtiene con los requerimientos necesarios. En esta fase se está trabajando con sistemas híbridos eólico – fotovoltaico – diésel (hasta 100 Kw) con almacenamiento de energía mediante baterías y controlado por un sistema de control y gestión modular. También se están estudiando sistemas híbridos eólico-diésel de 100 kW para operar en zonas con velocidades del viento bajas y sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos.

Por todo lo expuesto anteriormente, parece oportuno considerar como posibles alternativas tres aerogeneradores-tipo que resumen las características de los que en 2009 tienen una mayor implantación en el mercado y de aquellos que se encuentran en fase de investigación y desarrollo. Igualmente las características (variables explicativas o criterios) más adecuadas para figurar en el cuestionario a someter a los evaluadores son:

- a) La incidencia de los costes de I+D, de fabricación del generador y de sus elementos, de transporte, instalación y mantenimiento, de almacenamiento de la energía producida y de conexión a REE.
- b) El impacto medioambiental (acústico y paisajístico) y el ajuste a la normativa (reseñada en el apartado IV.7),
- c) El emplazamiento: terrestre o marino y en cada caso si es aislado o integrado en parques.
- d) altura, peso y material de la torre y góndola, transformador, sistemas de frenado y de control.
- e) La tipología del generador: polos, deslizamiento, alimentación, conexión a REE (directa o indirecta), existencia o no de multiplicadora, eje horizontal o vertical, dimensiones del rotor, palas y potencia deseable en función de las características del generador.

Con todas las alternativas y características que acabamos de mencionar, se elaborará un denominado “listado de criterios, subcriterios y alternativas” que se muestra en el capítulo V y que será sometido al juicio de los evaluadores.

#### **IV.7. Normativa reguladora y su incidencia la producción**

En este apartado consideramos la normativa que ha tenido y tiene una especial incidencia en la producción de energía eólica. Evidentemente, el marco regulador es mucho más amplio que lo que aquí extraemos, pero no es la finalidad de esta investigación un análisis exhaustivo de toda la legislación del sector eléctrico. La normativa que recogemos ha sido considerada de especial relevancia en la evolución del sector por la Asociación de Empresarios Eólicos (AEE) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA).

La Unión Europea ha establecido como objetivo que el 12% del consumo de energía primaria en 2015 sea proporcionado con fuentes de energía renovables. El cumplimiento del Protocolo de Kioto proporciona un impulso adicional al desarrollo de las fuentes de energía renovable. Para lograr este objetivo, se han concebido, diversas políticas de promoción de las energías renovables. La que ha resultado más exitosa ha sido aquella en la que se fija un precio de remuneración de la energía eólica. Esta ha sido la política adoptada en Alemania y España, que como hemos visto en los gráficos anteriores, son los dos países europeos con mayor potencia eólica instalada.

La Ley 54/97 del Sector Eléctrico estipulaba que en 2010 las fuentes de energía renovable deben cubrir, como mínimo, el 12% de la demanda energética total de España y establece, como mecanismo para conseguirlo, la elaboración del Plan Fomento de las Energías Renovables (PFER). El PFER, aprobado en 1999, proponía una serie de objetivos para cada una de las fuentes de energía renovable, siempre teniendo como meta final ese abastecimiento del 12% del consumo de energía primaria, equivalente al 37% de la demanda eléctrica. Para la energía eólica el objetivo era alcanzar los 8.974 MW (8.140 MW a construir más 834 MW que ya estaban instalados en 1998). En su momento, esos 8.974 MW parecían un objetivo ambicioso, pero la capacidad de desarrollo del sector eólico español –que ha crecido a ritmos superiores al 30% anual– lo ha superado con creces y la cifra se alcanzó cuatro años antes de lo previsto.

Ante este importante crecimiento, el Plan de Infraestructuras para el período 2002-2011 elevó el objetivo hasta los 13.000 MW. Las demás fuentes de energía renovable contempladas en el PFER, en cambio, están muy lejos de cumplir sus objetivos por diversas razones. Esto, sumado a un incremento de la demanda energética superior al

previsto, desemboca en la imposibilidad de alcanzar el objetivo global de cubrir el 12% del consumo de energía primaria con renovables a menos que se potencie la energía eólica.

España tiene potencial eólico suficiente para superar los 30.000 MW instalados, sin incluir los parques marinos ni la repotenciación de parques obsoletos. Por otro lado, descontando la parte destinada a la exportación, y teniendo en cuenta el actual ritmo de atracción de inversión en nuevas promociones –que se mantendrá constante con el marco retributivo en vigor–, en España puede mantenerse una pauta de instalación eólica que oscile entre los 1.500 y los 2.000 MW anuales. De este modo, la electricidad obtenida a partir de la fuerza del viento puede llegar a cubrir en 2011 el 16% de la demanda nacional. Para alcanzar estas cifras –pues el mandato legal habla de cobertura de la demanda, no de potencia instalada–, sería necesario tener instalados unos 23.000 MW eólicos, capaces de producir unos 52 TWh.

El Real Decreto 436/2004 consigue mejores resultados que en otros países donde la remuneración es más alta que en España. Vincular la retribución eólica a la evolución de la Tarifa Media de Referencia (TMR) es clave, pues incrementa la certidumbre de los ingresos futuros y hace rentables las inversiones con costes financieros más bajos que en otros países, disminuyendo también el coste para el Sistema Eléctrico.

Por otro lado, la evolución de los precios eléctricos pagados a los operadores eólicos durante la última década muestra una clara tendencia a la estabilización. La evolución futura de la TMR estará marcada por el final de costes de la moratoria nuclear y de los Costes de Transición a la Competencia, que en parte serán absorbidos por el impacto del Plan Nacional de Asignación de emisiones contaminantes vinculado al Protocolo de Kioto. De este modo, el impacto de la remuneración eólica dentro de los costes totales de la estructura de generación de España permanece constante y mantiene tasas de crecimiento similares a las del coste total de generación. El conocimiento de la evolución de los precios a medio y largo plazo es esencial para elaborar la planificación estratégica de las empresas. AEE, a través de su Comité de Precios, está trabajando activamente en diferentes modelos que permitan avanzar en su previsión y los factores que expliquen sus fluctuaciones a lo largo de los años.

El Real Decreto 661/2007 regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial estableciendo un régimen jurídico y económico apropiado, modificando los Decretos anteriores. El Decreto determina una prima que

complementa el régimen retributivo de aquellas instalaciones con potencia superior a 50 MW, aplicable a las instalaciones incluidas en el artículo 30.5 de la Ley 54/1997 y a las cogeneraciones. El establecimiento de la prima atañe, entre otras, a las instalaciones que únicamente utilicen como energía primaria la energía eólica, tanto las ubicadas en tierra como las ubicadas en el mar territorial.

Finalmente queremos hacer mención a la Ley 17/2007 que modifica la Ley 54/1997 a la que nos hemos referido anteriormente como reguladora del Sector Eléctrico y la adapta a lo dispuesto en la Directiva 2003/54/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de junio de 2003, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. De esta Ley cabe destacar la obligatoriedad de designar a las autoridades reguladoras, asegurar un acceso eficaz y no discriminatorio a las redes de los distribuidores y que la actividad de suministro a tarifa deja de formar parte de la actividad de distribución el 1 de enero de 2009. A partir de esa fecha el suministro pasa a ser ejercido en su totalidad por los comercializadores en libre competencia, y son los consumidores de electricidad quienes eligen libremente a su suministrador.

La definición y requisitos de los parques eólicos marinos y el consiguiente procedimiento administrativo para la autorización de estas instalaciones viene dado por el Real Decreto 1028/2007, de 20 de julio, que también contempla la aplicación de un procedimiento simplificado para instalaciones eólicas con potencia menor de 10 MW. y prevé la realización de un Estudio Estratégico Ambiental del litoral español. Este Real Decreto también clasifica, a efectos ambientales, las zonas aptas y de exclusión del litoral para la instalación de parques eólicos marinos.

#### **IV.8. Conclusiones**

En el presente Capítulo, hemos estudiado los sistemas de generación de energía eólica existentes y con mayor implantación en el mercado español, realizando una revisión de las principales características de la energía eólica y de la producción de electricidad a partir de ella mediante los distintos tipos de generadores que se encuentran en el mercado o que están en vías de diseño y desarrollo tanto por parte de las empresas con mayor presencia en el mercado como por parte de los centros de investigación. .

A partir del estudio realizado, hemos obtenido la información necesaria para posteriormente, en el Capítulo V, identificar un conjunto de factores críticos (criterios y subcriterios) que caracterizan a los aerogeneradores y también para establecer que aerogeneradores-tipo podrían proponerse como alternativas de solución a nuestro problema de investigación.



## **Capítulo V**

### **Identificación de criterios y alternativas.**

#### **Diseño del cuestionario**



## V.1 Introducción

En el presente capítulo, nos fijamos el objetivo de identificar las variables explicativas o factores críticos (subcriterios y criterios) que caracterizan a las alternativas de solución a nuestro problema de selección de aerogeneradores, lo hacemos a partir de la revisión, efectuada en el Capítulo IV, sobre los tipos de aerogenerador presentes en el mercado español y de las tendencias en la investigación y desarrollo en el campo de la energía eólica.

En el tercer apartado, exponemos el diseño del cuestionario a través del cual los expertos valorarán las variables explicativas y las alternativas aportándonos los datos necesarios para efectuar el Proceso Analítico Jerárquico y así obtener una solución a nuestro problema.

Posteriormente, validamos el listado de variables explicativas y alternativas y el cuestionario, sometiéndolo al juicio de dos validadores externos. A partir del informe emitido por ellos, obtenemos el listado definitivo de variables y alternativas y el cuestionario (Anexo I).

Finalmente, presentamos el panel de expertos que será encuestado y justificamos el número de expertos que lo integran.

## V.2 Identificación de variables explicativas

En el Capítulo IV revisamos la tipología de aerogeneradores con mayor implantación en el mercado y observamos que los generadores que incorporan son de dos tipos:

- *Asíncronos*: son los más utilizados por su facilidad de conexión a la red, ausencia de contactos móviles, admitir deslizamiento de velocidad con respecto a la de sincronismo, poseer un sistema de control sencillo, ser los de menor coste entre los de corriente alterna y más robustos. Los de mayor penetración en el mercado (más del 60%) son los asíncronos de doble alimentación (Diez Martínez, Marta y Rouco Rodríguez, Luis 2007) capaces de generar una tensión de valor eficaz y

frecuencia constante aunque su eje gire a velocidad variable. Con él se regulan las potencias activa y reactiva, permitiendo extraer o inyectar la potencia activa generada en el rotor de la máquina y controlar la potencia reactiva intercambiada entre este convertidor y la red. Mayoritariamente están dotados de ángulo de calado de pala variable (control tipo pitch), las versiones más actuales lo incorporan de tipo hidráulico independiente para cada pala, a fin de minimizar las cargas, captar la máxima energía y garantizar el control de la velocidad de giro del rotor y la seguridad de la máquina en operación.

- *Síncronos*: pueden producir energía reactiva y funcionar de forma autónoma, su rendimiento es mayor que los asíncronos y soportan bien los huecos de tensión. Los instalados son de tipo multipolar con regulación de velocidad del rotor (velocidad variable), acoplamiento directo (sin multiplicadora), pitch regulado para control de palas independiente y control de potencia reactiva (García-Sanz, M. y Torres, E. 2007). Los modelos en desarrollo, poseen además convertidores electrónicos de potencia trifásicos reversibles y un sistema de control les permite regular las potencias activa y reactiva y optimizar su rendimiento aerodinámico (Torres M. 2008).

En cuanto a potencia generada, los modelos comerciales integrables en parques eólicos, alcanzaban mayoritariamente, en 2008, una potencia de 2Mw y la tendencia es a superar los 3 Mw, de hecho GAMESA está desarrollando una máquina de una potencia nominal superior a 4 MW y VESTAS ha puesto en el mercado (2009), un generador de 5MW. Los de potencia inferior a 850 Kw se destinan a instalaciones donde trabajan aislados (no integrados en parques eólicos).

Los aerogeneradores estudiados pueden funcionar con velocidades del viento superiores a 4 m/s y pueden estar dotados o no de multiplicadora. La existencia de diferentes modelos capaces de desarrollar una misma potencia, tiene su explicación porque cada uno de ellos es más apropiado en función de la velocidad media de viento en el lugar de instalación.

Los fabricantes muestran un especial interés por diseñar sistemas que minimicen los costes de transporte (mediante góndolas autoportantes), instalación y mantenimiento (mediante el mantenimiento predictivo). Además, suelen estar dotados de control remoto que permite su operación desde Internet sin desplazamiento de los técnicos y

están dotados de un tipo de conexión a red que asegura cumplimiento total de los requerimientos de REE.

Las palas de estos aerogeneradores están construidas con fibra de vidrio y/o de carbono, su longitud oscila entre los 39 y los 90 metros y mayoritariamente el rotor de velocidad de giro variable integra tres palas.

Las torres actualmente son tubulares de acero y se están desarrollando nuevos tipos en hormigón. La altura de la torre suele estar comprendida entre los 60 y 100 metros.

En cuanto a cumplimiento de la normativa medioambiental, los fabricantes han logrado un diseño aerodinámico de punta de pala y de los componentes mecánicos para minimizar el impacto sonoro y en algunos casos se ha recurrido a elementos decorativos para reducir el impacto sobre el paisaje.

Como hemos visto en el apartado IV.5, están en fase de investigación aerogeneradores destinados a operar de forma aislada y sin integración en la red eléctrica. En esta fase se está trabajando con sistemas híbridos eólico – fotovoltaico – diésel (hasta 100 Kw) con almacenamiento de energía mediante baterías y controlado por un sistema de control y gestión modular. También se están estudiando sistemas híbridos eólico-diésel de 100 kW para operar en zonas con velocidades del viento bajas y sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos.

Por todo lo expuesto anteriormente y en el Capítulo IV, parece oportuno considerar las siguientes características (variables explicativas o criterios) como las más adecuadas para figurar en el *listado inicial de alternativas y criterios* y en el *cuestionario inicial*:

- Costes: de I+D, fabricación del generador y de cada uno de los módulos que integran los sistemas híbridos, transporte, instalación y mantenimiento, combustible, almacenamiento de la energía producida y conexión a REE.
- Impacto medioambiental, acústico y paisajístico junto al ajuste a la normativa (reseñada en el apartado IV.7),
- Emplazamiento: terrestre o marino y en cada caso si es aislado o integrado en parques.

- Tecnología incorporada: asíncronos, síncronos y los sistemas híbridos, especificado el número de polos, si existe deslizamiento, conexión a la red (directa o indirecta), existencia o no de multiplicadora, velocidad fija o variable, eje horizontal o vertical, dimensiones del rotor y potencia, control de tensión y producción de energía.

El *listado inicial de alternativas y criterios* se ha estructurado de acuerdo a la metodología establecida por el Proceso Analítico Jerárquico (Saaty 2008). Ambos instrumentos, listado y cuestionario, se someten al juicio de dos evaluadores externos, como se muestra en el apartado *V.3 Proceso de validación*.

Llegados a este punto, parece oportuno recordar que nuestro objetivo principal, al llevar a cabo este trabajo de investigación, es desarrollar un método que permita seleccionar el tipo de aerogenerador con mayor posibilidad de implantación en el mercado desde hoy hasta 2015. Por consiguiente, no consideramos necesario efectuar un análisis exhaustivo de todas las características de los aerogeneradores, sino que con lo expuesto se vea el procedimiento seguido: análisis de la bibliografía y la documentación, síntesis y extracción de conclusiones. Si entra dentro de nuestro objetivo mostrar, paso a paso, la metodología aplicada para la selección y cuales son sus fundamentos, cosa que hacemos en los capítulos I, V y VI.

### ***Listado inicial de alternativas y criterios***

#### Criterios

##### *C1 Generador*

- C1.1 Asíncrono de doble alimentación.
- C1.2 Híbrido eólico - diesel.
- C1.3 Híbrido eólico - solar.
- C1.4 Híbrido eólico - fotovoltaico - diesel.
- C1.5 Síncrono multipolar

##### *C2 Coste*

- C2.1 Inversión efectuada en I+D.
- C2.2 Fabricación del generador eólico.
- C2.3 Fabricación del módulo fotovoltaico.
- C2.4 Fabricación del módulo auxiliar de diesel.

- C2.5 Fabricación del sistema de acumulación.
- C2.6 Instalación (incluido el transporte).
- C2.7 Mantenimiento del aerogenerador o sistema.
- C2.8 Combustible utilizado.
- C2.9 Almacenamiento de la energía producida.
- C2.10 Integración en redes de distribución.

### *C3 Medioambiente*

- C3.1 Impacto medioambiental.
- C3.2 Adecuación a la normativa.
- C3.3 Impacto en el paisaje.
- C3.4 Impacto acústico.

### *C4 Emplazamiento*

- C4.1 Aislado.
- C4.2 Integrado en parques.
- C4.3 Terrestre.
- C4.4 Marino.

### *C5 Tecnología incorporada*

- C5.1 Número de polos variable.
- C5.2 Deslizamiento variable.
- C5.3 Conexión indirecta a la red.
- C5.4 Conexión directa a la red.
- C5.5 Con caja de multiplicación.
- C5.6 Sin caja de multiplicación.
- C5.7 Velocidad variable.
- C5.8 De eje horizontal.
- C5.9 De eje vertical.
- C5.10 Diámetro de rotor.
- C5.11 Potencia generada.
- C5.12 Control de tensión.

### Alternativas

Planteamos tres alternativas de solución al problema de selección. Estas alternativas son aerogeneradores-tipo que recogen características tanto de los que actualmente están disponibles en el mercado español y tienen una gran implantación en él como de aquellos que se encuentran en fase de investigación y desarrollo por parte de los

fabricantes y por parte de centros de investigación. Estos tres aerogeneradores tipo, los denominamos:

A1. AADA

A2. ASMS

A3. ADSH

Las alternativas, criterios y subcriterios (variables explicativas) incluidos en el listado anterior, se describen detalladamente en el Anexo II.

### **V.3 Diseño del cuestionario**

Al diseñar el cuestionario, hemos primado sobre todo la fácil comprensión de lo que se pregunta, utilizando para ello un enunciado detallado para cada cuestión, al que se acompaña de una descripción, paso a paso, y muy gráfica del funcionamiento de la escala. Además, hemos introducido en cada cuestión una simbología de colores (negrita y rojo) que contribuye a establecer fácilmente las relaciones entre el enunciado y la tabla sobre la que responde el experto. Estas características podemos verlas en la siguiente figura:

Nuestro objetivo es conocer que características, entre las consideradas, estima más importantes para que el aerogenerador que las incorpore sea el más aceptado en el mercado español en 2015.

Consideramos cuatro posibles **emplazamientos** para un aerogenerador:

Aislado e instalado en tierra (**Aislado terrestre**)

Aislado e instalado en el mar (**Aislado marino**)

Instalado en un parque eólico terrestre (**Integrado terrestre**)

Instalado en un parque eólico marino (**Integrado marino**)

Para cada pareja de emplazamientos, indique el grado de importancia que le concede al situado a la izquierda respecto al de la derecha. Para hacerlo, sitúe el cursor sobre la casilla situada entre la pareja, haga clic con el ratón y pulse el botón que aparecerá a la derecha. Se despliega la lista de valores. Seleccione el que considere más adecuado.

Aislado terrestre		Aislado marino
Aislado terrestre		Integrado terrestre
Aislado terrestre		Integrado marino
Aislado marino		Integrado terrestre
Aislado marino		Integrado marino
Integrado terrestre		Integrado marino

Fig. V-1: Imagen de la primera página del cuestionario

Con misma finalidad de primar la fácil comprensión, hemos construido un menú desplegable para comparar cada par de elementos (criterios, Subcriterios o alternativas) mediante una escala de tipo verbal y no numérica, lo que evita al experto tener que consultar frecuentemente la tabla de Saaty que tendrá que facilitársele en hoja aparte.

En la figura siguiente vemos el menú desplegado y la escala verbal utilizada. En este caso, se compara el subcriterio *Integrado terrestre* con *Integrado marino* y, como ejemplo, suponemos que el experto selecciona de la escala verbal el valor “es levemente más importante que”.

Aislado terrestre		Aislado marino
Aislado terrestre		Integrado terrestre
Aislado terrestre		Integrado marino
Aislado marino		Integrado terrestre
Aislado marino		Integrado marino
Integrado terrestre		Integrado marino

es fuertemente más importante que
es notablemente más importante que
es levemente más importante que
es igualmente importante que
es levemente menos importante que
es notablemente menos importante que
es fuertemente menos importante que
es extremadamente menos importante que

Fig. V-2: Imagen de la valoración de una pareja de subcriterios con el menú desplegable

Una vez otorgadas las valoraciones por los expertos, para todas las posibles comparaciones entre el conjunto de subcriterios considerado, obtenemos una tabla como la que se muestra, a modo de ejemplo, en la figura siguiente:

Aislado terrestre	es extremadamente más importante que	Aislado marino
Aislado terrestre	es levemente menos importante que	Integrado terrestre
Aislado terrestre	es igualmente importante que	Integrado marino
Aislado marino	es extremadamente menos importante que	Integrado terrestre
Aislado marino	es extremadamente menos importante que	Integrado marino
Integrado terrestre	es levemente más importante que	Integrado marino

Fig. V-3: Imagen de todas las parejas de subcriterios de un criterio, ya valoradas

Para hacer el cuestionario se ha utilizado la versión 93-2007 de Microsoft Excel, ya que permite los menús desplegable y, como vemos en la figura anterior, la adaptación automática de la tabla en función del elemento seleccionado del menú. Ha sido necesario abreviar, en algunos casos, la denominación de los subcriterios para permitir una mejor visibilidad del conjunto.

A tal efecto, en el enunciado se ha resaltado en negrita la abreviatura o denominación reducida que se ha utilizado en cada caso, por ejemplo: se ha puesto “**Integrado**” para referirse al subcriterio “**Integrado** en un parque eólico”.

El planteamiento del cuestionario en este formato, logra que el experto pueda recibirlo mediante correo electrónico, rellenarlo directamente en el ordenador y reenviarlo, al autor de la tesis, simplemente volviéndolo a adjuntar a un correo electrónico de respuesta.

La escala verbal de comparación que hemos utilizado en el menú desplegable, se corresponde con la establecida por Saaty (1997) para el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y es una escala que permite la posibilidad elegir en que magnitud un criterio es mas o menos dominante (o importante) que otro, con respecto a un parámetro determinado. La escala permite a los evaluadores expresar los juicios de forma verbal, y fácilmente comprensible, con una inmediata equivalencia numérica.

A pesar de que el método AHP viene siendo utilizado con éxito en los últimos 20 años, las principales dificultades se han generado por la controversia con el uso de su escala (Dong et al., 2008, Takeda et al., 1987), pero su permanente utilización se soporta en el hecho de que la experiencia ha confirmado, que la escala de nueve unidades permite reflejar el grado hasta el cual se puede discriminar la intensidad de las

relaciones entre elementos, además de permitir derivar juicios tangibles cuando aspectos intangibles son evaluados (Saaty 1997 y 2008).

En el Capítulo II ya mostramos la escala fundamental de Saaty para valorar los juicios en el método AHP y, en la tabla siguiente, presentamos esa escala en la forma necesaria para obtener la conversión inmediata de verbal a numérica, lo que posibilitará la construcción de las matrices pareadas y su procesamiento automático.

<b><i>Escala numérica Escala Verbal</i></b>	
9	Extremadamente más importante
7	Fuertemente más importante
5	Notablemente más importante
3	Levemente más importante
1	Igualmente importantes
1/3	Levemente menos importante
1/5	Notablemente menos importante
1/7	Fuertemente menos importante
1/9	Extremadamente menos importante

**Tabla V-1:** Escala fundamental de Saaty  
Adaptada de Saaty (2008)

#### **V.4 Proceso de validación**

Como exponíamos en el apartado anterior, para validar la *lista inicial de alternativas y criterios* y el *cuestionario inicial*, hemos sometido ambos instrumentos al juicio de dos evaluadores independientes que nos expondrán su opinión sobre ellos. Estos validadores son expertos, respectivamente, en energía eólica y en diseño de cuestionarios y análisis de datos.

Para iniciar el proceso de validación, hemos redactado un escrito personalizado dirigido a cada evaluador en el que le explicamos el objetivo principal de la tesis, la finalidad, estructura y diseño del listado y el cuestionario. Además les indicamos quienes serán los destinatarios del cuestionario, así como otros aspectos que deben considerar al emitir su juicio. Dicho escrito se muestra en la página siguiente.

Para facilitar la labor de ambos expertos les proporcionamos, junto con el escrito, los dos instrumentos mencionados y una descripción detallada de cada elemento que integra la lista inicial de alternativas y criterios.

Una vez emitidos los respectivos informes por parte de los validadores, se procede a su análisis y a la obtención de conclusiones que se trasladan a la lista y al cuestionario, adoptando éste su forma definitiva (Anexo I).

Valencia, septiembre 2009

Estimado Sr..... / Sra.....:

Estoy realizando una tesis doctoral cuyo objetivo es desarrollar un método para seleccionar el tipo de generador más idóneo en función de múltiples criterios de evaluación. Para llevarla a cabo, es necesario conocer la opinión de los expertos sobre la situación actual del mercado español de aerogeneradores y cuales son las tendencias en la generación de energía eólica, estableciendo para ello un horizonte temporal situado en el año 2015. A tal efecto, se ha desarrollado un cuestionario y un listado de características que sometemos a su consideración.

Los destinatarios del cuestionario serán investigadores, responsables y técnicos de entidades vinculadas al estudio y generación de energía eólica.

Como puede apreciar, el cuestionario está constituido por una serie de preguntas abiertas y cerradas, las primeras sólo requieren un breve comentario por parte de los expertos encuestados. La primera parte del cuestionario solicita información sobre aspectos personales de los expertos y la institución en la que trabajan, a fin de obtener datos que permitan caracterizarlos y referenciar sus perspectivas. La segunda parte trata de que el experto de su opinión sobre aspectos generales que pueden reflejar las tendencias en el área de las energías renovables y especialmente en el campo de la energía eólica y los generadores.

Teniendo en cuenta la orientación del cuestionario le solicito que lo evalúe y le ruego que reformule las preguntas que le parezcan poco comprensibles e indique otros aspectos que a su criterio mejorarían el cuestionario.

Agradecemos muy sinceramente su disponibilidad y colaboración. Atentamente.

*Pedro García Gómez*

Fig. V-4: Escrito dirigido a los evaluadores externos

#### **V.4.1 Información sobre los evaluadores**

Con objeto de conocer la idoneidad de los dos instrumentos diseñados para la presente investigación se ha pedido la opinión de dos evaluadores externos que han emitido los informes correspondientes. Dichos expertos son:

- D. Ramón Blasco Giménez, Doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad de Nottingham (Reino Unido), es investigador en las áreas de Control de Accionamientos Eléctricos, Control e Integración de Sistemas Eólicos y Control Inteligente de Sistemas Industriales y ha emitido su opinión (Informe I) sobre la pertinencia de las variables explicativas (criterios y subcriterios) y su consideración en el cuestionario. Lo ha hecho desde su perspectiva de experto en aerogeneradores.
  
- Dña. Elsa Hernández Meda, Doctora en Psicología por la Universidad de Valencia, ha desarrollado su trabajo de investigación en las áreas de psicología social y psicología del trabajo y posee una amplia experiencia en el diseño y desarrollo de cuestionarios y su tratamiento estadístico. Ha emitido su informe (Informe II) sobre la pertinencia del modelo de cuestionario.

En las páginas siguientes se presentan ambos informes y el proceso seguido para obtener un modelo de cuestionario depurado que nos permitirá conocer la opinión y valoración del panel de expertos.

#### **V.4.2. Informes de los evaluadores y adaptación del cuestionario**

##### Informe I

D. Pedro García Gómez me ha presentado un *listado inicial de alternativas y variables explicativas* que forman parte del *cuestionario inicial* y me ha informado que el objetivo que espera alcanzar, utilizando estas herramientas, es poder entrevistar a expertos y conocer su opinión sobre las tendencias en el área de las energías renovables (con un horizonte temporal fijado en 2015) y, a partir de este conocimiento, poder seleccionar el sistema de generación eólica con una mayor probabilidad de implantación en el mercado español. A la vista de lo presentado y a petición suya, efectúo las siguientes observaciones:

1. Mis opiniones se centran en las variables explicativas que integran el cuestionario y no en el formato en que se presenta el cuestionario.
2. Desde la perspectiva actual, deben suprimirse las variables C1.2, C1.3 y C1.4 ya que prácticamente no son utilizados en España, aunque sí son de aplicación en países en desarrollo, en los cuales se ubican en lugares aislados. Debería incluirse el generador asíncrono de doble velocidad. Los otros dos tipos de generador considerados (síncrono multipolar sin caja de multiplicación y asíncrono de doble alimentación) son adecuados.
3. Como consecuencia de lo anterior, debería suprimirse en el listado de variables explicativas todo lo referente a los sistemas híbridos eólico – diesel, eólico – solar y eólico – fotovoltaico – diesel. Concretamente en el caso de la variable C2 (Coste) en donde no hay que considerar costes derivados de la fabricación de los módulos diesel, fotovoltaico y combustible. En este apartado y concretamente en el coste de Instalación (C2.6), además del transporte se debería indicar que se incluye el coste de las líneas de evacuación de energía. También se deberían considerar el coste de desmontaje de la instalación al finalizar la concesión.
4. Las variables Impacto ambiental (C3) y emplazamiento (C4) están bien tratadas.

5. En el caso de la variable tipología (C5) es necesario considerar que los generadores actuales y los que se encuentran en fase de desarrollo no efectúan un almacenamiento de energía, sino que su producción viene regulada por la variación de la velocidad de las palas, esta regulación se lleva a cabo mediante el cambio de ángulo de pitch (o ángulo de paso de las palas). Dentro de las tipologías existentes, la de mayor implantación en España es, y tiene perspectivas de seguirlo siendo en el período considerado, la de aerogenerador de tres palas de velocidad variable y con control de pitch (para optimizar la obtención de energía a partir del cambio de ángulo de paso de las palas). Como consecuencia de todo ello suprimiría las variables C5.1, C5.2, C5.3 y C5.9, en el caso de esta última el motivo es que todos los aerogeneradores que se están instalando y desarrollando en España son de eje horizontal. Las variables C5.4 y C5.8 deberían ser consideradas como una característica generalizada, al igual que antes mencionaba el eje horizontal y por tanto sería conveniente no mencionarlas en C5.
6. Si el investigador desea considerar mis opiniones anteriores sobre las variables, éstas deberían trasladarse a las alternativas, eligiendo por consiguiente aerogeneradores-tipo que las incorporasen.
7. En cuanto al cuestionario, creo que integra adecuadamente la lista de criterios y alternativas.

*Ramón Blasco Giménez*

*Doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad de Nottingham (Reino Unido).*

A la vista del informe emitido por el Dr. Blasco, se procede a adaptar el *listado inicial de alternativas y criterios* de acuerdo con las consideraciones contenidas en él. De esta forma, se obtiene un nuevo listado que denominamos *listado de alternativas y criterios* y que se muestra a continuación:

## **Listado de alternativas y criterios**

### Criterios

#### *C1 Generador*

- C1.1 Asíncrono de doble alimentación
- C1.2 Síncrono multipolar
- C1.3 Asíncrono de doble velocidad

#### *C2 Coste*

- C2.1 Inversión efectuada en I+D.
- C2.2 Fabricación del generador eólico.
- C2.3 Instalación (incluye transporte y líneas de evacuación de energía).
- C2.4 Mantenimiento del aerogenerador o sistema.
- C2.5 Almacenamiento de la energía producida.
- C2.6 Integración en redes de distribución.
- C2.7 Desmontaje de la instalación al finalizar la concesión.

#### *C3 Medioambiente*

- C3.1 Impacto medioambiental.
- C3.2 Adecuación a la normativa.
- C3.3 Impacto en el paisaje.
- C3.4 Impacto acústico.

#### *C4 Emplazamiento*

- C4.1 Aislado.
- C4.2 Integrado en parques.
- C4.3 Terrestre.
- C4.4 Marino.

#### *C5 Tecnología incorporada*

- C5.1 Multiplicadora.
- C5.2 Velocidad variable.
- C5.3 Velocidad fija.
- C5.4 Diámetro del rotor.
- C5.5 Potencia generada.
- C5.6 Supervisión remota.
- C5.7 Control de tensión.

## Alternativas

- A1. AADA
- A2. ASMS
- A3. AADV

Como mencionamos en el apartado anterior, las alternativas, criterios y subcriterios (variables explicativas) incluidos en el listado anterior, se describen detalladamente en el Anexo II, el cual también se ha proporcionado a los validadores para que pudiesen ampliar la información si lo consideraban oportuno. En la figura VI-2 del Capítulo VI, se muestra la estructura jerárquica para la priorización de las alternativas, criterios y subcriterios que figuran en el listado anterior.

## Informe II

A la vista del denominado “cuestionario inicial” que me presenta D. Pedro García Gómez para que le dé mi opinión sobre la pertinencia de la forma en que se plantean las preguntas que lo componen, me parece oportuno exponer lo siguiente:

El formato de menús desplegables es adecuado, pues la recogida de datos se integra en un proceso de decisión multicriterio y plantea todas las posibles comparaciones entre las variables con las que se trabaja. Además permite trasladar directamente las valoraciones verbales que realiza el experto a numéricas con lo que la fiabilidad y objetividad quedan garantizadas.

En general, las preguntas que configuran el cuestionario se entienden fácilmente y, cada una de ellas, aborda únicamente una dimensión del objeto de estudio, existiendo una relación lógica con él.

*Elsa Hernández Meda*

*Doctora en Psicología por la Universidad de Valencia*

A la vista del informe emitido por la Dra. Hernández, se han tenido en cuenta sus consideraciones y se ha procedido a actualizar el cuestionario con el nuevo listado de alternativas y criterios quedando en la forma que recoge el Anexo I. A partir de él se realizará el proceso de encuestación de los expertos.

## **V.5 Panel de expertos**

Para obtener la información necesaria para la priorización de alternativas, criterios y Subcriterios, de acuerdo con la metodología del Proceso Analítico Jerárquico, se recurre a la colaboración del panel de expertos que se relacionan en el apartado V.5.2 y que han sido seleccionados de acuerdo a los criterios expuestos en el apartado V.5.1.

El panel está integrado por dieciocho expertos y se justifica, como suficiente, ese número de acuerdo a los antecedentes recogidos en el apartado V.5.3.

Al efecto de obtener la valoración de los expertos, se les envían cuatro documentos por correo electrónico: la carta solicitando su colaboración, el cuestionario, un esquema de la jerarquía establecida y una explicación de los elementos que la integran, todo ello en la forma que se expone en la mencionada carta cuyo contenido se muestra en el apartado V.5.4

### ***V.5.1 Criterios para la selección del panel de expertos***

Para seleccionar los expertos que forman parte del panel, hemos considerado que debían cumplir alguno de los siguientes requisitos:

Ingeniero Superior, Licenciado o Ingeniero Técnico en áreas de conocimiento vinculadas con el estudio de la energía eólica o el diseño y desarrollo de aerogeneradores.

Investigador en el campo de la energía eólica, que desempeñe su labor en universidades, institutos tecnológicos, instituciones y empresas de reconocido prestigio.

Director, mando intermedio o técnico medio que desempeñe su labor en empresas que fabrican generadores y especialmente aerogeneradores o en parques eólicos.

Responsable de Área, Coordinador de Proyecto, Técnico Superior o medio, vinculado a la Administración Pública y que pueda aportar información y opinión cualificada sobre las tendencias en materia de regulación y apoyo al sector de la energía eólica.

Responsable de Área, Coordinador de Proyecto, Técnico Superior o medio vinculado a empresas e instituciones que desarrollen su actividad en áreas de calidad o medioambiente.

Como podemos apreciar, los criterios empleados para la selección están relacionados con su conocimiento sobre la energía eólica y sus aplicaciones, su experiencia y su formación.

Una vez establecidos los criterios expuestos anteriormente, hemos procedido a recoger información de instituciones, empresas, administraciones públicas, centros de investigación y departamentos de universidades cuyo ámbito de conocimiento y trabajo está relacionado con la energía eólica. A partir del análisis de esta información y teniendo en cuenta el objetivo principal de nuestra tesis nos hemos dirigido a los expertos solicitando su colaboración en los términos que se especifican en el apartado V.5.3

### ***V.5.2 Justificación del número de expertos***

En la bibliografía y documentación revisada para realizar el presente trabajo de investigación no encontramos una forma exacta de determinar el número óptimo de expertos necesarios para participar en una encuesta en la que deben emitir juicios sobre selección de tecnología. Si hemos encontrado los siguientes precedentes:

Estudios realizados por investigadores de la Rand Corporation<sup>5</sup>, señalan un mínimo de 7 expertos, y exponen que el error disminuye notablemente por cada experto añadido hasta llegar a los siete expertos, pero a partir de esta cantidad, la disminución del error por cada experto añadido no es muy significativa. Además, señalan que no es aconsejable recurrir a más de 30 expertos, pues la mejora en la previsión es muy pequeña y normalmente el incremento en coste y trabajo de investigación no compensa la inclusión de este número de expertos.

Este criterio también es seguido por el Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI) que para la elaboración de sus estudios sobre prospectiva en áreas tecnológicas, utilizan grupos de expertos no superiores a 15. De hecho varios de los estudios realizados por el OPTI a nivel nacional han sido publicados con la opinión de 9 expertos.

Delbecq et al. (1975)<sup>6</sup> propone que el panel de expertos esté integrado por un grupo que oscile entre 5 y 9 personas.

Murry and Hammons (1995)<sup>7</sup> sugieren que si se utiliza un método modificado de Delphi, debe contarse con la opinión de un grupo de expertos cuyo número oscile entre 10 y 30.

Che-Wei, Chang et al. (2007)<sup>8</sup> de la Universidad de Yuanpei (Taiwan) aplican el Proceso Analítico Jerárquico para seleccionar la mejor máquina de corte, utilizando un grupo inicial de 13 expertos.

Vicent S. Lai et al. (2002)<sup>9</sup> de Lingnan University aplican la metodología AHP para selección de software y obtiene la información necesaria de entrevistas realizadas a 6 expertos en el tipo de software que evalúan.

---

<sup>5</sup> Norman C. Dalkey, Bernice Brown y S. Cochran, "The Delphi Method, III: Use of self rating to improve group estimates". Technological Forecasting and Social Change, vol 1, 1970, pp. 283-291.

<sup>6</sup> Delbecq, A.L. et al. (1975). Group techniques for program planning. Illinois: Scott, Foreman and Company.

<sup>7</sup> Murry, J.W. and Hammons, J.O. (1995): *Delphi: a versatile methodology for conducting qualitative research*: Review of Higher Education, 18(4), 423 – 436.

<sup>8</sup> Che-Wei, Chang et al. (2007): *An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine*. Elsevier. Computers & Industrial Engineering 52(2007) 296 – 307.

<sup>9</sup> Vicent S. Lai et al. (2002): *Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection*. Elsevier. European Journal of Operational Research 137 (2002) 134 – 144.

Es muy importante para nuestro trabajo poner de manifiesto que tanto Vicent S. Lai et al. (2002) como Korpela and Tuominen<sup>10</sup> (selección de proyectos de logística) exponen en sus trabajos que AHP, utilizado aisladamente, es capaz de lograr el consenso entre expertos de una forma más rápida y eficaz que la metodología Delphi.

De acuerdo con los datos aportados por los autores y entidades anteriormente citados, el número menor de expertos para emitir juicios, en procesos similares al que planteamos, es 5 personas y el máximo de 30. También hay que considerar que la mayoría de ellos utilizan la valoración efectuada por grupos constituidos inicialmente por menos de 15 expertos.

Es por ello que planteamos, como punto de partida de nuestro trabajo de campo, un panel de expertos integrado por 18 expertos, a los que solicitaremos su colaboración. Continuaremos la investigación, procediendo al volcado y tratamiento estadístico de los datos, siempre que los cuestionarios debidamente cumplimentados que recibamos se correspondan, al menos, con el 50% de los expertos que integran el panel, o sea: 9.

---

<sup>10</sup> Korpela, J. and Tuominen, M. (1995): *Group decision support for defining the vision and strategic goals for distribution logistics*. Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 1995, pp. 475 - 484.

### V.5.3 Carta al panel de expertos

Para solicitar su colaboración en la investigación se envía a cada experto, por correo electrónico, la carta siguiente acompañada del cuestionario, un esquema de la jerarquía establecida y una explicación de los elementos que la integran.

Estimado Sr...../Sra.....

Estoy realizando una tesis doctoral cuyo objetivo es desarrollar un método para seleccionar un aerogenerador-tipo en función de múltiples criterios de evaluación. Para llevarla a cabo, es necesario conocer la opinión de los expertos sobre la situación actual del mercado español de aerogeneradores y su futuro hasta 2015. A tal efecto hemos desarrollado un cuestionario que le solicitamos cumplimente.

Verá que el **cuestionario** está realizado en una hoja de Excel y va acompañado de otras dos hojas: la primera contiene un **esquema** donde se muestra la jerarquía de criterios y subcriterios utilizados y de en la segunda hoja se detallan las **características de las alternativas** con las que trabajamos. El esquema y el cuestionario se han construido de acuerdo al Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty.

Le sugerimos que siga estos pasos para emitir sus opiniones:

1. Observe el **esquema** y verá la estructura jerárquica que planteamos.
2. Para su mayor comodidad, puede rellenar el cuestionario directamente en el ordenador. Necesitará un Microsoft Excel 97-2003 o posterior para que los menús desplegables funcionen correctamente. Estimamos que en unos 15 minutos puede cumplimentarse.
3. Lea detenidamente cada enunciado, ellos le irán introduciendo en el manejo del cuestionario y la mecánica de comparación y valoración, por parejas de criterios y subcriterios, que utiliza AHP.
4. Una vez complete el cuestionario, o cada vez que lo estime conveniente, guárdelo para no perder su trabajo.

Por favor, remita el cuestionario cumplimentado a: [pegarcia@upv.es](mailto:pegarcia@upv.es). Le garantizamos la confidencialidad de sus respuestas y, si lo desea, una vez analizados los datos de todos los expertos consultados le enviaremos los resultados obtenidos.

Muchas gracias por su colaboración.

Pedro García Gómez.

Fig. V-5: Carta al panel de expertos

## **V.6 Conclusiones**

En el presente capítulo hemos identificado, a partir de la información obtenida en el Capítulo IV, un conjunto de factores críticos y las alternativas de solución a nuestro problema de selección de aerogeneradores. Lo hemos sometido a validación externa y, tras el informe emitido, hemos concluido cual era el listado de variables factores y alternativas que deberían ser considerados en el camino hacia la solución del problema.

El mencionado listado, se ha integrado en un cuestionario, que también ha sido sometido a evaluación externa. A partir del informe emitido, hemos concluido cual era el diseño adecuado para el cuestionario que se utilizará para obtener la información de los expertos.

Hemos determinado las características que debería tener el panel de expertos que será encuestado y, revisada la literatura correspondiente, se ha concluido y justificado el número de expertos necesarios.

Una vez identificados los criterios, subcriterios y alternativas de solución a nuestro problema de investigación, es necesario encuestar a los expertos, volcar y tratar la información obtenida aplicando el Proceso Analítico Jerárquico, a fin de priorizarlos y obtener la alternativa más idónea.

## **Capítulo VI**

### **Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico para la priorización de alternativas.**



## VI.1 Introducción

En el capítulo anterior, se han identificado los factores críticos (criterios y subcriterios) y se han establecido las diferentes alternativas a considerar en el problema complejo de selección de un aerogenerador. El planteamiento de este problema es coincidente con el que formulan Aragonés *et al.* (2004), quienes comentan que es posible encontrar la solución a problemas de decisión multicriterio, mediante la utilización de los métodos de análisis de decisión multicriterio (MCDM), los cuales han tenido un importante avance a partir de las últimas dos décadas del siglo XX, debido al desarrollo y la evolución de la informática y especialmente del software.

De acuerdo con Moreno *et al.* (2001), los métodos de análisis de decisión multicriterio o técnicas de decisión multicriterio (TDM), son un conjunto de herramientas y procedimientos utilizados en la resolución de problemas de decisión complejos, en los que intervienen diferentes actores y criterios, éstas técnicas pueden clasificarse conforme a numerosos aspectos, tal como expusimos en los Capítulos I y II, entre los cuales destaca la consideración simultánea de todos los criterios, lo que implica la generación de soluciones eficientes.

En el capítulo I, hemos constatado la existencia de diversos métodos de análisis de decisión multicriterio (AHP, ANP, ELECTRE y PROMETHE, entre otros), que permitirían abordar el problema planteado (Caballero 2005).

En el capítulo II justificamos porqué, de los métodos mencionados en el párrafo anterior, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) era el más idóneo para problemas de selección de tecnología. También vimos que es una técnica de decisión multicriterio propuesta por el profesor Thomas L. Saaty, para abordar la resolución de problemas complejos. Su diseño permite la utilización de elementos racionales e intuitivos por parte del decisor, para seleccionar la mejor alternativa con respecto a varios criterios definidos con anterioridad. También en el capítulo II vimos que, en este proceso, los encargados de emitir los juicios realizan comparaciones pareadas entre los criterios y subcriterios definidos en la estructura de decisión y que el proceso tiene en cuenta la inconsistencia debida a la falta de precisión de la mente humana (Saaty y Vargas, 2001). Además, el método AHP debido a sus características, se define como una herramienta útil sobre todo para establecer prioridades dentro de un determinado problema de toma de decisión (Aragonés *et al.*, 2004).

En el presente capítulo se utiliza la metodología AHP para priorizar los factores críticos (criterios y subcriterios), identificados en el capítulo anterior, con objeto de seleccionar el tipo de aerogenerador (alternativa) más adecuado a las previsibles demandas del mercado. Como herramientas de ayuda a la decisión, se utilizan los programas informáticos Expert Choice (versión 11), Derive (versión 6) y Microsoft Excel (2007).

## **VI.2 Objetivo principal**

El objetivo principal de este capítulo es determinar, mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico a la información obtenida del grupo de expertos, la escala de prioridades de los factores críticos (criterios y subcriterios) y de las alternativas de solución.

## **VI.3 Metodología**

La metodología seguida en este capítulo, corresponde a la secuencia propuesta por Ho *et al.* (2006) para la solución de problemas mediante AHP, esquematizada en la Figura VI-1. Una vez establecidas las respectivas tablas de valores de prioridad de criterios y alternativas de solución y de acuerdo a lo propuesto por Aragonés *et al.* (2000), se realiza un análisis de sensibilidad para estudiar la influencia que pudiesen tener determinadas variaciones en los pesos de los criterios obtenidos, teniendo en cuenta, de esta forma, la imprecisión atribuida a los expertos, en el momento de realizar las evaluaciones pareadas.

A continuación se presenta, de manera detallada, cada una de las fases metodológicas seguidas en este capítulo para la aplicación del proceso de análisis jerárquico con objeto de solucionar el problema de selección planteado.

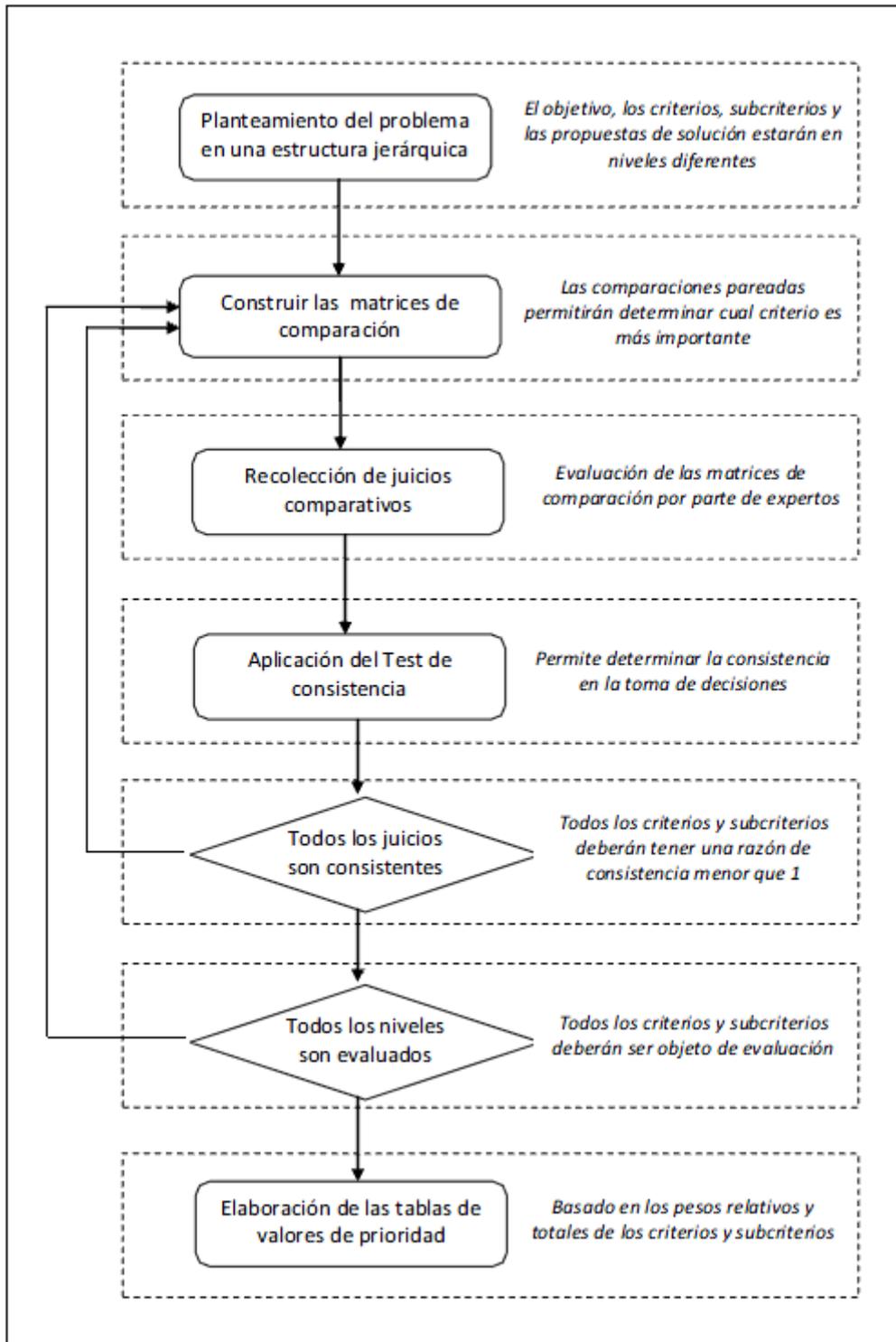


Figura VI-1: Diagrama de flujo de un proceso de análisis jerárquico

### ***VI.3.1 Planteamiento del problema en la estructura jerárquica***

La primera fase a abordar, en la resolución del problema, requiere el conocimiento profundo del asunto a resolver, debido a que en la construcción de la jerarquía hay que incluir suficientes detalles relevantes para describir completamente el problema, considerar el ambiente que lo rodea e identificar los temas que contribuyen a la solución del mismo (Saaty, 1997).

Aunque según Saaty (1997) no existe una regla inviolable para construir jerarquías, se debe tener en cuenta que en una jerarquía funcional, los sistemas complejos se descomponen en sus partes constituyentes de acuerdo con sus relaciones esenciales. El concepto anterior constituye la base sobre la que estructuramos nuestra jerarquía, definiendo en primer lugar los criterios, para efectuar la selección de alternativas, como las partes constituyentes del problema y los subcriterios como sus relaciones fundamentales.

En nuestra investigación, el problema complejo se plantea con una estructura similar a la utilizada en los estudios realizados por Sambasivan y Fei (2007) y Pun y Hui (2001), compuesta por cuatro niveles enumerados del nivel 0 al nivel 3 (Figura VI-2), en la que el nivel 0 está definido por el objetivo o meta que se pretende alcanzar (selección del aerogenerador) y sobre la cual giran todos los demás elementos de la jerarquía.

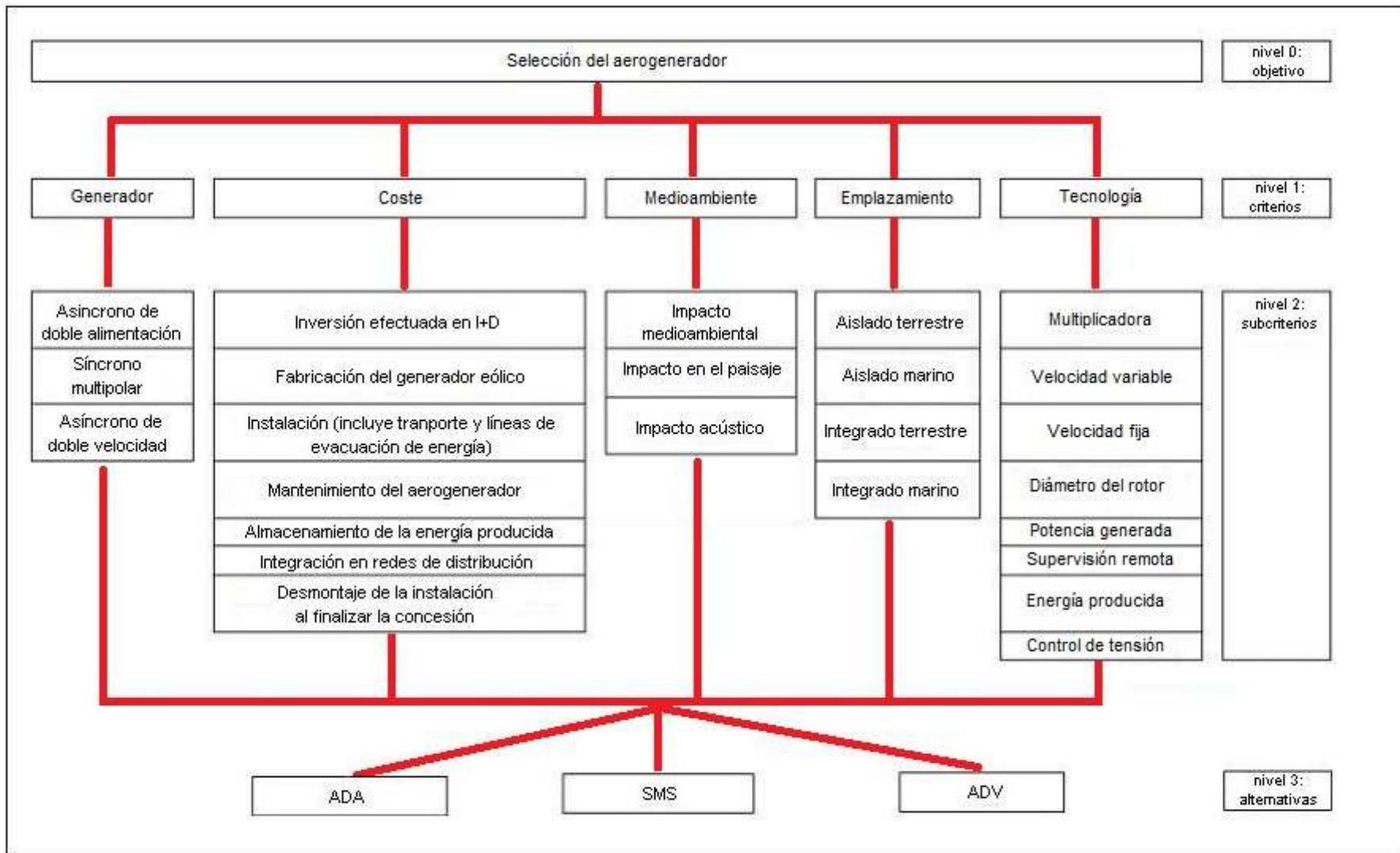


Fig. VI-2: estructura jerárquica para la priorización de alternativas, criterios y subcriterios

El nivel 1 está definido por los cinco criterios que han sido identificados en el capítulo anterior, mediante la revisión de las fuentes y la opinión formulada por los expertos durante el proceso de evaluación externa a que se sometió el listado de criterios y subcriterios. Los criterios son ahora definidos como las partes constituyentes del problema, la situación de los criterios en el nivel 1 de la estructura jerárquica, permite determinar el nivel de afectación que cada uno de ellos realiza sobre el objetivo.

En el nivel 2 de la estructura jerárquica se han situado los subcriterios correspondientes a cada uno de los criterios del nivel 1. Estos subcriterios son los elementos constituyentes de los factores críticos y corresponden básicamente a los generadores y tecnología incorporada, interacción con el medioambiente, emplazamiento y coste del aerogenerador. Cada uno de los factores y subfactores críticos incluidos en el esquema, se describen detalladamente en el Anexo II.

El nivel 3 contiene las alternativas que se corresponden con los aerogeneradores – tipo que hemos propuesto como posibles soluciones a nuestro problema de investigación. Dichas alternativas de solución son evaluadas en una matriz diferente. Aunque los resultados finales, de operar con esta matriz, no dependen directamente de los resultados obtenidos en los niveles 1 y 2, si están influenciados por ellos, ya que en la valoración realizada por los expertos sobre las alternativas, subyace el conocimiento previo de los niveles anteriores. Esto permite la asignación de juicios más concienzudos y la obtención de una solución final más acertada. Situándolas en el nivel 3 de la estructura jerárquica, se busca establecer la escala de prioridades de las alternativas de solución con respecto a los niveles 0, 1 y 2 en conjunto y, por consiguiente, la determinación del orden más adecuado de implementación de cada una de ellas, buscando resolver las dificultades que aparecen impuestas por los criterios y subcriterios evaluados con anterioridad.

### ***VI.3.2 Construcción de las matrices de comparación***

Como vimos en el Capítulo II, Saaty (1997, 2004 y 2008) propone que la información correspondiente a los juicios de valor se registre disponiéndola como elementos en una matriz recíproca positiva (Figura VI-3), en la que cada elemento de la matriz corresponde a la comparación de los criterios situados en las filas con los criterios ubicados en las columnas. Así, por ejemplo, el elemento  $a_{ij}$  corresponde a la

comparación del criterio de la fila  $A_i$  con el criterio de la columna  $A_j$ . Los elementos de la diagonal principal de la matriz serán rellenos con la unidad debido a que corresponden a la comparación de cada criterio consigo mismo, es decir, el elemento  $a_{ii} = 1$ , corresponde a la comparación de la fila representada por el criterio  $A_i$  con columna que representa el criterio  $A_i$ , de esta forma se asegura que se comparan todas las posibles parejas de criterios que componen un nivel determinando, en la estructura jerárquica definida.

P	$A_i$	$A_j$	$A_k$
$A_i$	1	$a_{ij}$	$a_{ik}$
$A_j$	$1/a_{ij}$	1	$a_{jk}$
$A_k$	$1/a_{ik}$	$1/a_{jk}$	1

**Fig. VI-3** Matriz recíproca para comparación pareada de juicios en AHP

Antes de comenzar el proceso de comparación se debe definir el parámetro P con respecto al cual se compara cada pareja de criterios, la elección del parámetro de comparación, además de coadyuvar en la solución del problema complejo planteado, debe permitir que un evaluador determine en qué medida supera un criterio al otro con respecto a una escala de valoración y además, reflejar una relación de dependencia entre los elementos del nivel que se evalúa con respecto al nivel de orden superior en la jerarquía definida.

La escala de comparación que se utiliza en la técnica AHP, fue propuesta por Saaty (1997) y corresponde a una escala que permite la posibilidad elegir en que magnitud un criterio es más o menos dominante que otro, con respecto a un parámetro determinado. La escala posibilita a los evaluadores expresar los juicios en valores numéricos o mediante expresiones verbales.

A pesar de que el método AHP viene siendo utilizado con éxito en los últimos 20 años, las principales dificultades se han generado por la controversia con el uso de su escala (Dong *et al.*, 2008, Takeda *et al.*, 1987), pero su utilización se apoya en el hecho de que la experiencia ha confirmado que, la escala de nueve unidades, permite reflejar el grado hasta el cual se puede discriminar la intensidad de las relaciones entre elementos, además de permitir derivar juicios tangibles cuando son evaluados

aspectos intangibles (Saaty 1997 y 2008). A continuación mostramos la escala fundamental de Saaty utilizada para valorar los juicios en el método AHP.

### ***Escala numérica Escala Verbal***

9	Extremadamente más importante
7	Fuertemente más importante
5	Notablemente más importante
3	Levemente más importante
1	Igualmente importantes
1/3	Levemente menos importante
1/5	Notablemente menos importante
1/7	Fuertemente menos importante
1/9	Extremadamente menos importante

Teniendo en cuenta que la Figura VI-3 representa una matriz recíproca cuadrada de orden  $n$ , para rellenarla sólo es necesario conocer los elementos que conforman el triángulo superior a la diagonal principal, lo que implica que en cualquier matriz de orden  $n$  el número mínimo de juicios requeridos estará dado por (Saaty, 1990; Carmone *et al.*, 1997):

$$\text{Número de juicios} = n(n-1)/2$$

Donde  $n$  es el número de filas de la matriz.

Incluir la información de los juicios en matrices de comparación, tal como propone Saaty (1997, 2004), supone cierta dificultad cuando los encargados de emitir las valoraciones no están familiarizados con el proceso de análisis jerárquico (AHP) o cuando la comunicación entre ellos y el investigador encargado de realizar el análisis no es personalizada (la comunicación directa y personalizada favorece la explicación del mecanismo para rellenar el cuestionario y la resolución de dudas que pudieran plantearse).

En el caso de esta tesis, el hecho de que el investigador que realizó el análisis se encontrara en Valencia (España) y los encargados de emitir los juicios estuviesen en

diversos puntos de la geografía española, supuso una dificultad adicional en el proceso de recolección de esta información. Para superarla, utilizamos el correo electrónico como medio de comunicación más económico, rápido y preciso. Se desarrolló una hoja de cálculo con Microsoft Excel 2007, que contenía el cuestionario conformado con menús desplegable con la escala verbal de Saaty. Todo los detalles referentes al diseño y desarrollo del cuestionario se abordaron en el capítulo anterior y el cuestionario se muestra íntegramente en el Anexo I.

### **VI.3.3 Juicios comparativos**

El proceso de análisis jerárquico (AHP) es una metodología en la cual se permite la toma de decisiones por parte de un decisor en particular o mediante la agregación de juicios emitidos por un grupo decisor (Bolloju, 2001). De acuerdo con Gonzales *et al.* (2003), para establecer la valoración de la importancia relativa entre los factores internos o atributos en un proceso de análisis jerárquico, se recomienda constituir un grupo de expertos, seleccionado de forma que todos sus miembros cumplan la condición fundamental de tener un alto grado de conocimiento y experiencia en el problema y su resolución.

En este trabajo de investigación, en el que el objetivo general del modelo planteado es priorizar los factores críticos y las alternativas de solución para seleccionar el tipo de aerogenerador más idóneo en función de múltiples criterios de evaluación, se decide que la valoración de la jerarquía sea realizada por expertos. Esta misma decisión fue adoptada por Parra *et al.* (2005) y García *et al.* (2005) y está justificada dada la complejidad de las materias tratadas en el modelo, en el que se requiere de la orientación profesional de los expertos y su capacidad para contrastar hipótesis.

Para la valoración de los juicios de esta investigación se constituyó un grupo decisor, caracterizado por su experiencia, conocimiento del tema y por desarrollar su labor profesional directamente con el ámbito de la energía eólica. Este grupo fue seleccionado de acuerdo a los criterios establecidos en el apartado V.5.1 *Criterios para la selección del panel de expertos* del Capítulo anterior. En total se recibieron 10 cuestionarios debidamente cumplimentados por los expertos seleccionados.

Con respecto al número de integrantes en un grupo decisor, Greenbaum (2003) citado por García *et al.* (2005), recomienda que el grupo de expertos tenga entre 6 y 12

participantes, no se recomiendan grupos menores de 4 evaluadores, ya que en general, no se obtienen realmente resultados representativos para la solución del problema complejo. Además, en el capítulo anterior, en su apartado *V.5.3 Justificación del número de expertos* se referencia detalladamente que, entre otros, Rand Corporation estima suficiente un grupo de 7 expertos, Delbecq et al. (1975) propone que el panel de expertos esté integrado por un grupo que oscile entre 5 y 9 personas y Vicent S. Lai et al. (2002) de Lingnan University aplican la metodología AHP para selección de software obteniendo la información necesaria de entrevistas realizadas a 6 expertos en el tipo de software que evalúan.

Forman y Peniwati (1998), definen dos formas de agregación de los juicios emitidos por un grupo decisor, la agregación de juicios individuales (AIJ) y la agregación de sus prioridades finales (AIP), cuya diferencia radica básicamente en que en la agregación por el método AIJ, la información se centraliza antes de ser procesada en la metodología AHP y en el caso de el método AIP, se agregan las prioridades finales obtenidas después de aplicar el proceso de análisis jerárquico. En nuestro trabajo de investigación, la información contenida en los cuestionarios recibidos, fue condensada mediante la metodología de la agregación de juicios individuales (AIJ) y posteriormente se realizó el correspondiente proceso de análisis jerárquico que estableció la escala de prioridades de los factores críticos y la escala de prioridades de las alternativas de solución en cada caso.

Los juicios individuales se agregaron utilizando como medida de centralización la media geométrica. Saaty (2001, 2004 y 2008) afirma que la agregación de los juicios individuales mediante el uso de la media geométrica, además de aportar las condiciones de unanimidad y homogeneidad, garantiza que se cumpla la condición de la reciprocidad en la que el valor recíproco de los juicios sintetizados, debe ser igual a la síntesis de los valores recíprocos de los juicios individuales.

Una vez agregados los juicios, se procedió a la determinación de los pesos relativos de los criterios en cada uno de los niveles de la jerarquía definida, utilizando para ello el programa Expert Choice v11.

### VI.3.4 Aplicación del Test de consistencia

La medida de la consistencia es una de las grandes ventajas de la utilización del método AHP, debido a que regula la incoherencia natural de la mente humana cuando emite juicios sucesivos. Al respecto, Berumen y Llamazares (2007) exponen que AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que da el decisor, de manera que si en nivel de inconsistencia se encuentra dentro del rango aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión, de lo contrario, quien toma las decisiones posiblemente tendrá que modificar los juicios antes de continuar con el estudio.

Saaty (1997) desarrolló la denominada *razón de consistencia (CR)*, que permite determinar los niveles de inconsistencia de los juicios emitidos por un evaluador o decisor. La razón de consistencia corresponde al cociente entre el índice de consistencia (CI) y el mismo índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente (CIr) (ver Tabla VI-6)

$$CR = \frac{CI}{CIr}$$

Por su parte el índice de consistencia (CI) se obtiene del cociente:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Donde  $\lambda_{\max}$  es el autovalor principal de la matriz de comparación y n el número de filas de la matriz.

También en Saaty (1997) hallamos los índices de consistencia promedio (CIr) de una matriz recíproca generada aleatoriamente que se muestran en la tabla siguiente.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CIr	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

**Tabla VI-1:** Índices de consistencia promedio

La razón de consistencia (CR) se calcula para todas las matrices formadas con los juicios condensados, obtenidos tras la agregación de las valoraciones efectuadas por los integrantes del grupo decidor (grupo de expertos). En todos los casos, la razón de consistencia deberá ser inferior a 0,1 (10%), en caso contrario, se debe proceder a mejorar la consistencia mediante la reasignación de juicios por parte de los evaluadores o mediante la utilización algoritmos desarrollados para la mejora de la consistencia.

Una vez verificado que las razones de consistencia calculadas se encuentran dentro del rango permisible, se procede a elaborar las tablas de valores de prioridad para los criterios, subcriterios y alternativas de solución. Esta tabla se construye con los valores resultantes de los vectores principales que se obtienen de cada matriz.

### **VI.3.5 Análisis de sensibilidad**

Una vez obtenidas las tablas de valores de prioridad de factores críticos y alternativas de solución, se realiza un análisis de sensibilidad utilizando la metodología propuesta por Aragonés *et al.* (2000) y Martín (2004). Utilizando el programa Expert Choice (versión 11), se seleccionaron tres escenarios diferentes. Para cada escenario se provocó intencionadamente un incremento promedio del 25% del peso relativo obtenido por los tres factores críticos que presentan un mayor peso relativo, con el fin de observar cómo se modifican el orden y la importancia de los diferentes criterios resultantes en la priorización encontrada inicialmente.

La realización de un análisis de sensibilidad robustece los resultados en un proceso de análisis jerárquico, ya que incorpora al modelo, la incertidumbre existente en la emisión de los juicios por parte del experto al valorar las comparaciones pareadas (Aguaron *et al.*, 1993).

## VI.4 Priorización de criterios

### VI.4.1 Evaluación de las matrices de decisión de los subcriterios

En este apartado, se presenta el análisis de las valoraciones de los subcriterios que componen el nivel 2 de la estructura jerárquica definida. El mencionado análisis se efectúa en el mismo orden en que se muestran los criterios en el cuestionario.

A tal efecto, se construye en primer lugar la matriz recíproca para la comparación pareada de juicios en AHP correspondiente al criterio “*emplazamiento*”. Cada elemento de esta matriz que se encuentra situado por encima de la diagonal principal es la media geométrica obtenida a partir de diez juicios, emitidos por los expertos, correspondientes a una determinada pareja de subcriterios.

Dado que los expertos expresaron su juicio de acuerdo a la escala verbal propuesta por Saaty, la media geométrica se ha obtenido transformando cada juicio emitido en forma verbal a la forma numérica, utilizando para ello la Escala fundamental de Saaty.

Con objeto de facilitar la lectura y comprensión del análisis, la matriz recíproca para comparación pareada de juicios se expresa en forma de tabla, como se muestra a continuación (Tabla VI-2), apareciendo en la primera fila y la primera columna los subcriterios relacionados con el criterio “*emplazamiento*”.

<b><i>emplazamiento</i></b>	<b>aislado marino</b>	<b>aislado terrestre</b>	<b>integrado terrestre</b>	<b>integrado marino</b>
<b>aislado marino</b>	1,000	0,121	0,117	0,114
<b>aislado terrestre</b>	8,276	1,000	1,116	1,116
<b>integrado terrestre</b>	8,559	0,896	1,000	2,829
<b>integrado marino</b>	8,777	0,896	0,354	1,000

**Tabla VI-2** Matriz de importancia relativa del factor crítico *emplazamiento*

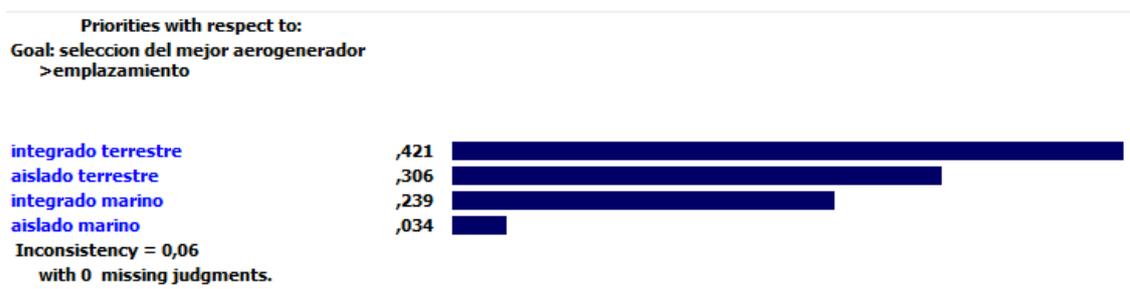
La Tabla VI-3 presenta los resultados del test de consistencia y el vector de prioridades resultante de procesar, con Derive, la matriz de datos del factor crítico *emplazamiento*. Como puede verse, la razón de consistencia obtenida es del 5,5%, lo que indica una suficiente consistencia en los juicios finales después del proceso de

agregación. Con respecto al vector de prioridades se puede observar la mayor influencia del subcriterio “*integrado terrestre*” el cual obtuvo más del 42% de la carga del vector.

Razón de consistencia	Vector de prioridades
$\lambda_{max} = 4.1457$	Integrado terrestre 0,421
$n = 4$	Aislado terrestre 0,306
$CI_r = 0,89$	Integrado marino 0,239
$CI = 0,04866$	Aislado marino 0,034
<b>CR = 0,05505</b>	

**Tabla VI-3:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio “*emplazamiento*”

La Figura VI-4 es la representación gráfica del vector de prioridades correspondiente a los subfactores dependientes del factor crítico emplazamiento. Ha sido obtenida con el programa Expert Choice y muestra la notoria influencia del subcriterio que representa la integración terrestre del aerogenerador, sobre el resto de los subcriterios relacionados con el tipo de emplazamiento, marino o terrestre, de un aerogenerador.



**Fig. VI-4:** Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *emplazamiento*

El segundo criterio evaluado es el que hemos denominado *generador*. Al igual que en el criterio anterior, se construye la matriz recíproca para comparación pareada de juicios, siendo cada elemento situado por encima de la diagonal principal, igual a la media geométrica obtenida a partir de diez juicios, emitidos por los expertos, correspondientes a una determinada pareja de subcriterios vinculados al criterio *generador*. Igual que en el caso anterior, cada valor utilizado para hallar la media geométrica, se ha obtenido mediante la transformación de la escala verbal en numérica, utilizando la Escala fundamental de Saaty (Tabla VI-4)

A continuación, se muestra en forma de tabla (Tabla VI-4) la matriz recíproca para comparación pareada de juicios, apareciendo en la primera fila y la primera columna los subcriterios relacionados con el criterio “*generador*”.

<b>Generador</b>	<b>Asíncrono doble alimentación</b>	<b>Síncrono multipolar</b>	<b>Asíncrono doble velocidad</b>
<b>Asíncrono doble alimentación</b>	1,000	4,914	9,000
<b>Síncrono multipolar</b>	0,204	1,000	4,006
<b>Asíncrono doble velocidad</b>	0,111	0,250	1,000

**Tabla VI-4:** Matriz de importancia relativa del factor crítico *generador*

La tabla VI-5 presenta los resultados del test de consistencia y el vector de prioridades resultante de procesar, con Derive, la matriz de datos del factor crítico *generador*. La razón de consistencia obtenida es del 6,6%, lo que indica una suficiente consistencia (ya que es menor del 10%) en los juicios finales después del proceso de agregación. Con respecto al vector de prioridades se puede observar la notable influencia del subcriterio “*Asíncrono de doble alimentación*” el cual obtuvo más del 74% de la carga del vector.

<b>Razón de consistencia</b>	<b>Vector de prioridades</b>
$\lambda_{max} = 3,069$	
$n = 3$	
$CI_r = 0,52$	Asíncrono doble alimentación 0,743
$CI = 0,0345$	Síncrono multipolar 0,194
<b><math>CR = 0,06634</math></b>	Asíncrono doble velocidad 0,063

**Tabla VI-5:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio “*generador*”

La Figura VI-5 es la representación gráfica del vector de prioridades correspondiente a los subcriterios dependientes del factor crítico *generador* y muestra la notoria influencia del subcriterio que representa la incorporación del generador asíncrono de doble alimentación en un aerogenerador, sobre los otros dos generadores propuestos: síncrono multipolar sin multiplicadora y asíncrono de doble velocidad.

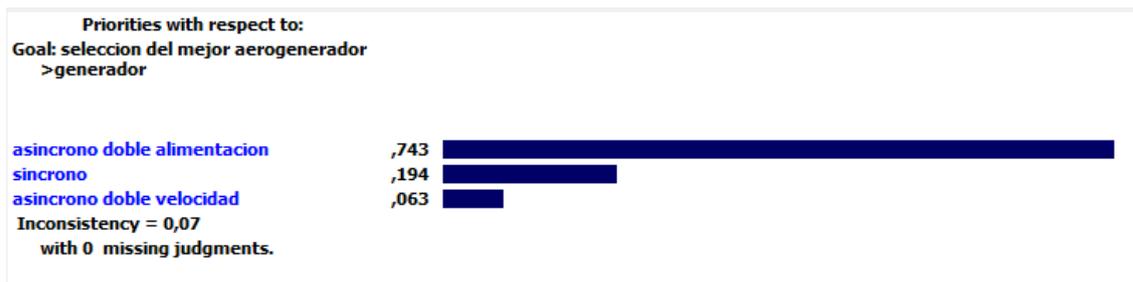


Fig. VI-5: Importancia relativa de los subfactores críticos correspondientes al factor *generador*

El tercer factor crítico evaluado es el denominado *medioambiente*. Al igual que en los dos criterios anteriores, construimos la matriz recíproca para la comparación pareada de juicios, cuyos elementos se obtienen de igual forma que se ha relatado en los dos casos anteriores. A continuación, se muestra dicha matriz en forma de tabla (tabla VI-6), apareciendo en la primera fila y la primera columna los subcriterios relacionados con el criterio “*medioambiente*”.

<i>Medioambiente</i>	impacto medioambiental	impacto paisajístico	Impacto acústico
impacto medioambiental	1,000	4,076	8,777
impacto paisajístico	0,245	1,000	4,006
impacto acústico	0,114	0,250	1,000

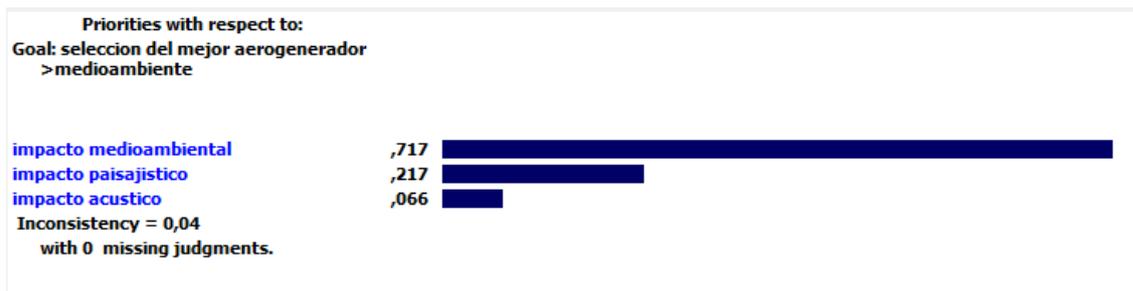
Tabla VI-6: Matriz de importancia relativa del factor crítico *medioambiente*

La Tabla VI-7 presenta los resultados del test de consistencia y el vector de prioridades resultante de procesar la matriz de datos del factor crítico *medioambiente*. La razón de consistencia obtenida es del 4,1%, lo que indica una notable consistencia en los juicios finales después del proceso de agregación. Con respecto al vector de prioridades se puede observar la fuerte influencia del subfactor “*Impacto ambiental*” el cual obtuvo más del 71% de la carga del vector.

Razón de consistencia	Vector de prioridades
$\lambda_{max} = 3,043$	
$n = 3$	
$CI_r = 0,52$	Impacto medioambiental 0,717
$CI = 0,0215$	Impacto paisajístico 0,217
<b>CR = 0,04134</b>	Impacto acústico 0,066

**Tabla VI-7:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio “*medioambiente*”

La Figura VI-6 es la representación gráfica del vector de prioridades correspondiente a los subcriterios dependientes del factor crítico *medioambiente* y muestra la gran influencia ejercida por el subcriterio que representa el impacto medioambiental de un aerogenerador, considerando este impacto como cualquiera que no sea debido a los otros dos tipos de impactos estudiados: paisajístico y acústico, siendo éste último subcriterio el que presenta la prioridad más baja (6,6%) en la valoración emitida por los expertos consultados.



**Fig. VI-6:** Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *medioambiente*

El cuarto criterio evaluado es el denominado *tecnología incorporada*. Al igual que en los casos anteriores, construimos la matriz recíproca para la comparación pareada de juicios de la forma en que se muestra a continuación (Tabla VI-8), apareciendo en la primera fila y la primera columna los siete subcriterios que hemos relacionado con el criterio “*tecnología incorporada*”.

<i>Tecnología incorporada</i>	multiplicadora	velocidad variable	velocidad fija	diámetro del rotor	potencia generada	supervisión remota	control de tensión
multiplicadora	1,000	0,117	6,119	0,163	0,124	0,235	0,301
velocidad variable	8,559	1,000	6,882	0,517	0,245	4,036	2,829
velocidad fija	0,163	0,145	1,000	0,114	0,126	0,114	0,111
diámetro del rotor	6,119	1,933	8,777	1,000	0,492	2,977	2,034
potencia generada	8,070	4,076	7,937	2,034	1,000	4,006	3,157
supervisión remota	4,248	0,248	8,777	0,336	0,250	1,000	1,000
control de tensión	3,323	0,354	9,000	0,492	0,317	1,000	1,000

**Tabla VI-8** Matriz de importancia relativa del factor crítico “*tecnología incorporada*”

La tabla VI-9 presenta los resultados del test de consistencia y el vector de prioridades resultante de procesar la matriz de datos del criterio *tecnología incorporada*. La razón de consistencia obtenida es del 9,4%, lo que indica que, aunque es admitida por ser inferior al 10%, muestra una menor consistencia en los juicios finales, con respecto al resto de criterios considerados, después del proceso de agregación. En el vector de prioridades observamos una mayor influencia del subfactor “*potencia generada*” el cual obtuvo más del 34% de la carga del vector.

Razón de consistencia	Vector de prioridades
$\lambda_{max} = 7.770$ $n = 7$ $CI_r = 1,35$ $CI = 0,1280$ <b>CR = 0,09481</b>	Potencia generada 0,344
	Diámetro del rotor 0,232
	Velocidad variable 0,197
	Control de tensión 0,097
	Supervisión remota 0,092
	Multiplicadora 0,039
	Velocidad fija 0,018

**Tabla VI-9:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio “*tecnología incorporada*”

La Figura VI-7 es la representación gráfica del vector de prioridades correspondiente a los subcriterios dependientes del factor crítico *tecnología incorporada* y, como hemos expresado en el párrafo anterior, muestra que el subcriterio con una mayor influencia relativa es la *potencia generada* por el aerogenerador, no existiendo una amplia prevalencia sobre los subcriterios *diámetro del rotor* y *velocidad variable*. El subcriterio que presenta la prioridad más baja (1,8%) en la valoración emitida por los expertos consultados es la *velocidad fija*, pues estiman que prácticamente no será incorporada por los aerogeneradores que se desarrollen hasta 2015.

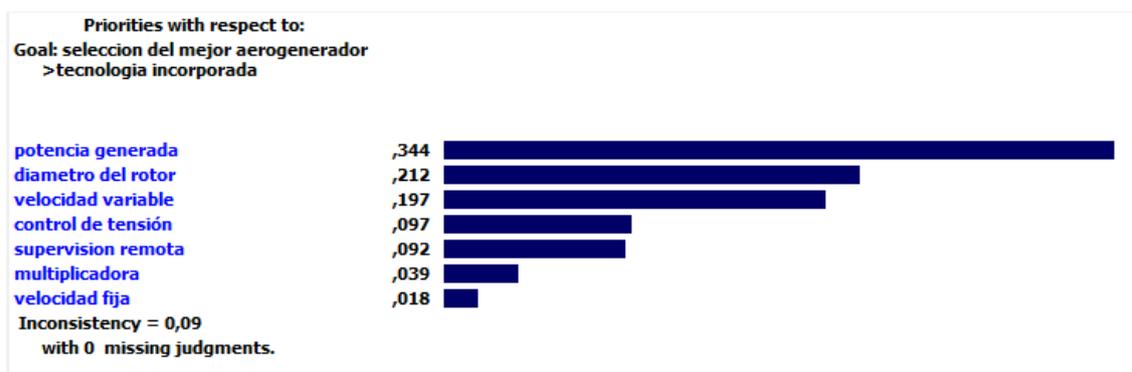


Fig. VI-7: Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *tecnología incorporada*

El quinto criterio evaluado es el denominado *costes*. Al igual que para los cuatro criterios anteriores, construimos la matriz recíproca, que se muestra en la tabla siguiente:

Costes	inversión en I+D	fabricación	instalación	mantenimiento	almacenamiento	integración	desmontaje
inversión en I+D	1,000	0,197	0,201	0,492	8,559	1,933	2,034
fabricación	5,082	1,000	2,034	1,933	8,559	7,178	5,000
instalación	4,963	0,492	1,000	1,933	9,000	7,000	4,006
mantenimiento	2,034	0,517	0,517	1,000	9,000	4,006	4,076
almacenamiento	0,117	0,117	0,111	0,111	1,000	0,169	0,141
integración	0,517	0,139	0,143	0,250	5,916	1,000	0,165
desmontaje	0,492	0,200	0,250	0,245	7,068	6,067	1,000

Tabla VI-10: Matriz de importancia relativa del factor crítico *costes*

La Tabla VI-11 muestra los resultados del test de consistencia y el vector de prioridades resultante de procesar la matriz de datos del criterio *costes*. La razón de consistencia obtenida es del 9,4%, lo que indica que, aunque es admitida por ser inferior al 10%, muestra una menor consistencia en los juicios formulados por los expertos, con respecto al resto de criterios considerados, después del proceso de agregación. En el vector de prioridades observamos una mayor influencia del subcriterio “*fabricación*” el cual obtuvo más del 32% de la carga del vector.

Razón de consistencia	Vector de prioridades	
$\lambda_{max} = 7.7640$ $n = 7$ $CI_r = 1,35$ $CI = 0,1273$ <b>CR = 0,09429</b>	Fabricación	0,328
	Instalación	0,262
	Mantenimiento	0,171
	Inversión en I+D	0,091
	Desmontaje	0,088
	Integración	0,043
	Almacenamiento de la energía	0,017

**Tabla VI-11:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio “*costes*”

La Figura VI-8 nos muestra la representación gráfica del vector de prioridades correspondiente a los subcriterios dependientes del factor crítico *costes*. En ella observamos que el subcriterio que presenta una mayor influencia relativa es la *fabricación* del aerogenerador. Como en el caso anterior, no existe una prevalencia destacada de éste subcriterio con respecto al denominado *instalación* del aerogenerador en su emplazamiento. El subcriterio que presenta la prioridad más baja (1,7%) es el *almacenamiento* de la energía, debido a que con la tecnología actual resulta caro y no se utiliza ni esperan los expertos que se utilice, en el intervalo temporal fijado.

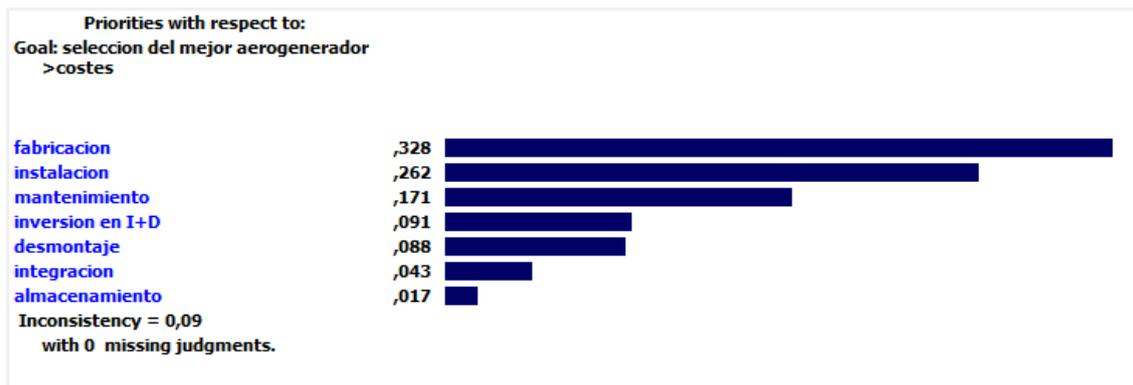


Fig. VI-8: Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor costes

#### VI.4.2 Evaluación de la matriz de decisión de los criterios

Una vez realizada, en el apartado anterior, la evaluación de los subcriterios dispuestos en el nivel 2 de la estructura jerárquica definida, procedemos a la evaluación de los factores críticos situados en el nivel 1. La Tabla VI-12 presenta la matriz de decisión correspondiente a los factores críticos (criterios) para seleccionar el aerogenerador más idóneo, la valoración del conjunto de los factores críticos se realiza mediante comparaciones binarias, determinando que factor crítico afecta más a la meta definida en la estructura jerárquica (Figura VI-2).

Utilizando el mismo procedimiento que en los subfactores críticos (subcriterios), los juicios emitidos por los integrantes del grupo decisor (grupo de expertos consultados) fueron agregados mediante la utilización de la media geométrica y los valores agregados permitieron determinar los elementos de la matriz integrada en la tabla siguiente:

Costes	generador	coste	medioambiente	emplazamiento	tecnología incorporada
generador	1,000	0,197	3,157	0,214	1,000
coste	5,082	1,000	7,117	1,116	5,082
medioambiente	0,317	0,141	1,000	0,149	0,218
emplazamiento	4,669	0,896	6,711	1,000	1,116
tecnología incorporada	1,000	0,197	4,588	0,896	1,000

Tabla VI-12: Matriz de importancia relativa de los criterios con respecto al objetivo

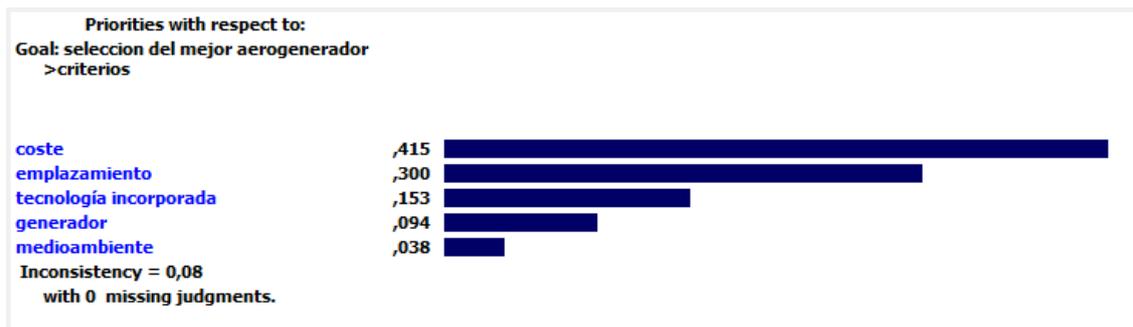
El vector de prioridades de la Tabla VI-13, representa la escala de prioridades de los factores críticos (criterios) sobre la selección del aerogenerador, de acuerdo a la opinión del grupo de expertos consultado, el factor que mas afecta a la selección del aerogenerador son los *costes* considerados (especialmente los de fabricación, instalación y mantenimiento) que obtuvo un peso relativo del 41,5%, seguido de los factores *emplazamiento* y *tecnología* incorporada que obtuvieron un peso relativo de 30% y el 15,3% respectivamente.

Razón de consistencia	Vector de prioridades	
$\lambda_{max} = 5.285$	Costes	0,415
$n = 5$	Emplazamiento	0,300
$CIr = 1,11$	Tecnología incorporada	0,153
$CI = 0,07125$	Generador	0,094
<b><math>CR = 0,06418</math></b>	Mediambiente	0,038

**Tabla VI-13:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes a la matriz de criterios

El test de consistencia de la matriz de factores críticos (criterios) arrojó una razón de consistencia del 6,4% (Tabla VI-13), lo que indica que los valores incluidos en la matriz, producto de los juicios emitidos por el grupo decisor, guardan una coherencia adecuada (inferior al 10%).

La Figura VI-9, representa gráficamente la escala de prioridades de los factores críticos (criterios) para la selección del aerogenerador, dispuesta en orden descendente. Parece oportuno considerar que además de los tres primeros factores que resultaron con un mayor peso relativo, también será necesario considerar los demás criterios y no descartarlos en estudios posteriores que pudiesen surgir a raíz del presente trabajo de investigación.



**Fig. VI-9:** Importancia relativa de los criterios con respecto a la selección del aerogenerador

En resumen, los resultados del proceso de análisis jerárquico de los niveles 1 y 2 con respecto a la selección del aerogenerador más idóneo para su implantación en el mercado español hasta 2015, se muestran en la tabla de valores de prioridad (Tabla VI-19). En la parte superior de la tabla, se presenta la escala de prioridades de los factores críticos (criterios) dispuesta en orden descendente, aquí los factores críticos presentan los mismos valores entre los pesos global y local, debido a que corresponde a la evaluación del nivel de la jerarquía que depende directamente de la meta propuesta y por encima de ellos no existe otro nivel de criterios que los pueda afectar.

En la segunda parte de la Tabla VI-14, se presenta la escala de prioridades de los subfactores críticos (subcriterios) en orden descendente de acuerdo al peso normalizado global alcanzado por cada subfactor. Los pesos normalizados locales corresponden a la evaluación de los subfactores críticos dentro de los conjuntos a los que cada uno pertenece y los pesos normalizados globales corresponden a la ponderación de los pesos locales de cada subfactor, con respecto a los pesos locales obtenidos por el factor crítico (nivel superior) al cual pertenece cada uno.

En la tabla VI-19 observamos que, en la escala de prioridades de los factores críticos, el criterio que mas influye, en opinión de los expertos consultados, en la selección del aerogenerador es *costes*, apareciendo con un peso relativo global de 0,415 referido al conjunto de criterios estudiados. Este resultado refleja la importancia que los expertos conceden a los costes (especialmente fabricación, instalación y mantenimiento) en la selección del tipo de aerogenerador.

En cuanto a la escala de prioridades de los subcriterios, vemos que en orden de importancia, los expertos sitúan en primer lugar el subcriterio *fabricación* con un peso relativo global de 0.136, en clara relación con el criterio *costes* a cuyo conjunto pertenece. Siguen en orden de importancia los subcriterios *Integrado terrestre* con un

peso relativo global de 0.126 e *instalación* que presenta un peso relativo global de 0.109. Lo cual sigue confirmando la importancia que los decisores adjudican al criterio *costes*, seguido del tipo de *emplazamiento* para la selección del aerogenerador.

CRITERIOS	local	global
<b>Costes</b>	0,415	0,415
<b>Emplazamiento</b>	0,300	0,300
<b>Tecnología incorporada</b>	0,153	0,153
<b>Generador</b>	0,094	0,094
<b>Medioambiente</b>	0,038	0,038
SUBCRITERIOS		
<b>Fabricación</b>	0,328	0,136
<b>Integrado terrestre</b>	0,421	0,126
<b>Instalación</b>	0,262	0,109
<b>Aislado terrestre</b>	0,306	0,092
<b>Integrado marino</b>	0,239	0,072
<b>Mantenimiento</b>	0,171	0,071
<b>Asíncrono doble alimentación</b>	0,743	0,070
<b>Potencia generada</b>	0,344	0,053
<b>Inversión en I+D</b>	0,091	0,038
<b>Desmontaje</b>	0,088	0,037
<b>Diámetro del rotor</b>	0,232	0,035
<b>Velocidad variable</b>	0,197	0,030
<b>Impacto medioambiental</b>	0,717	0,027
<b>Síncrono multipolar</b>	0,194	0,018
<b>Integración</b>	0,043	0,018
<b>Control de tensión</b>	0,097	0,015
<b>Supervisión remota</b>	0,092	0,014
<b>Aislado marino</b>	0,034	0,010
<b>Impacto paisajístico</b>	0,217	0,008
<b>Almacenamiento de la energía</b>	0,017	0,007
<b>Multiplicadora</b>	0,039	0,006
<b>Asíncrono doble velocidad</b>	0,063	0,006
<b>Velocidad fija</b>	0,018	0,003
<b>Impacto acústico</b>	0,066	0,003

**Tabla VI-14:** prioridad de criterios y subcriterios para la selección del aerogenerador

El análisis del ranking anterior es muy útil en el diseño de estrategias para establecer un criterio de selección del aerogenerador más idóneo, ya que los subcriterios representan aspectos puntuales que deben ser considerados especialmente en éste proceso. En este sentido, de los ocho subcriterios que resultaron con pesos globales superiores al 5%, hay que tener en cuenta que los costes de fabricación, instalación y mantenimiento del aerogenerador van a influir más que ningún otro coste, que es más importante que el aerogenerador sea diseñado para permitir su integración en un parque eólico terrestre, como primera opción y en menor medida para funcionar aisladamente en tierra o en integrado en un parque marino. También hay que considerar que el único tipo de generador que presenta un peso relativo superior al 5% es el asíncrono de doble alimentación y que la potencia que es capaz de generar el aerogenerador va a influir con un peso del 5,3% en el proceso de selección.

#### **VI.4.3 Análisis de sensibilidad de los resultados**

Una vez priorizados los criterios y subcriterios mediante al proceso analítico jerárquico (AHP), realizamos un análisis de sensibilidad para determinar los posibles cambios en las prioridades originales de los subcriterios, en función de lo que incrementemos la ponderación de cualquier factor crítico. Este análisis permite observar como se modifican el orden y la importancia de los criterios, en diferentes escenarios (Martín 2004).

A continuación, en las figuras 10, 11, 12 y 13 se pueden apreciar los resultados que hemos obtenido con Expert Choice (v11) utilizando su herramienta gráfica de análisis de sensibilidad.

En la primera de ellas (Fig. VI-10) se muestra gráficamente, mediante diagrama de barras horizontales, la importancia relativa de los criterios con respecto a la selección del tipo de aerogenerador (ADA, SMS y ADV). El cálculo y los valores se han obtenido ahora directamente con Experto Choice y son coincidentes con lo descrito en el apartado VI.4.2 *Evaluación de la matriz de decisión de los criterios*.

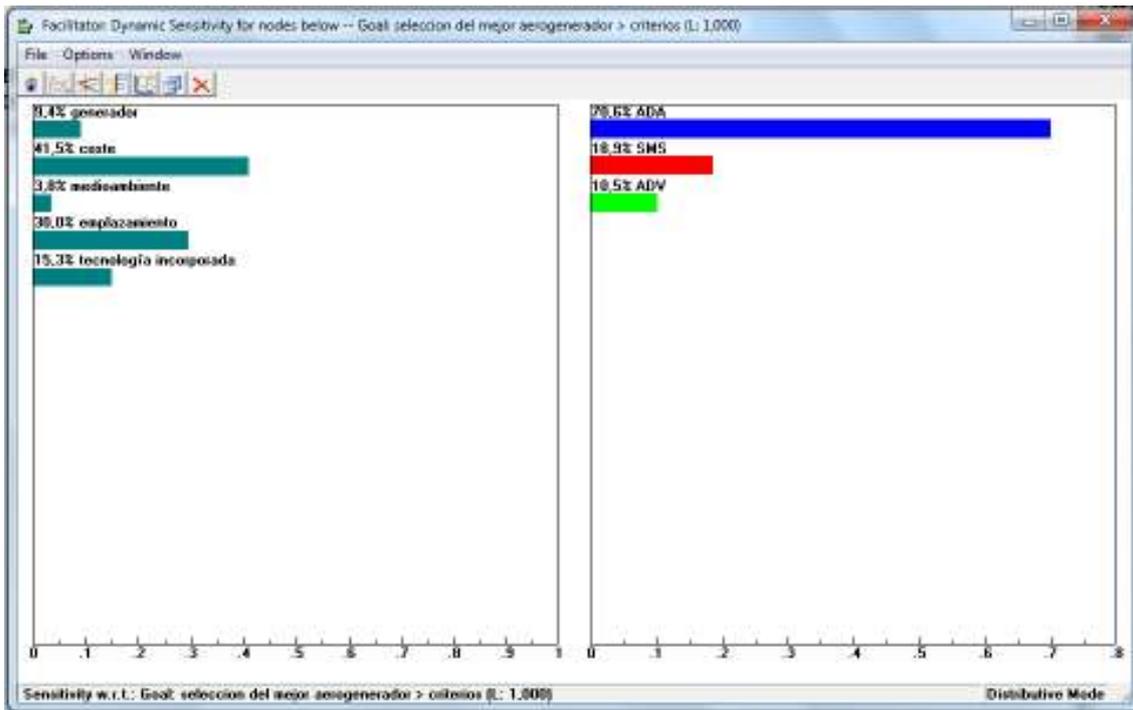


Fig. VI-10: importancia relativa de los criterios con respecto a la meta

Para efectuar el análisis de sensibilidad, seleccionamos tres escenarios diferentes, provocando incrementos medios del 25% del peso relativo, en cada uno de los tres factores críticos que obtuvieron mayor valoración (*coste*, *emplazamiento* y *tecnología incorporada*). Expert Choice permite hacerlo actuando directamente sobre la barra, aunque ello implica un nivel de imprecisión de  $\pm 0,1$  en algunos casos.

Procediendo en la forma indicada en el párrafo anterior, aumentamos en un 25% el peso relativo del criterio *coste*. Los resultados obtenidos de este primer escenario se muestran en la Fig. VI-11, donde no se aprecian variaciones superiores al 1,5% en los criterios ni en las alternativas, manteniéndose las mismas posiciones en los respectivos ranking.

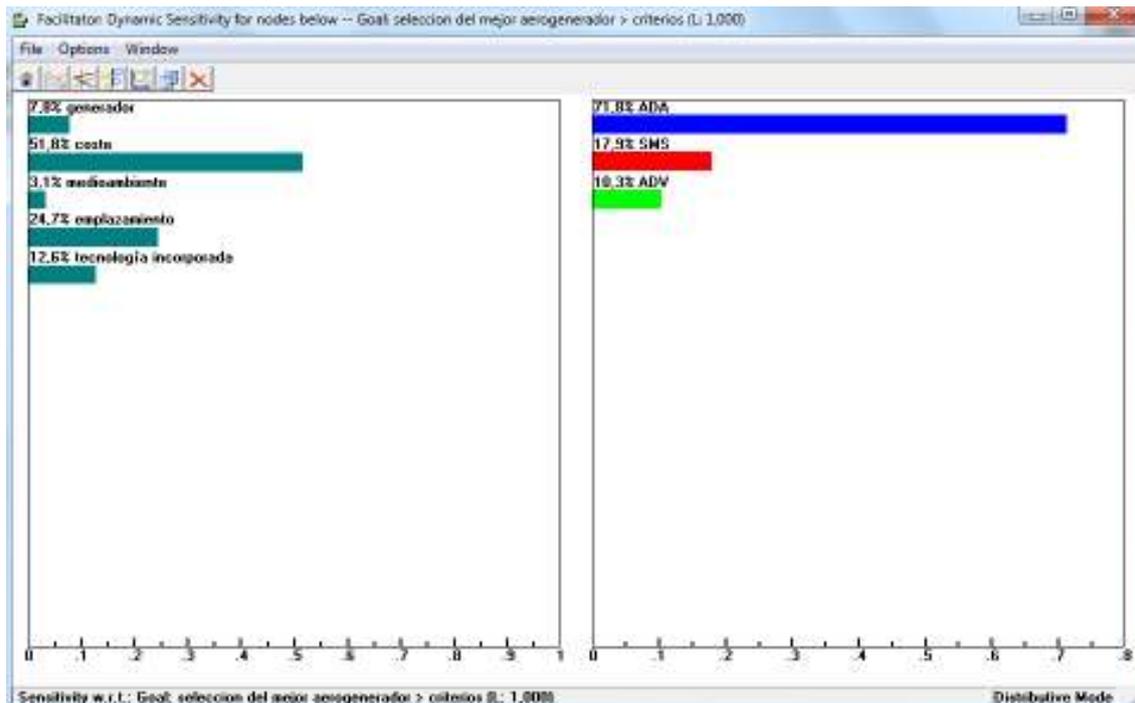


Fig. VI-11: Escenario 1

Para establecer el segundo escenario, procedemos de igual forma, actuando esta vez sobre el criterio *emplazamiento*, provocando un aumento del 25% en su peso relativo. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. VI-12, apreciándose variaciones en los pesos relativos de los criterios, lo que hace que el primer lugar del ranking lo ocupe el criterio emplazamiento, situándose a continuación coste y tecnología incorporada, esto no influye en el ranking de las alternativas que mantienen las posiciones iniciales respecto al ranking inicial.

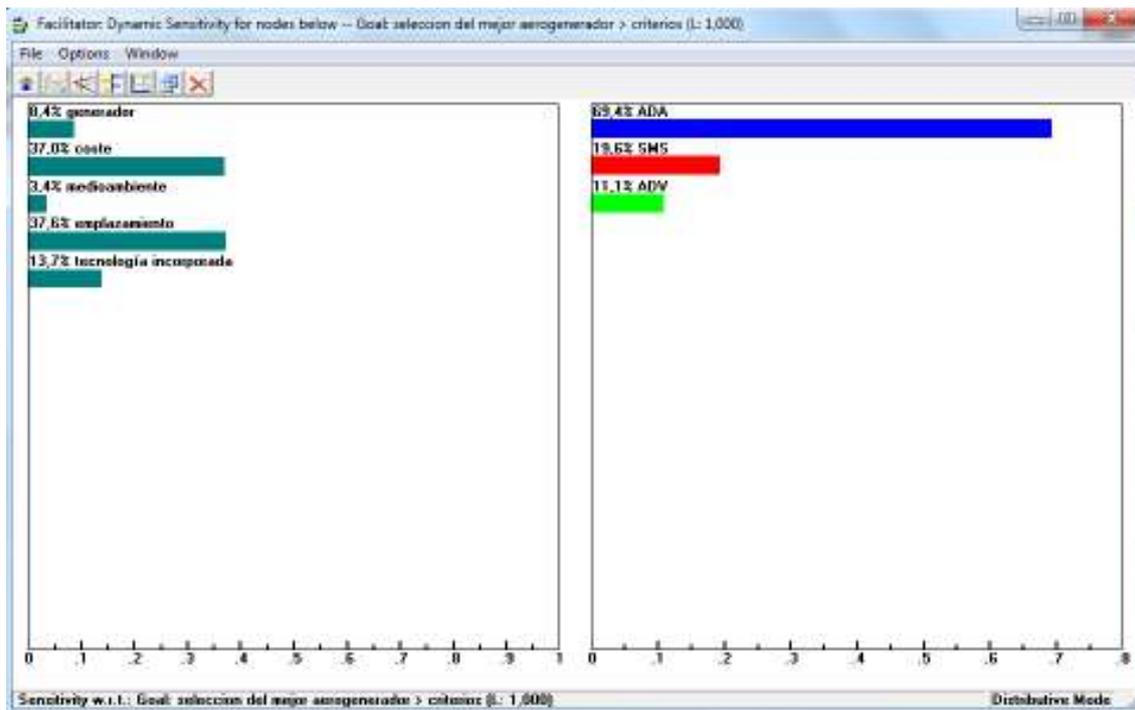


Fig. VI-12: Escenario 2

Para establecer el tercer escenario, incrementamos en un 25% el peso relativo correspondiente al criterio *tecnología incorporada*. Obtenemos los resultados que se muestran en la Fig. VI-13. No hay variación en el ranking de criterios ni en el de las alternativas, con respecto al escenario 2, aunque si respecto al escenario 1.

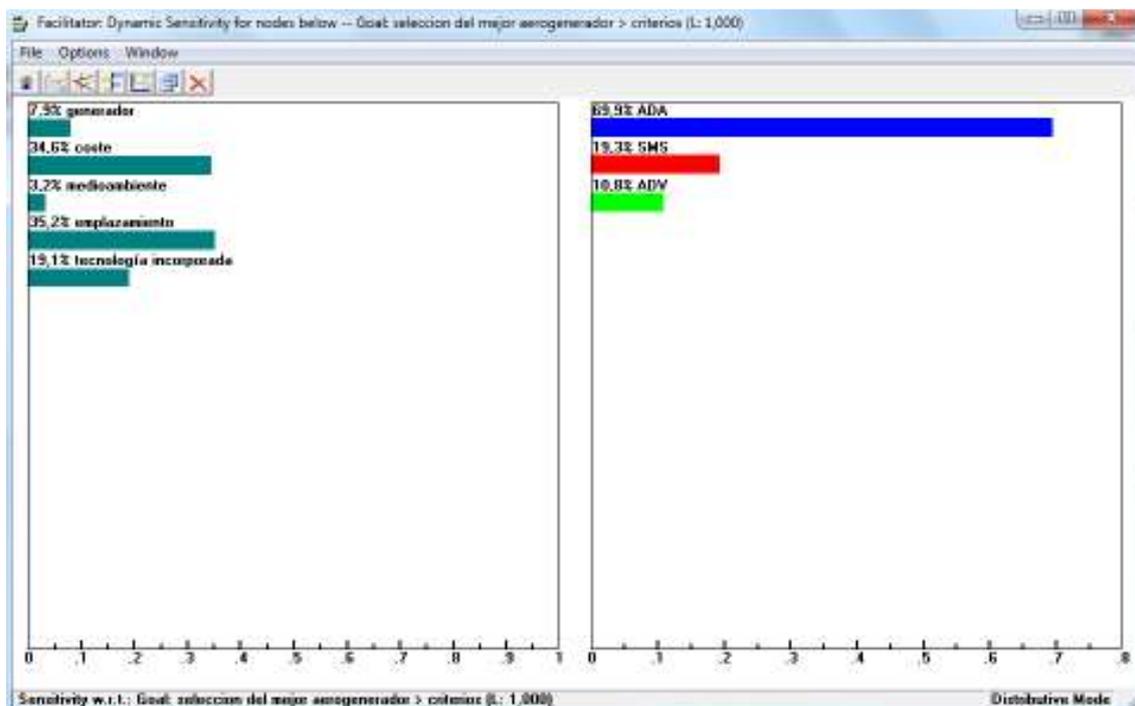


Fig. VI-13: Escenario 3

En los gráficos anteriores, correspondientes a los tres escenarios elegidos, vemos que el análisis dinámico que nos proporciona Expert Choice permite que en todos los escenarios la suma de los pesos relativos se mantenga en el 100%.

El ranking de los siete primeros subcriterios, de acuerdo a los pesos relativos globales que se obtuvieron en el escenario original y en cada uno de los tres escenarios definidos para el análisis, se muestran en la tabla siguiente:

<i>escenario original</i>	<i>global</i>	<i>escenario 1</i>	<i>global</i>	<i>escenario 2</i>	<i>global</i>	<i>escenario 3</i>	<i>global</i>
Fabricación	0,136	Fabricación	0,1699	Integrado terrestre	0,1583	Integrado terrestre	0,1482
Integrado terrestre	0,126	Instalación	0,1357	Fabricación	0,1214	Fabricación	0,1135
Instalación	0,109	Integrado terrestre	0,1040	Instalación	0,0969	Aislado terrestre	0,1077
Aislado terrestre	0,092	Mantenimiento	0,0886	Integrado marino	0,0899	Instalación	0,0907
Integrado marino	0,072	Integrado marino	0,0590	Mantenimiento	0,0633	Integrado marino	0,0841
Mantenimiento	0,071	Asíncrono doble alimentación	0,0580	Asíncrono doble alimentación	0,0624	Mantenimiento	0,0592
Asíncrono doble alimentación	0,07	Aislado terrestre	0,0227	Aislado terrestre	0,0345	Asíncrono doble alimentación	0,0587

**Tabla VI-15.** Pesos relativos globales de los cinco primeros subcriterios en los escenarios considerados

A la vista de los resultados contenidos en la tabla anterior, parece oportuno comentar que el subcriterio Fabricación aparece en primer lugar (con mayor peso relativo global) en los escenarios original y 1, situándose en segundo lugar en los escenarios 2 y 3 con una diferencia inferior al 4% con respecto al subcriterio Integrado terrestre. Estos resultados, aportan robustez a los resultados obtenidos, y más, si consideramos que en los escenarios 1, 2 y 3 sólo se observan pequeñas variaciones en el orden de los otros subcriterios con respecto al ranking original, indicando que la valoración efectuada por el grupo de expertos, se mantiene a pesar de realizarse intencionalmente modificaciones en los resultados de las ponderaciones. Como hemos visto a lo largo de este capítulo, la valoración de los expertos respecto a la prioridad de las alternativas, se mantiene en todos los escenarios aportando la necesaria robustez a la propuesta de solución de nuestro problema de investigación.

## **VI.5 Priorización de las alternativas de solución**

En los apartados anteriores hemos analizados los niveles 1 y 2 de la estructura jerarquía definida en la Figura VI-2 y se han determinado que criterios y subcriterios influyen más, por su mayor peso relativo, en la selección del tipo de aerogenerador. En

este apartado, procedemos a estudiar la valoración de los juicios emitidos por el grupo de expertos con respecto a las alternativas de solución propuestas.

Tal como quedó definido en la metodología, las alternativas de solución son valoradas en una matriz aparte, cuyos resultados no dependen directamente de los resultados obtenidos en los niveles anteriores (niveles 1 y 2) de la estructura jerárquica, aunque la asignación de juicios para las alternativas de solución por parte del grupo de expertos, después de emitir sus juicios sobre los criterios y subcriterios, permite un mayor conocimiento del problema, la asignación de juicios mas ajustados a la experiencia y el conocimiento y la obtención de una solución final mas acertada.

Teniendo en cuenta los juicios asignados por los integrantes del grupo evaluador, sus equivalentes en la escala numérica de Saaty fueron centralizados, como en el caso de los criterios y subcriterios, mediante la utilización de la media geométrica y con los datos obtenidos tras el proceso de agregación, se construyo la matriz de datos que se muestran en la tabla VI-21 correspondientes a la evaluación de las alternativas de solución al problema de selección planteado.

<b>Alternativas</b>	<b>ADA</b>	<b>SMS</b>	<b>ADV</b>
<b>ADA</b>	1,000	4,076	9,000
<b>SMS</b>	0,245	1,000	5,082
<b>ADV</b>	0,111	0,197	1,000

**Tabla VI-16** Matriz de importancia relativa de las alternativas de solución

La Tabla VI-22 muestra los resultados del test de consistencia y el vector de prioridades resultante después de procesar la matriz de datos de las alternativas de solución. Como puede verse, la razón de consistencia obtenida es del 7,4%, lo que indica un grado de consistencia suficiente en los juicios que componen la matriz.

En dicha tabla también vemos que en el vector de prioridades resultante, la alternativa que obtuvo un mayor peso relativo (70,9%) fue ADA, seguida de SMS (23,1%) y ADV (6%). Por consiguiente, el el procedimiento permitió determinar la escala de prioridades de las alternativas de solución, reflejando los resultados una clara preferencia por parte de los expertos hacia el tipo de aerogenerador ADA.

Razón de consistencia	Vector de prioridades
$\lambda_{max} = 3,077$	
$n = 3$	ADA 0,709
$CI_r = 0,52$	SMS 0,231
$CI = 0,0385$	ADV 0,060
<b><math>CR = 0,07403</math></b>	

**Tabla VI-17:** Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes a las alternativas

La representación gráfica del vector de prioridades (Figura VI-14), permite confirmar lo que hemos expuesto en el párrafo anterior: que la alternativa de solución ADA resultó notablemente priorizada respecto a las otras dos consideradas.



**Fig. VI-14:** Importancia relativa de las alternativas de solución

## VI.6 Conclusiones

De acuerdo con el objetivo fijado para este Capítulo, se ha procedido a aplicar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para obtener la priorización de los factores críticos y de las alternativas de solución.

Concluimos que AHP era la técnica adecuada en nuestro caso, ya que se trataba de encontrar una solución a un problema complejo que integra aspectos tangibles e intangibles que deben ser abordados de una forma sistemática y ordenada a fin de obtener resultados efectivos. Decidimos aplicar esta técnica ya que tradicionalmente, como hemos visto en la revisión efectuada en los capítulos anteriores, para solucionar problemas complejos se han utilizado técnicas de decisión multicriterio, entre las que se destaca AHP por su adaptabilidad a cada situación y porque en numerosos

estudios similares ha permitido encontrar una solución que involucra todos los elementos constituyentes, categorizados como criterios y subcriterios, y que tienen relación directa sobre el objetivo marcado.

La disposición del objetivo o meta buscada, los factores y subfactores críticos y las alternativas de solución en la estructura jerárquica definida, permite a los integrantes del grupo decisor, abordar el problema y su solución desde una perspectiva ordenada y consecuente.

El grupo de expertos aportó sus juicios sobre cada una de las parejas posibles, tanto de subcriterios, criterios y alternativas. Se volcó esa información obtenida y se concluyó que la forma más adecuada de agregar los juicios individuales era aplicar la metodología de la agregación de juicios individuales (AIJ). Posteriormente se realizó el correspondiente proceso de análisis jerárquico que estableció la escala de prioridades de los factores críticos y la escala de prioridades de las alternativas de solución en cada caso.

Para obtener el vector de prioridades y su representación gráfica para cada conjunto de subcriterios, vinculados a un criterio determinado, se utilizó la herramienta Expert Choice (versión 11) ya que existían numerosos precedentes de su aplicación con éxito a problemas de selección de tecnología. Hemos constatado, durante el proceso, que esta herramienta aporta numerosas ventajas en el procesamiento y análisis de la información recolectada, debido a su versatilidad y simplicidad de manejo tanto por incorporar un adecuado proceso de toma de decisión, como por el interface que posee para la introducción de la información y a presentación de los resultados.

Lo anterior, sumado a la flexibilidad de la metodología AHP, nos ha permitido llevar a cabo un proceso ordenado y gráfico de las etapas requeridas en la toma de decisiones y analizar por separado la contribución de cada componente del modelo respecto al objetivo general.

La razón de consistencia obtenida para cada conjunto de subcriterios, correspondientes a cada uno de los criterios, para los propios criterios y para las alternativas es inferior al 10%, con lo que concluimos que, en todos los casos, existe una suficiente consistencia en los juicios finales después del proceso de agregación.

A la vista de los resultados del proceso de priorización mediante el análisis jerárquico hemos concluido que el criterio que más influye en la selección del aerogenerador, en opinión de los expertos consultados, es *costes*. En el caso de los subcriterios, vemos que en orden de importancia, los expertos sitúan en primer lugar *fabricación* seguidopor los subcriterios *Integrado terrestre* e *instalación*. Esto confirma la importancia que los decisores adjudican al criterio *costes*, seguido del criterio *emplazamiento*. En menor medida que los anteriores, resultan priorizados los tipos de emplazamiento denominados *aislado terrestre* e *integrado marino*, seguidos del coste *mantenimiento del aerogenerador*, el tipo de generador denominado *asíncrono doble alimentación* y de la *potencia generada*.

Efectuado el análisis de sensibilidad, considerando tres escenarios diferentes, vemos que en el primero de ellos al aumentar el peso relativo del criterio *coste* no se aprecian variaciones significativas en el ranking de prioridad. En el segundo escenario, se aprecian variaciones en los pesos relativos de los criterios, ocupando el primer lugar del ranking el denominado *emplazamiento*, situándose a continuación *coste* y *tecnología incorporada*, esto no influye en el ranking de las alternativas que mantienen las posiciones iniciales respecto al ranking inicial. Finalmente, en el tercer escenario no apreciamos variación en el ranking de criterios ni en el de las alternativas, con respecto al escenario 2.

En el caso del ranking de los subcriterios, el subcriterio *fabricación* aparece en primer lugar en el escenario 1, situándose en segundo lugar en los escenarios 2 y 3. Le sigue el subcriterio *Integrado terrestre*. Si además consideramos que en los escenarios 1, 2 y 3 sólo se observan pequeñas variaciones en el orden de los restantes subcriterios con respecto al ranking original, podemos concluir que la valoración efectuada por el grupo de expertos, es consistente.

Tras lo anteriormente expuesto, y una vez considerado el análisis de las alternativas en el cual vemos que la mejor valorada es el aerogenerador tipo *ADA*, y dada la distancia porcentual que presenta con respecto a las otras dos alternativas, concluimos que es la mejor solución a nuestro problema de selección.



## **Capitulo VII**

### **Conclusiones y futuras líneas de investigación**



## VII.1 Conclusiones generales

En este apartado, se muestran las conclusiones generales derivadas del proceso de investigación. Para hacerlo de una forma sistemática, vamos a verificar que se han alcanzado tanto el objetivo general como los específicos en que se concreta, dando de esta forma respuesta a las preguntas complementarias de la investigación y contrastando la hipótesis formulada.

En primer lugar, se ha establecido y fundamentado la metodología para llevar a cabo nuestra investigación, en este contexto, se ha formulado la Idea Base y planteado el Problema de Investigación, enunciado objeto principal, los objetivos específicos y formulado las preguntas complementarias de la investigación. Hemos elaborado un marco teórico referencial y se ha establecido la hipótesis de trabajo.

De acuerdo con el marco de referencia, con el primer objetivo específico de nuestra investigación y con la naturaleza compleja del problema de investigación planteado, que contempla múltiples criterios y alternativas de solución, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica y documental relacionada con los problemas de decisión y los principales métodos de decisión multicriterio (MDM), haciendo un especial énfasis en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) ya que forma parte del objeto principal de esta tesis. Para efectuar esta revisión de una forma sistemática, hemos tomado como referencia la clasificación propuesta por Cohon & Marks (1975) ya que es la más comúnmente utilizada en el ámbito de OR (*Operations Research*).

Hemos descrito el marco teórico en el que se asientan los Métodos de Decisión Multicriterio Discretos pues sirven de base al Proceso Analítico Jerárquico y se han descrito los fundamentos del AHP, exponiendo sus axiomas, la justificación matemática del método y de la escala utilizada. Tomando como referencia los trabajos y opiniones de los autores que aparecen en la literatura revisada, concluimos que AHP es el método de Decisión Multicriterio Discreto más apropiado para llevar a cabo nuestra investigación. Con todo ello consideramos alcanzado el segundo objetivo específico.

Se han estudiado los sistemas de generación de energía eólica existentes y con mayor implantación en el mercado español, las principales características de la energía eólica y de la producción de electricidad mediante los distintos tipos de generadores que se

encuentran en el mercado o que están en vías de investigación y desarrollo, tanto por parte de las empresas con mayor presencia en el mercado, como por parte de los centros de investigación. A partir del estudio realizado, hemos obtenido la información necesaria para identificar un conjunto de factores críticos y también para establecer que aerogeneradores-tipo podrían proponerse como alternativas de solución a nuestro problema de investigación. Con ello hemos alcanzado el tercer objetivo específico.

Identificado un conjunto de factores críticos y las alternativas de solución a nuestro problema de selección de aerogeneradores, a partir de la literatura revisada. Este conjunto ha sido sometido a una validación externa y, tras el informe emitido por los expertos, hemos concluido cual era el listado de factores y alternativas que deberían ser considerados en el camino hacia la solución del problema, culminando así el cuarto objetivo específico.

El mencionado listado, se ha integrado en un cuestionario, que también ha sido sometido a evaluación externa. A partir del informe emitido, hemos concluido cual era el diseño más adecuado para el cuestionario que se utiliza para obtener la información de los expertos. De esta forma se ha alcanzado el quinto objetivo específico.

Hemos determinado las características que debería tener el panel de expertos que será encuestado y, revisada la literatura correspondiente, se ha concluido y justificado el número de expertos necesarios.

Una vez identificados y evaluados los criterios, subcriterios y alternativas de solución a nuestro problema de investigación, y diseñado y desarrollado el cuestionario, se ha solicitado a los integrantes del panel de expertos que lo cumplimenten. Una vez recibidos los resultados se ha procedido a tratar la información obtenida aplicando el Proceso Analítico Jerárquico, a fin de priorizar los factores críticos y obtener la alternativa más idónea.

Concluimos que AHP era la técnica adecuada en nuestro caso, ya que se trataba de encontrar una solución a un problema complejo que integra aspectos tangibles e intangibles que deben ser abordados de una forma sistemática y ordenada a fin de obtener resultados efectivos. Y como hemos visto en la revisión efectuada, para solucionar problemas complejos se han utilizado tradicionalmente técnicas de decisión multicriterio, entre las que destaca AHP por su adaptabilidad a cada situación y porque en numerosos estudios similares ha permitido encontrar una solución que involucra

todos los elementos constituyentes, categorizados como criterios y subcriterios, y que tienen relación directa sobre el objetivo marcado.

La disposición del objetivo o meta buscada, los factores y subfactores críticos y las alternativas de solución en la estructura jerárquica definida, permite a los integrantes del grupo decisor, abordar el problema y su solución desde una perspectiva ordenada y consecuente.

El grupo de expertos aportó sus juicios sobre cada una de las parejas posibles tanto de subcriterios, como de criterios y alternativas. Se volcó la información obtenida y se concluyó que la forma más adecuada de agregar los juicios era aplicar la metodología de la agregación de juicios individuales (AIJ). Posteriormente, los juicios agregados fueron sometidos al proceso de análisis jerárquico.

Se obtuvo el vector de prioridades y su representación gráfica para cada conjunto de subcriterios, vinculados a un criterio determinado. Concluimos que la herramienta más adecuada para obtenerlos era Expert Choice ya que existían numerosos precedentes de su aplicación con éxito a problemas de selección de tecnología y maquinaria. Hemos constatado, durante el proceso, que esta herramienta aporta numerosas ventajas en el procesamiento y análisis de la información recolectada, debido a su versatilidad y simplicidad de manejo tanto por incorporar un adecuado proceso de toma de decisión, como por el interface que posee para la introducción de la información y la presentación de los resultados.

Lo anterior, sumado a la flexibilidad de la metodología AHP, nos ha permitido llevar a cabo un proceso ordenado y gráfico de las etapas requeridas en la toma de decisiones y analizar por separado la contribución de cada componente del modelo respecto al objetivo general.

La razón de consistencia obtenida para cada conjunto de subcriterios, correspondientes a cada uno de los criterios, para los propios criterios y para las alternativas es inferior al 10%, con lo que concluimos que, en todos los casos, existe una suficiente consistencia en los juicios finales después del proceso de agregación.

A la vista de los resultados del proceso de priorización mediante el análisis jerárquico hemos concluido que el criterio que más influye en la selección del aerogenerador, en opinión de los expertos consultados, es *costes* seguido de *emplazamiento*. En el caso

de los subcriterios los expertos sitúan en primer lugar del ranking a *fabricación* seguido por *Integrado terrestre e instalación*. Esto confirma la importancia asignada a los dos criterios mencionados. Siguiendo el ranking, resultan priorizados los tipos de emplazamientos denominados *aislados terrestres e integrado marino*, el coste *mantenimiento del aerogenerador*, el tipo de generador denominado *asíncrono doble alimentación* y la *potencia generada*.

Efectuado el análisis de sensibilidad, considerando tres escenarios diferentes, vemos que en el primero de ellos al aumentar el peso relativo del criterio *coste* no se aprecian variaciones significativas en el ranking de prioridad. En el segundo escenario, existen variaciones en los pesos relativos de los criterios, ocupando el primer lugar del ranking el denominado *emplazamiento*, situándose a continuación *coste* y *tecnología incorporada*, esto no influye en el ranking de las alternativas que mantienen sus posiciones respecto al ranking inicial. Finalmente, en el tercer escenario no apreciamos variación en el ranking de criterios ni en el de las alternativas, con respecto al escenario 2. En el ranking de los subcriterios, el subcriterio *fabricación* aparece en primer lugar en el escenario 1, situándose en segundo lugar en los escenarios 2 y 3. Le sigue el subcriterio *Integrado terrestre*. Si además consideramos que en los escenarios 1, 2 y 3 sólo se observan pequeñas variaciones en el orden de los restantes subcriterios con respecto al ranking original, podemos concluir que la valoración efectuada por el grupo de expertos, es consistente.

Considerando los resultados anteriormente expuestos, y una vez realizado el análisis de las alternativas, la mejor valorada es el aerogenerador tipo *ADA*, y dada la distancia porcentual que presenta con respecto a las otras dos alternativas, concluimos que es la mejor solución a nuestro problema de selección.

En este punto, consideramos alcanzado el sexto objetivo específico y, al mismo tiempo, se ha dado respuesta a todas las preguntas de investigación que nos planeamos en el Capítulo I. Con ello, se cumple el objeto de esta investigación y queda contrastada la hipótesis ya que ha sido posible resolver, aplicando una metodología basada en el Proceso Analítico Jerárquico, el problema de identificar y priorizar los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de aerogenerador de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado nacional hasta 2015.

## VII.2 Futuras líneas de investigación

Durante el desarrollo de la investigación surgen nuevos interrogantes y temas conexos, sobre los que se recomienda su tratamiento con el fin de complementar o verificar lo encontrado en este trabajo, entre las investigaciones que se proponen están:

El criterio de selección establecido en la presente investigación podría extrapolarse a problemas de selección de tecnologías de características similares, por lo que se propone el desarrollo de una investigación que determine los factores críticos para selección de generadores de otras energías alternativas, aplicando para ello la misma metodología planteada en esta investigación. Los resultados de la futura investigación podrían contribuir a establecer si es procedente aplicar sistemáticamente el criterio desarrollado en esta tesis al conjunto de problemas de selección de generadores de energía.

Los factores y subfactores críticos utilizados en este estudio, han sido identificados a partir de la revisión bibliográfica y documental y su posterior evaluación por expertos. Estimamos que el criterio podría enriquecerse utilizando técnicas estadísticas multivariantes aplicadas sobre una revisión. Esto permitiría hacer una comparación con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Los resultados obtenidos en esta investigación ponen de manifiesto que el criterio más importante, a la hora de seleccionar el aerogenerador, es costes. Ante ello, pensamos que una posible línea de investigación podría tratar de identificar y priorizar el mayor número posible de subcriterios vinculados a este criterio, aplicando para ello la metodología que hemos propuesto en esta tesis.

Para resolver el problema de investigación, nos hemos apoyado en la herramienta Expert Choice que nos ha permitido establecer los vectores de prioridades de una forma gráfica y numérica y además, llevar a cabo el análisis de sensibilidad. Pero también hemos necesitado el apoyo del programa Derive para el cálculo de los valores propios y la razón de consistencia y de Microsoft Excel para el volcado de los juicios emitidos y su agregación. Proponemos la aplicación de la metodología desarrollada en esta tesis, al caso de selección de

maquinaria apoyándose exclusivamente en la herramienta SuperDecision creada por Saaty (2008) para llevar a cabo los cálculos mencionados.

Hemos obtenido del grupo de expertos, un conjunto de juicios que, tras la aplicación de la técnica de agregación de juicios individuales (AIJ) y del Proceso Analítico Jerárquico, han resultado consistentes, pero podría darse el caso de inconsistencia en alguno de los conjuntos de subcriterios analizados o en el caso de los criterios o alternativas. Si esto se produjese, creemos que el criterio desarrollado podría aplicarse, integrando AHP con el método Delphi. Proponemos esta nueva línea de trabajo para aquellos problemas de selección que presentaran inconsistencias al procesar los juicios emitidos por los expertos.

Hasta este momento hemos propuesto líneas de investigación que trabajen en problemas de selección de tecnologías o maquinaria, pero sería adecuado investigar si es posible la aplicación de la metodología, desarrollada en esta tesis, a otros campos que impliquen, de alguna forma, un proceso de selección en el que intervengan múltiples criterios de decisión que consideren valores tangibles e intangibles. En este sentido, creemos que un campo adecuado sería la evaluación de propuestas en los procesos de licitación que llevan a cabo las administraciones públicas.

Una vez expuestas las conclusiones generales, en el apartado anterior y propuestas las líneas de investigación futuras que pueden dar continuidad a la presente tesis, consideramos alcanzado el séptimo y último objetivo específico de esta tesis.

## **Fuentes y bibliografía**



1. Agarwal, A., Sankar, R. and Tiwari, M.K.: *Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: An ANP based approach*. European Journal of Operational Research, 173:211–225, August 2006.
2. Aguarón, J., Moreno, J.M. y Santamaría, R. (1993): *Selección de carteras con múltiples objetivos a través del proceso analítico jerárquico (AHP)*. Revista Española de financiación y contabilidad. Vol. XXIII No. 74, 187-203.
3. Aguarón, J., Escobar, M.T. y Moreno, J.M. (1995): *El Cambio de Rango en el Proceso Analítico Jerárquico*. Actas del XXII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa, Sevilla, 381-382.
4. Aguarón, J.; Moreno-Jiménez, J. M. (2003): *The Geometric Consistency Index: Approximated Thresholds*. European Journal of Operational Research, 147 (1), 137-145.
5. Aragonés, P., Martí, A., Pastor, J.P y Gómez-Senent, E. (2000): *Evaluación de soluciones constructivas de las bancadas de soporte de las casetas de equipos para la telefonía móvil*. Actas del V Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Lérida. España.
6. Aragonés, P., García, M., Contreras, W. y Owen, M. (2004): *Importancia de la aplicación de las técnicas de decisión multicriterio (MCDM), en la industria forestal mecánica de Venezuela*. Revista forestal venezolana 48, 75-90.
7. Aragonés, P. et alt. (2009): *Selection of Photovoltaic Solar Power Plant Projects Using AHP*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
8. Aragonés, P. et alt. (2010): *An ANP-based approach for the selection of photovoltaic solar power plant investment projects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol. 14, no.1, pp. 249-264.
9. Arijit Bhattacharya, Bijan Sarkar, Sanat Kumar Mukherjee. *Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective*. International Journal of Production Research, Volume 43, Issue 17, pages 3671 - 3685, September 2005.

10. Arrow, K.J. and Reynaud, H. (1986): *Social choice and multicriterion decision making*, MIT Press, Cambridge.
11. Asti V., A. (1968): *Metodología de la investigación*. Editorial Kapelusz. Buenos Aires.
12. Ávila Mogollón, R.M. (2000): *El Proceso Analítico Jerárquico AHP y su aplicación en el uso de las tierras. Caso Brasil*: Technical Report 2, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, diciembre 2000.
13. Azadeha, A., Ghaderia, S.F. and Izadbakhsh, H. (2007): *Integration of DEA and AHP with computer simulation for railway system improvement and optimization*. Elsevier Inc.
14. Azizi, M. et alt. (2009): *Selecting the Best Particleboard Products with Respec to Criteria Intensities, Case of the Study: Iranian Particleboard*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
15. Ballesteros, E y Romero, C. (1998): *Multiple criteria decision making and its applications to economic problems*. Kluwer Academic Publishers. Boston.
16. Bana e Costa, C.(1990): *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Springer-Verlag. Heidelberg.
17. Barba-Romero, S y Pomerol, J. C. (1997): *Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Servicio de publicaciones de la U.A.H. España.
18. Barba-Romero, S. (1998): *Conceptos y Soportes Informáticos de la Decisión Multicriterio Discreta*. Evaluación y Decisión Multicriterio. Reflexiones y Experiencias. Editorial Universidad de Santiago 1998, pp. 47-68.
19. Bayazit, O., Karpak, B., & Yagci, A. (2006): *A purchasing decision: selecting a supplier for a construction company*. Journal of Systems Science and Systems Volume 15, Number 2 / May, 2006, 217-231.

20. Belton, V., Vickers, S. (1990): Use of a simple multi-attribute value function incorporating visual interactive sensitivity analysis for multiple criteria decision making, in Bana e Costa, C.A. (Eds), Readings in Multiple Criteria Decision Aid, Springer-Verlag, Berlin, pp.319-34.
21. Benayoun, R., Montgolfier, J., Tergny, J. and Larichev, O.I. (1971): Linear Programming with Multiple Objective Functions: STEP Method (STEM). Mathematical Programming; Vol. 1. Num. 3, pp. 366-375.
22. Benayoun, R., Roy, B., and Sussman, B., (1996) : *Electre: une methode pour guider le choix en presence de points de vue multiples*. Note de Travail 49, París: SEMA, Metra International.
23. Blaxter, L., Hughes, C y Tight, M. (2005): *Como se hace una investigación*. Editorial Gedisa. Barcelona España.
24. Bouyssou , D. y Perny, P. (1.990): *Ranking methods for valued preferences relations: a characterization of a method based on leaving and entering flows*, European Journal of Operational Research, vol. 61, pp. 186 – 194.
25. Brans, J.P. (1982). “L’ingénierie de la decisión. Elaboration d’instruments d’aide á la decisión. Méthode PROMETHEE.” *Colloque d’aide á la decisión*. Université Laval. Québec, 182-213.
26. Brans, J. P. et al. (1.984): “PROMETHEE a new family of outranking methods in multicriteria analysis”, en *Operational Research’84*; Brans, J.P. ed. North Holland, pp. 408 – 421.
27. Brans et al. (1986): *How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method*, European Journal of Operational Research, vol. 24, pp. 138 - 228
28. Brans, J.P., Mareschal, B. (1994): *The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid*, Decision Support Systems, Vol. 12 pp.297-310.
29. Brans, J.P. y Mareschal, B. (2002): *Prométhée-Gaia. Une Méthodologie d’aide á la décision en présence de critères multiples*. Éditions de L’Université de Bruxelles. Éditions Ellipses. París.

30. Briggs, T., Kunsh, P.L. and Marshal, B. (1990): *Nuclear waste management: an application of the multicriteria Promethee methods*. European Journal of Operational Research 44. pp.1-10.
31. Bueno Peña, E.J. (2005): Optimización del comportamiento de un convertidor de tres niveles NPC conectado a la red eléctrica. Universidad de Alcalá.
32. Bunge, M. (1985). La Investigación Científica. (2ª edición). Editorial Ariel S.A. Barcelona – España.
33. Büyüközkan, G., Feyzioğlu, O. Nebol, E. (2008): *Selection of the strategic alliance partner in logistics value chain*. International Journal of Production Economics, 113(1), 148-158.
34. Cabrero, J. y Richart, M. (1996). El debate investigación cualitativa frente a investigación cuantitativa. Enfermería clínica Vol. 6. Núm. 3, 212-217.
35. Caivano, J.L. (1995): *Guía para realizar, escribir y publicar trabajos de investigación*. Versión electrónica. Arquim. Buenos Aires.
36. Carmignani, G., Bertolini, M. and Braglia, M.: *Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract*. International Journal of Project Management, 24(5):422–430, July 2006.
37. Castillo, M. et al. (2009): *Analysis and evaluation of technological and operational alternatives for heavy oil gathering systems in the fields of Castilla and Chichimene – Colombia*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
38. Castro, N., Borges, A.M., Baquero, N. et al.: *Modelo para la selección de software ERP: el caso de Venezuela*. Rev. Fac. Ing. UCV, mar. 2006, vol.21, no.1, p.125-137.
39. Cengiz Kahraman F., Tunc Bozburaa y Ahmet Beskesea. *Prioritization of human capital measurement indicators using fuzzy AHP*. Expert Systems with Applications, 32(5):1100–1112, May 2007.
40. Cohon, J.L. and Marks, D.H. (1975): *A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques*. Water Resources Research, 11(2), pp.208-220.

41. Cohon, J.L. (1978): *Multiobjective programming and planning*. Academic Press, New York.
42. Colson, G. and De Bruin, C. (1989): *Models and Methods in Multiple Objective Decision Making*. In G. Colson; C. De Bruin (Eds.): *Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making*. Pergamo, London.
43. Costa, A.P.: *Modelos Multicritério para Seleção Direta de Sistemas de Informação*. Memorias del XIV Congreso Latino Americano de Investigación de Operaciones. Colombia. 2008.
44. Cyert, R.M. y DeGroot, M. (1987): *"Bayesian Analysis and ¿Jncertaunty inEconomic Theory"*, New Jersey, Rowman & Littlefield.
45. Chacón, E. y García, M.: *Selección de Proyectos Seis Sigma Mediante el Uso del Proceso Analítico en Redes (ANP)*. Memorias del XIV Congreso Latino Americano de Investigación de Operaciones. Colombia. 2008.
46. Chandran, Golden y Wasil (2005): *Linear programming models for estimating weights in the Analytic Hierarchy Process*. *Computers & Operations Research* (n°32. pg. 2235-2254, 2005).
47. Chang Che-Wei, Cheng-Ru Wu, Chin-Tsai Lin, Huang-Chu Chen (2007): *An Application of AHP and Sensitivity Analysis for Selecting the Best Slicing Machines*. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 52, pp. 296-307. 2007.
48. Chang, C., Wu, C. and Chen, H. *Applying a fuzzy analytic network process to construct a purchase project. A case for the purchase of a slicing diamond cutting machine*. *Production Planning and Control*, Volume 18, Number 8, pp. 628-640. December 2007.
49. Chankong, V. and Haimes, Y. (1983): *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*, Elsevier-North Holland.
50. Charnes, A., Cooper, W.W., Ferguson, R.O. (1955): *Optimal estimation of executive compensation by linear programming*. *Management Science*, 1, 138–151.
51. Charnes, A., Cooper, W.W. (1961): *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. Wiley & Sons, New York.

52. Chen, S. J. y Ch. L. Hwang (1992): *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications*. Springer-Verlag. Berlin.
53. Che-Wei, Chang et al. (2007): An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine. Elsevier. *Computers & Industrial Engineering* 52(2007) 296 – 307.
54. D'Avignon, G. y Vincke, P. (1.988): *An outranking method under uncertainty*, *European Journal of Operational Research*, vol. 36, nº 3, pp. 311 – 321.
55. De Boer, L., Labro, E. and Morlacchi, P. (2001): *A review of methods supplier selection*. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 7, pp. 75-89.
56. Deloitte S.L. (2008): *Estudio macroeconómico del impacto del Sector Eólico en España*, elaborado para la Asociación Empresarial Eólica. Noviembre 2008.
57. Diaz, P.P. y García, M.: *Selection of the Alternative Refrigerant Applying Technique AHP and ANP*. *Memorias del XIV Congreso Latino Americano de Investigación de Operaciones*. Colombia. 2008.
58. Díaz de Rada, V. (1999): *Técnicas de análisis de datos para investigadores sociales*. Editorial Ra-Ma. Madrid.
59. Díez Martínez, Marta y Rouco Rodríguez, Luis (2007). *Generadores eólicos asíncronos doblemente alimentados*. Publicaciones ICAI - Universidad Pontificia Comillas.
60. Dimitrova, V.A. *Application of the Analytic Network Process (ANP) in a framework of ERP systems implementation success*. 4th International IEEE Conference. Volume 3, page(s):19-24.Sept. 2008. Austria
61. Duarte Velasco, O.G.: *Técnicas Difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, Mayo 2000.
62. Durán, O. (2010): *Fuzzy-AHP approach for selecting Computer based Maintenance Management Software CMMS*. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2010)*, ISI Proceedings.

63. Durán, O. y Aguiló, J.: *Selección de máquinas de control numérico usando Fuzzy AHP*. Revista Espacios, ene. 2006, vol.27, no.1, p.075-089.
64. Elfvengren, K.; Korpela, J.; Tuominen, M. and Sierila, P. (2007): *AHP-based expert analysis of forest industry strategies*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, Volume 2, Number 4, Pages: 375 - 392.
65. Erdogmus, Senol & Kapanoglu, Muzaffer & Koc, Eylem (2005): *Evaluating high tech alternatives by using analytic network process with BOCR and multiactors*. Evaluation and Program Planning, Elsevier, 28(4):391–399, November 2005.
66. Fariñas Wong, E. y Jacomino Bermudez, A (2006): *Estudio de Aerogeneradores de pequeña potencia*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba. Noviembre 2006.
67. Fernández Barberis, G.M. (1.991): *Extensión a los métodos PROMETHEE de nuevas estructuras de preferencia para la toma de decisiones multicriterio discretas*. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid.
68. Fichet, J. (1976): *GPSTEM: an interactive multiobjective optimization method*. In *Progress in Operations. Research*, Vol 1 (A. Prekopa, Ed.), pp. 317-332.
69. Firouzabadi, S., Henson, B., Barnes, C. (2008) *A multiple stakeholders' approach to strategic selection decisions*. Computers & Industrial Engineering, 54(4), 851-865.
70. Fishburn, P.C. (1970): *Utility Theory for Decision Making*. Wiley, New York.
71. Flavell, R.B. (1976). *A new goal programming formulation*. Omega- International Journal of Management Science, 4, pp.731-732.
72. Forman, E.H. (1992): *Facts and fictions about the analytic hierarchy process*. In *Multiple Criteria Decision Making*. Proc. Ninth Int. Conf. Theory and Applications in Business, Industry, and Government (Edited by A. Goicochea, L. Duckstein and S. Zionts), 123-133. Springer, New York.
73. García, F. (2002): *La tesis y el trabajo de tesis: Recomendaciones metodológicas para la elaboración de trabajos de tesis*. Editorial Limusa.
74. García, J.L. y Noriega, S.: *Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola*. Technical Report 1, División de Estudios de

Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Cd. Juárez. Chihuahua, México., Marzo 2006.

75. García-Sanz, M. y Torres, E. (2006): Control y experimentación del aerogenerador síncrono multipolar de velocidad variable TWT1650. Universidad Pública de Navarra.
76. García, M.S. and Lamata, M.T. (2009): *Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process*. Computers & Industrial Engineering, Volume 56, Issue 4, May 2009, Pages 1442-1451.
77. Gass, S.I. (1986): The Analytic Hierarchy Process, Chap. 24, in Decision Making, Models and Algorithms, John Wiley & Sons.
78. Gass, S. L. and Forman, E. H.: *The analytic hierarchy process: An exposition*. European Journal of Operational Research, 49(4):469–486, July - August 2001.
79. Goicochea, A., Hansen, D.R. and Duckstein, L. (1982): *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. J. Wiley & Sons. New York.
80. Golding, Edward William (1955). Harnessing power from desert winds; old device in new garb. The Unesco courier: a window open on the world, The Unesco courier: a window open on the world. VIII, 8.
81. Gómez Espinosa, M.I. (2008): *La situación económica internacional: el dilema inflación y crecimiento*. Boletín económico de ICE, Información Comercial Española, ISSN 0214-8307, N° 2946, pags. 3-11
82. González, J., Casorzo, C. y Alfaro, M.: *Modelo de Evaluación de Proveedores en una Cadena de Suministro Utilizando AHP con Mecanismo de Inferencia Difusa para Subcriterios de Evaluación*. Memorias del XIV Congreso Latino Americano de Investigación de Operaciones. Colombia. 2008.
83. González-Pachón, J. y Romero, C. (1999): *Distance-based consensus methods: a goal programming approach*. Omega- International Journal of Management Science, 27: 341-347

84. Grajales, T. (1996): *Conceptos básicos para la investigación social*. Textos Universitarios - Publicaciones Universidad de Montemorelos, Nuevo León, México.
85. Harboe, R. (1992): *Multi-Criteria Methods for Decision making in Water Resources System*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
86. Heinemann, K. (2003): *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Editorial Paidotribo.
87. Hening, M. I., J. Buchanan (1996): *Solving MCDM problems: process concepts*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 5 (1), pp. 3-21.
88. Henríquez, G. y Barriga, O. (2003): *La presentación del objeto de estudio*. Cinta de Moebio. Universidad de Chile. Número 017.
89. Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2003): *Metodología de la Investigación*. Tercera edición. Ed. Mc Graw Hill. Mexico.
90. Ho, William. *Integrated analytic hierarchy process and its applications: A literature review*. European Journal of Operational Research, pages 1–18, January 2007.
91. Hogart, R.M. (1978): *A note on aggregate opinions*, *Organizational Behavior and Human Performance*, Vol. 21, No 1, pp 4-46.
92. Hsu, Pi-Fang, Chen, Bi-Yu, (2007): *Developing and Implementing a Selection Model for Bedding Chain Retail Store Franchisee Using Delphi and Fuzzy AHP*, *Quality & Quantity*, Vol. 41, pp. 275-290.
93. Huang, J., Tzeng, G., and Ong, C. (2005): *Multidimensional data in multidimensional scaling using the analytic network process*. *Pattern Recogn. Lett.* 26, 6 (May. 2005), 755-767.
94. Ignizio, I. (1976): *Goal Programming and extensions*. Massachusetts, Lexington Books.
95. İhsan Yüksel and Metin Dagdeviren *Using the analytic network process (ANP) in a SWOT analysis - A case study for a textile firm*. *Information Sciences: an International Journal*, Volume 177, Issue 16 (August 2007). Turkia.

96. Ijiri, Y. (1965): *"Management Goals an Accountingfor Control"*, Amsterdam, North-Holland.
97. Ing-Chang Lee, Ming-Cheng Wu, Hsiao-Wen Wang and Hsiu-Yuan Wang. (2007): *A Method of Performance Evaluation by Using the Analytic Network Process and Balanced Score Car*. International Conference on Convergence Information Technology, pp.235-240.
98. Isik, Z., Dikmen, I. and Birgonul, M. T. *Using Analytic Network Process (ANP) for Performance Measurement in Construction*. The construction and building research conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors Georgia Tech, Atlanta USA. September 2007.
99. Islei, G., G. Lockett (1991): *Group decision making: suppositions and practice*, Socio-Economic Planning Science, 25, pp. 67-81.
100. Jacquet-Lagrange, E. and Siskos, J. (1982): *Assessing a set of additive functions for multicriteria decision-making, the UTA method*. European Journal of Operational Research, vol. 10, pages 161-164.
101. Jadhav, A.S. and Sonar, R.M. (2009): *Evaluating and selecting software packages: A review*. Information and Software Technology, Volume 51, Issue 3, March 2009, Pages 555-563
102. Jharkharia, Sanjay and Shankar, Ravi. *Selection of logistics service provider: an analytic network process (ANP) approach*. Omega. June 2007.
103. Jiwu, W., Lucheng, H., Wenguang, L. and Jian, I. (2007): *Evaluation on the Industrialization Potential of Emerging Technologies Using the Analytic Network Process*. Management of Engineering and Technology, Portland International Center. Volume , Issue , 5 Page(s):1209 – 1219.
104. Kahraman, C., Ertay, T. and Büyüközkan, G. (2006): *A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach*, European Journal of Operational Research, 171(2), 390-411.
105. Kang, M. and Stam, A. (1994): *PAHAP: A pairwise aggregated hierarchical analysis of ratio scale preferences*. Decision Science 25, 4, 607-624.

106. Katayama, K., Koshiishi, T., and Narihisa, H. 2005: *Reinforcement learning agents with primary knowledge designed by analytic hierarchy process*. In Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Applied Computing (Santa Fe, New Mexico, March 13 - 17, 2005). L. M. Liebrock, Ed. SAC '05. ACM, New York, NY, 14-21.
107. Keeney, R. L. and Raiffa, H. (1976): *Decision with multiple objectives: preferences*. Cambridge University Press, Cambridge & New York.
108. Keeney, R. L. (1982): *Decision analysis: an overview*. Operations Research, Vol. 30, No. 5, 803-838.
109. Keeney, R.L. y Raiffa, H. (1993): *Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs*. Cambridge University Press, Cambridge & New York.
110. Kerlinger, F.N. y Lee, H.B. (2002): *Investigación del comportamiento*. Cuarta edición. Ed. Mc Graw Hill. Mexico.
111. Keun Tae Cho.: *Multicriteria decision methods: An attempt to evaluate and unify*. Mathematical and Computer Modelling, 37(9-10):1099–1119, May 2003.
112. Korpela, J. and Tuominen, M. (1995): *Group decision support for defining the vision and strategic goals for distribution logistics*. Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 1995, pp. 475 - 484.
113. Kumar, R. (2005): *Research methodology: a step-by-step guide for beginners*. SAGE Ed. Australia.
114. La Caixa (2008): Informe Mensual - La Caixa, ISSN 1134-1947, N°. 316, 2008, pags. 15-21.
115. Lai, V.S., Wongb, B.K. and Cheung, W. (2002): *Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection*. European Journal of Operational Research. Volume 137, Issue 1, 16 February 2002, Pages 134-144.
116. Lara del Vigo, M. (2008): *La energía nuclear a debate: ventajas e inconvenientes de su utilización*. Papeles de relaciones ecosociales y cambio global, ISSN 1888-0576, N°. 100, pags. 131-144.

117. Lee, D.J. and Hwang, J. (2010): *Decision support for selecting exportable nuclear technology using the analytic hierarchy process: A Korean case*. Energy Policy, Volume 38, Issue 1, January 2010, Pages 161-167.
118. Lee, S.M. (1972): *Decision Analysis*. Auerbach Publishers. Filadelfia.
119. Lee, S.M. (1972): *Goal Programming for Decision Analysis*. Auerbach Publishers, Filadelfia.
120. Lee, S.M. and Wen, C. (1996): *Application of multiobjective programming to water quality management in a river basin*. Journal of Environmental Management 47:1, pp. 11-26.
121. Lee, W.B.; Lau, H.; Liu, Z., Tam, S. (2001): *A fuzzy analytic hierarchy process approach in modular product design*. Expert Systems, February, No.1, Vol.18, 32-42.
122. León, O. G. (2001). *Tomar decisiones difíciles* (2ed.). Madrid: McGraw-Hill.
123. Libby, R. and Blashfield, R.K. (1978): *Performance of a composite as a function of the number of judgements, Organizacional Behavior and Human Performance*, Vol. 21, No. 2, pp. 121-129.
124. Mareschal, B. (1.986): *Stochastic multicriteria decision making and uncertainty*. European Journal of Operational Research, vol. 26, pp. 58 - 64.
125. Mareschal, B. (1.988): *Weight stability intervals in multicriteria decision aid*, European Journal of Operational Research, vol. 33, pp. 54 – 64.
126. Marglin, S. (1967): *“Maximin programming” an approach to farm planning under uncertainty*. Journal of Agricultural Economics, 18, pp: 279-289.
127. Mármol A.M., Puerto J., Fernández F.R. (1998): *The Use of Partial Information on Weights in Multicriteria Decision Problems*. Journal of Multicriteria Decision Analysis, 7, pp. 322-329.
128. Martín, M.,(2004): *Los consorcios monosectoriales de promoción en el proceso de internacionalización de la empresa: Factores de éxito de la cooperación*. Tesis doctoral. Facultad de ciencias jurídicas y sociales. Universidad Rey Juan Carlos. Biblioteca virtual Miguel de Cervantes. Alicante.

129. Martín, J. y Moreno, A. (2007): *Selección de una tecnología de red de acceso inalámbrica de banda ancha aplicando AHP*. Actas del VI Congreso de Investigación y Creación Intelectual en la Unimet. Universidad Metropolitana. Venezuela.
130. Martínez, E. (2007): *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*. Anuario Jurídico y Económico Escurialense, XL (2007) 523-542 / ISSN: 1133-3677.
131. Maturo, A. and Ventre A. (2009): *An Application of the Analytic Hierarchy Process to Enhancing Consensus in Multiagent Decision Making*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
132. Maystre, Lucien Yves, Pictet, Jacques y Simos, Jean (1994): *Méthodes multicritères ELECTRE*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Cachan.
133. Meskens, N.; Roubens, M. (1999): *Advances in Decision Analysis*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
134. Mikhailov, L.: Tsvetinov, P. (2004) "Evaluation of services using a fuzzy analytic herarchy process", *Applied Soft Computing*, 5 (2004), 23-33.
135. Mohammad, T. and Mansourian, A. (2008): *Using Delphi-AHP Method to Survey Major Factors Causing Urban Plan Implementation Failure*. *Journal of Applied Sciences* 8(15): 2746-2751. ISSN 1812-5654.
136. Monarchi D, Kisiel C, y Duckstein L. (1973): *Interactive Multiobjective Programming in Water Resources: A Case Study*, *Water Resources Research*; Vol. 9. Num. 4, pp. 837-850.
137. Moreno Jiménez, J.M., (2002). *El Proceso Analítico Jerárquico. Fundamentos, metodología y aplicaciones*. En: Caballero, R. y Fernández, G.M. (Ed.), *Toma de decisiones con criterios múltiples*. RECT@, serie monográfica N° 1, 21-53.
138. Murry, J.W. and Hammons, J.O. (1995): *Delphi: a versatile methodology for conducting qualitative research*: *Review of Higher Education*, 18(4), 423 – 436.

139. Nang-Fei Pan (2008): *Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method*. Automation in Construction, Volume 17, Issue 8, November 2008, Pages 958-965.
140. Nathan, B.R., y Alexander, R. A. (1988): *A comparisson of criteria for test validation: a meta-analytical investigation*. Personnel Psychology. 41, 517-535.
141. Onar, S. and Seckin, P. (2009): *An AHP Model for Selecting Strategic Options*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
142. Osorio, J.C. y Herrera, M.F.: *Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso*. Estudios Gerenciales, 1(99):69–88, Junio 2006.
143. Pérez Llanta, M. C.: *Teoría de la decisión en Psicología: Aplicaciones*. Tesis doctoral. UNED. 1986.
144. Pirdashti, M., Mohammadi, M., Rahimpour, F. and Kennedy, D.T.: *An AHP-Delphi multi-criteria location planning model with application to Whey Protein Production Facility decisions*. International Journal of Applied Decision Sciences. Volume 1, Number 2. Pages: 245 - 259. 2008.
145. Pirlot, M. and Vincke, P. (1992): *Lexicographic aggregation of semiorders*. Journal of Multicriteria Decision Analysis, pp. 47—58.
146. Pomerol, J.C. and Barba-Romero S. (2000): *Multicriterion decision in management: Principles and practice*. Boston Hardbound: Kluwer Academic Publishers.
147. Ríos, S., Ríos-Insua, M.J. y Ríos-Insua, S. (1989): *Procesos de decisión multicriterio*. Eudema Universidad. Madrid.
148. Rios, S. et al. (1998): *The utility efficient set and its interactive reduction*. European Journal of Operational Research Volume 105, Issue 3, 16 March 1998, Pages 581-593.
149. Rittenhouse, D. (2003): *La Energía Eólica*. Editorial Fraternal. Argentina.
150. Roccasalva, G., Lami, I. and Lombardi, P. (2007): *A spatial decision support system for strategic urban redevelopment. The case study of Turin Central*

- Station, Italy*. International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment M. Horner, C. Hardcastle, A. Price, J. Bebbington (Eds) Glasgow.
151. Rogers, M.; Bruen, M.; Maystre, L.-Y. (2000): *Electre and Decision Support*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
  152. Romero, C (1991): *Handbook of critical issues in goal programming*, Pergamon Press. Oxford.
  153. Romero, C. (1993): *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza Editorial, Madrid.
  154. Rosa M., A. (2005): *Perfil metodológico de la producción de tesis y disertaciones del Programa Graduado del Departamento de Psicología desde enero del 1989 hasta diciembre del 2005*. Tesis doctoral. Departamento de Psicología. Universidad de Puerto Rico.
  155. Roy, B. (1.968): *Classement et choix en présence des points de vue multiples, la méthode ELECTRE*. R.I.R.O. vol. II, nº 8, pp. 57 – 75.
  156. Roy, B., Bertier, P. (1.973): *La méthode ELECTRE II. Une application au mediaplanning*. Operational Research'72; Ross, N. ed. North Holland, pp. 291 – 302.
  157. Roy, B. (1.978): *ELECTRE III: Un algorithme de rangement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples*. Cahiers du Centre d'Etudes de recherche operationnelle. Vol. 20, pp. 3 – 24.
  158. Roy, B. (1.981): *The optimization problem formulation: criticism and overstepping*. Journal of the operational research society, vol. 32, pp. 427 – 436.
  159. Roy, B. and Hugonnard, J. (1.982): *Ranking of suburban line extension projects on the Paris Metro System by a multicriteria method*. Transportation research, vol. 16A, nº 4, pp. 301 – 312.
  160. Roy, B. y Skalka, J. (1.985): *ELECTRE IS, aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Cahier du LAMSADE nº 30, Université Paris-Dauphine. Paris.

161. Roy, B. (1990): *Decision-aid and decision-making*, European Journal of Operational Research, Vol. 45 pp. 24-31.
162. Roy, B. (1991): *The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods*. Theory and Decision, Vol. 31 No.1, pp.49-73.
163. Roy, B.; Vincke, P. (1989): *Multicriteria analysis: survey and new directions*. European Journal of Operational Research, Vol. 8 pp.85-92.
164. Saaty, T. L. 1977: *A scaling method for priorities in hierarchical structures*. Journal of Mathematical Psychology, 5 (1977) 234-281.
165. Saaty, T. L.(1980): *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
166. Saaty, T.L. and Yoram Wind.: *Marketing applications of the analytic hierarchy process*. Management Science, 26(7):641–658, July 1980.
167. Saaty, T.L.: *Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process*. Management Science, 32(7):841–855, July 1986.
168. Saaty T.L., Rogers, P. and Pell, R., *Portfolio selection through hierarchies*. Journal of Portfolio Management, 6/3 (1988) 16-21.
169. Saaty, T.L. (1994). *How to make a decision: the analytic hierarchy process*. Interfaces 24: 19-43.
170. Saaty, T.L., (1996). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*, RWS Publications.
171. Saaty, T. L., *Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos*. En *Evaluación y Decisión Multicriterio. Reflexiones y Experiencias*, Editorial Universidad de Santiago 1998, pp. 17-46.
172. Saaty, T.L.: *Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary*. European Journal of Operational Research, 145(1):85–91, February 2003.
173. Saaty, T.L. and Ozdemir, M.: *Negative priorities in the analytic hierarchy process*. Mathematical and Computer Modelling, 37(9-10):1063–1075, May 2003.

174. Saaty, T.L. (2004). *The analytic network process: dependence and feedback in decision making*. RWS Publications.
175. Saaty, T.L. and Niemira, M.P.: *An analytic network process model for financial crisis forecasting*. International Journal of Forecasting, 20(4):573–587, October-December 2004.
176. Saaty, T.L. (2008): *Decision making with the analytic hierarchy process*. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, 2008.
177. Saaty, T.L. (2008): *Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process*. Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. Vol. 102 (2), 2008, pp. 251–318.
178. Sagir, M. et al. (2009): *An AHP Model to Evaluate Scientific Research Projects*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
179. Sánchez C. (1999): *Manual de análisis estadístico de los datos* 2a. Edición. Alianza Editorial S.A. Madrid.
180. Sarkis, J.: *Evaluating environmentally conscious business practices*. European Journal of Operational Research, 107(1):159–174, May 1998.
181. Sato, Y. (2009): *How to Design a Survey Questionnaire by Employing a Weighting Method*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
182. Seo, F. and Sakawa, M. (1979): *Technology assessment and decision-aid utility analysis in fossil fuel – to – fuel conversion*. Proceedings of IFAC Symposium on Criteria for Selecting Appropriate Technologies under Different Cultural Technical and Social Conditions. Pergamon Press, Oxford.
183. Seong Kon Lee, Gento Mogib and Jong Wook Kim (2008): *The competitiveness of Korea as a developer of hydrogen energy technology: The AHP approach*. Energy Policy, Volume 36, Issue 4, April 2008, Pages 1284-1291.

184. Shamsuzzaman, M. (2000) "Selection of A FMS based on fuzzy set theory and AHP methods", ISE-Thesis, Asian Institute of technology, Bangkok.
185. Shamsuzzaman, M.; Sharif Ullah A.M.M.; Bohez, E.L.J. (2003) "Applying linguistic criteria in FMS selection: fuzzy set AHP approach" *Integrated manufacturing*, 14/3 247-254.
186. Shih-Tong Lu, Cheng-Wei Lin and Ping-Hui Ko. *Application of Analytic Network Process (ANP) in Assessing Construction Risk of Urban Bridge Project*. Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC apos;07. Second International Conference on Volume , Issue , 5-7 Sept. 2007 Page(s):169 – 169.
187. Shuo-Pei Chen and Wann-Yih Wu (2010): *A systematic procedure to evaluate an automobile manufacturer-distributor partnership*. *European Journal of Operational Research*, vol. 205, pp. 687-698.
188. Simon, H. (1957). *Models of Man, Part IV.- Rationality and Administrative Decision Making*", New York, Weley.
189. Stake, R. (1998): *Investigación con estudio de casos*. Cuarta edición. Editorial Morata. Madrid, España.
190. Sushil Kumar, Omkarprasad Vaidyaa. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1):1–29, February 2006.
191. Szidarovsky, F., Duckstein, L. and Bogardi, Y. (1984): *Multiobjective management of mining under water hazard by games theory*. *European Journal of Operations Research* 15(2), pp. 251-258.
192. Takeda, E.; Yu, P.L. (1995): *Assessing priority weights from subsets of pairwise comparisons in multiple criteria optimization problems*. *European Journal of Operational Research*, 86, 315-331.
193. Tamayo, M. (1981). *El Proceso de Investigación Científica*. Editorial Limusa. México.
194. Thurston, L.L. (1927): *A Law of Comparative Judgement*. *Psychological Rev.* Vol. 34, pp. 273 - 286.

195. Tone, K. (1996): *Two technical notes on the AHP based on the Geometric Mean Method*. Proceedings of ISAHP'96, 375-381.
196. Tuominen, M. and Kengpola, A.: *A framework for group decision support systems: An application in the evaluation of information technology for logistics firms*. International Journal of Production Economics, 101(1):159–171, May 2006.
197. Tzeng; Feng, Lee Chi and Hshiong, Gwo. *Strategies of decreasing greenhouse gas emission for transportation section: An assessment and proposal*. Energy and Environmental Research, pages 1–14, January 2007.
198. van Til JA, Renzenbrink GJ, Dolan JG, Ijzerman MJ. *The use of the analytic hierarchy process to aid decision making in acquired equinovarus deformity*. Arch Phys Med Rehabil. 2008 Mar; 89(3) pages:457-62.
199. Vera, A. y Villalón, M. (2005): *La triangulación entre métodos cuantitativos y cualitativos en el proceso de investigación*. Ciencia & Trabajo. Año 7. No.16. Abril /junio, 85-87.
200. Verdecho, M.J., Alfaro, J.J. y Rodriguez, R. (2009): *Supplier Selection for Collaborative New Product Development Process: An Application to the Automotive Industry*. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. August 2009. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
201. Vicent S. Lai et al. (2002): *Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection*. Elsevier. European Journal of Operational Research 137 (2002) 134 – 144.
202. Vincke, P. (1989): *L'aide multicritère à la décision*. Editions de l'Université de Bruxelles. SMA. Editions Ellipses. Paris.
203. Vincke, P. (1992): *MultiCriteria Decison Aid*. Wiley. Chichester.
204. Von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1944): *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press.

205. Wei, Chun-Chin & Chien, Chen-Fu & Wang, Mao-Jiun J. (2005): *An AHP-based approach to ERP system selection*. International Journal of Production Economics, Elsevier, vol. 96(1), pages 47-62, April.
206. Wilkinson, J. H., (1965). *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Clarendon Press, Oxford.
207. Wizelius, T. (2007): *Developing Wind Power Projects: Theory and Practice*. Earthscan Publications Ltd.
208. Wong, J. and Li, H. (2008): *Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems*. Building and Environment, Volume 43, Issue 1, January 2008, Pages 108-125.
209. Yela, M. (1990): *Evaluar qué y para qué. El problema del criterio*. Papeles del Psicólogo. Noviembre , nº 46 y nº47 , 1990. ISSN 0214 - 7823.
210. Yu P. L. (1973): *A class of solutions for group decision problems*. *Management Science*, Vol.19, nº 1, pp. 936-946.
211. Zeleny, M. (1973): *Comprising Programming*. En: J. L. Cochrane & M. Zeleny, Eds., *Multiple criteria decision making*. University of South Carolina Press, Columbia, pp. 263-301.
212. Zolezzi Cid, J.M. (2007): *Selección de la ubicación de generadores en el sistema Interconectado Central Chileno, mediante proceso ANP y Software de Super Decisions*. Libro: Toma de Decisiones en Escenarios Complejos. Editorial Universidad de Santiago de Chile.

## **Índice de tablas**



<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
Tabla II-1	Procedimientos de normalización	
Tabla II-2	Escala de valores de Saaty	
Tabla II-3	Aplicaciones más recientes del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	
Tabla II-4	Aplicaciones más recientes del Proceso Analítico en Red (ANP)	
Tabla II-5	Aplicaciones más recientes de AHP y ANP integrados con otras técnicas	
Tabla III-1	Escala fundamental de números absolutos	
Tabla V-1	Escala fundamental de Saaty	
Tabla VI-1	Índices de consistencia promedio	
Tabla VI-2	Matriz de importancia relativa del factor crítico <i>emplazamiento</i>	
Tabla VI-3	Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio <i>emplazamiento</i>	
Tabla VI-4	Matriz de importancia relativa del factor crítico <i>generador</i>	
Tabla VI-5	Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio <i>generador</i>	
Tabla VI-6	Matriz de importancia relativa del factor crítico <i>medioambiente</i>	
Tabla VI-7	Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio <i>medioambiente</i>	
Tabla VI-8	Matriz de importancia relativa del factor crítico <i>medioambiente</i>	
Tabla VI-9	Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio <i>tecnología incorporada</i>	
Tabla VI-10	Matriz de importancia relativa del factor crítico <i>costes</i>	
Tabla VI-11	Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes al criterio <i>costes</i>	

- Tabla VI-12 Matriz de importancia relativa de los criterios con respecto al objetivo
- Tabla VI-13 Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes a la matriz de criterios
- Tabla VI-14 Prioridad de criterios y subcriterios para la selección del aerogenerador
- Tabla VI-15 Pesos relativos globales de los cinco primeros subcriterios en los escenarios considerados
- Tabla VI-16 Matriz de importancia relativa de las alternativas de solución
- Tabla VI-17 Razón de consistencia y vector de prioridades correspondientes a las alternativas

## **Índice de figuras**



<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>
Figura II-1	Modelo jerárquico para la toma de decisiones con AHP
Figura II-2	Esquema del AHP para resolución de problemas
Figura II-3	Esquema del ANP para resolución de problemas
Fig. III-1	Modelo jerárquico con tres niveles
Fig. III-2	Relaciones en un sistema ANP
Fig. IV-1	Componentes básicos de un aerogenerador
Fig. IV-2	Cobertura de la demanda anual (2008) de energía eléctrica en España peninsular
Fig. IV-3	Evolución anual de la potencia eólica instalada (1998-2009)
Fig. IV-4	Incremento anual de la potencia eólica instalada y tasa de variación (1998-2009)
Fig. IV-5	Potencia eólica instalada en el período 2004 - 2008 por comunidad autónoma
Fig. IV-6	Evolución de la potencia eólica instalada y prevista según PER
Fig. IV-7	Reparto por fabricantes de la potencia eólica instalada acumulada a 31/12/2009
Fig. IV-8	Potencia suministrada por generador de 850 Kw en función de la velocidad del viento
Fig. IV-9	Generador asíncrono V90
Fig. V-1	Imagen de la primera página del cuestionario
Fig. V-2	Imagen de la valoración de una pareja de subcriterios con el menú desplegable.
Fig. V-3	Imagen de todas las parejas de subcriterios de un criterio, ya valoradas
Fig. V-4	Escrito dirigido a los evaluadores externos
Fig. V-5	Carta al panel de expertos
Figura VI-1	Diagrama de flujo de un proceso de análisis jerárquico
Fig. VI-2	Estructura jerárquica para la priorización de alternativas, criterios y subcriterios

- Fig. VI-3 Matriz recíproca para comparación pareada de juicios en AHP
- Fig. VI-4 Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *emplazamiento*
- Fig. VI-5 Importancia relativa de los subfactores críticos correspondientes al factor *generador*
- Fig. VI-6 Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *medioambiente*
- Fig. VI-7 Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *tecnología incorporada*
- Fig. VI-8 Importancia relativa de los subcriterios correspondientes al factor *costes*
- Fig. VI-9 Importancia relativa de los criterios con respecto a la selección del aerogenerador
- Fig. VI-10 importancia relativa de los criterios con respecto a la meta
- Fig. VI-11 Escenario 1
- Fig. VI-12 Escenario 2
- Fig. VI-13 Escenario 3
- Fig. VI-14 Importancia relativa de las alternativas de solución

## **Abreviaturas utilizadas**



<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
AEE	Asociación Empresarial Eólica
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
APPA	Asociación de Productores de Energías Renovables
BSC	Balanced Score Card
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CNE	Comisión Nacional de Energía
DEA	Data Envelopment Analysis
ÉLECTRE	ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité
ERP	Enterprise Resource Planning
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IDEA	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
LD	Lógica Difusa (Fuzzy Logic)
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MCDA	Multicriteria Decision Aid
MCE	Multicriteria evaluation
MDM	Métodos de Decisión Multicriterio
OR	Operations Research

OPTI	Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial
PER	Plan de Energías Renovables
PFER	Plan Fomento de las Energías Renovables
PMS	Performance Measurement System
PROMÉTHÉE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations
REE	Red Eléctrica de España
QFD	Quality Function Deployment
SEMOPS	Sequential Multiobjective Problem Solving Method
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
TMR	Tarifa Media de Referencia

**Anexo I**  
**Cuestionario**



Nuestro objetivo es conocer que características, entre las consideradas, estima más importantes para que el aerogenerador que las incorpore sea el más aceptado en el mercado español en 2015.

Consideramos cuatro posibles **emplazamientos** para un aerogenerador:

Aislado e instalado en tierra (**Aislado terrestre**)

Aislado e instalado en el mar (**Aislado marino**)

Instalado en un parque eólico terrestre (**Integrado terrestre**)

Instalado en un parque eólico marino (**Integrado marino**)

Para cada pareja de emplazamientos, indique el grado de importancia que le concede al situado a la izquierda respecto al de la derecha. Para hacerlo, sitúe el cursor sobre la casilla situada entre la pareja, haga clic con el ratón y pulse el botón que aparecerá a la derecha. Se despliega la lista de valores. Seleccione el que considere más adecuado.

Aislado terrestre		Aislado marino
Aislado terrestre		Integrado terrestre
Aislado terrestre		Integrado marino
Aislado marino		Integrado terrestre
Aislado marino		Integrado marino
Integrado terrestre		Integrado marino

Ahora consideramos tres posibles **generadores** que pueden formar parte del aerogenerador. Para cada pareja de generadores, indique el grado de importancia que le concede al situado a la izquierda respecto al de la derecha.

Asíncrono de doble alimentación		Síncrono multipolar sin multiplicadora
Asíncrono de doble alimentación		Asíncrono de doble velocidad
Síncrono multipolar sin multiplicadora		Asíncrono de doble velocidad

Por favor, valore de igual forma las tres parejas de variables, de la tabla inferior, vinculadas a la conservación del **medioambiente**. Como *Impacto ambiental* consideramos cualquiera que no sea *acústico* o *paisajístico*.

Impacto medioambiental		Impacto en el paisaje
Impacto medioambiental		Impacto acústico
Impacto en el paisaje		Impacto acústico

Valore los siguientes elementos de **tecnología incorporada** a un aerogenerador

Multiplicadora		Velocidad variable
Multiplicadora		Velocidad fija
Multiplicadora		Diámetro del rotor
Multiplicadora		Potencia generada
Multiplicadora		Supervisión remota
Multiplicadora		Control de tensión
Velocidad variable		Velocidad fija
Velocidad variable		Diámetro del rotor
Velocidad variable		Potencia generada
Velocidad variable		Supervisión remota
Velocidad variable		Control de tensión
Velocidad fija		Diámetro del rotor
Velocidad fija		Potencia generada
Velocidad fija		Supervisión remota
Velocidad fija		Control de tensión
Diámetro del rotor		Potencia generada
Diámetro del rotor		Supervisión remota
Diámetro del rotor		Control de tensión
Potencia generada		Supervisión remota
Potencia generada		Control de tensión
Supervisión remota		Control de tensión

Valore los **costes** siguientes que influyen, junto a otros, en el coste total de un aerogenerador

Inversión en I+D		Fabricación
Inversión en I+D		Instalación
Inversión en I+D		Mantenimiento
Inversión en I+D		Almacenamiento energía
Inversión en I+D		Integración en redes
Inversión en I+D		Desmontaje
Fabricación		Instalación
Fabricación		Mantenimiento
Fabricación		Almacenamiento energía
Fabricación		Integración en redes
Fabricación		Desmontaje
Instalación		Mantenimiento
Instalación		Almacenamiento energía
Instalación		Integración en redes
Instalación		Desmontaje
Mantenimiento		Almacenamiento energía
Mantenimiento		Integración en redes
Mantenimiento		Desmontaje
Almacenaje energía		Integración en redes
Almacenaje energía		Desmontaje
Integración en red		Desmontaje

Ahora, le rogamos que compare entre sí los cinco **critérios** valorados hasta ahora: tipo de generador, coste total, medioambiente, tipo de emplazamiento y tecnología incorporada.

Generador		Coste
Generador		Medioambiente
Generador		Emplazamiento
Generador		Tecnología incorporada
Coste		Medioambiente
Coste		Emplazamiento
Coste		Tecnología incorporada
Medioambiente		Emplazamiento
Medioambiente		Tecnología incorporada
Emplazamiento		Tecnología incorporada

Finalmente, le pedimos que compare y valore las **alternativas** o aerogeneradores-tipo que consideramos a continuación. Puede ver las características de cada aerogenerador en la hoja "**alternativas**".

ADA		SMS
ADA		ADV
SMS		ADV

Por favor, grabe este fichero en el ordenador para no perder los datos y luego me lo envía a **[gargomped@alumnos.uch.ceu.es](mailto:gargomped@alumnos.uch.ceu.es)**

**Muchas gracias por su colaboración**



**Anexo II**  
**Información complementaria sobre las alternativas, criterios**  
**y subcriterios utilizados**



En el presente anexo se explican cada una de las alternativas de solución, criterios y subcriterios que han sido considerados en la investigación. Se trata de proporcionar una síntesis de sus características definitorias con objeto de que puedan ser comprendidos con mayor claridad por los validadores, expertos y todos aquellos que pudieran interesarse por el trabajo realizado.

### ***Criterio C1 Generador***

El generador es el elemento del aerogenerador encargado de convertir la energía mecánica (en forma rotatoria), en energía eléctrica. Los generadores estudiados son de dos tipos: asíncronos y síncronos.

#### *Subcriterios asociados al criterio C1:*

C1.1 Asíncrono de doble alimentación: este tipo de generador se caracteriza por su facilidad de conexión a la red, robustez, ausencia de contactos móviles, admitir un ligero deslizamiento de velocidad con respecto a la de sincronismo, un sistema de control sencillo y su coste es el menor de entre los de corriente alterna. Requiere estar acoplado a la red eléctrica para funcionar.

C1.2 Síncrono multipolar sin multiplicadora: este generador se caracteriza por producir energía reactiva, funcionar de forma autónoma, soportar bien los huecos de tensión y no admitir deslizamiento con respecto a la velocidad de sincronismo.

C1.3 Asíncrono de doble velocidad: Consideramos las mismas características del C1.1, excepto la doble alimentación, y además hay que tener en cuenta que puede funcionar con 4 y 6 polos.

## **Criterio C2 Coste**

### *Subcriterios asociados al criterio C2:*

C2.1 Inversión en I+D: Considera la inversión efectuada en investigación y desarrollo para fabricar el aerogenerador.

C2.2 Fabricación: En este coste se consideran incluidos todos los costes de fabricación del aerogenerador y ensamblaje del producto, excepto los de inversión en I+D, módulos de almacenamiento de energía (si los hubiera) y transporte del producto acabado.

C2.3 Instalación del aerogenerador en su emplazamiento. Incluye los costes de transporte y de las líneas de evacuación de energía.

C2.4 Mantenimiento del aerogenerador: considera todos los costes de mantenimiento una vez instalado en su emplazamiento

C2.5 Almacenamiento energía: Considera el coste necesario para que, cuando el aerogenerador produzca y no esté conectado a la Red Eléctrica, posea un dispositivo de almacenamiento de esa energía que va produciendo.

C2.6 Integración en redes de distribución: Coste de la conexión directa o indirecta a la Red Eléctrica.

C2.7 Desmontaje de la instalación al finalizar la concesión: considera el coste de esta operación.

### ***Criterio C3 Medioambiente***

Con este criterio queremos valorar si el aerogenerador-tipo posee características que eviten, en cierta medida, el impacto sobre el medioambiente en el entorno donde se instalarán.

#### *Subcriterios asociados al criterio C3:*

C3.1 Impacto medioambiental: se valora cualquier tipo de impacto sobre el entorno que no sea de tipo acústico o paisajístico. Por ejemplo: un impacto químico debido a los lubricantes utilizados.

C3.2 Impacto en el paisaje: se valora si la disposición geométrica, el color, la incorporación de grafismos u otras características del aerogenerador-tipo tienen en cuenta las condiciones del terreno y el entorno de forma que su impacto en el paisaje no sea negativo.

C3.3 Impacto acústico: se valora si el aerogenerador incorpora elementos que ayuden a amortiguar el ruido que produce su funcionamiento en el entorno.

### ***Criterio C4 Emplazamiento***

Con este criterio se valora cual es el tipo de emplazamiento que será más utilizado de aquí a 2015 para aerogeneradores de los tres tipos que consideramos.

*Subcriterios asociados al criterio C4:*

C4.1 Aislado terrestre: no se encuentra integrado en un parque eólico y su emplazamiento es terrestre.

C4.2 Integrado terrestre: el aerogenerador se encuentra integrado en un parque eólico terrestre.

C4.3 Integrado marino: el aerogenerador se encuentra integrado en un parque eólico marino.

C4.4 Aislado marino: no se encuentra integrado en un parque eólico y su emplazamiento está situado en el mar.

### ***Criterio C5 Tecnología incorporada***

Mediante este criterio se valoran algunos elementos incorporados al aerogenerador. No pretendemos realizar un estudio exhaustivo de todas las componentes de un aerogenerador, ya que la investigación sólo trata de establecer un método.

#### *Subcriterios asociados al criterio C5:*

C5.1 Multiplicadora: hace la conversión entre la potencia de alto par torsor, que obtiene del rotor de la turbina eólica girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que utiliza en el generador.

C5.2 Velocidad variable: el aerogenerador incorpora una estructura para regular la velocidad del sistema en un rango del orden de la velocidad nominal.

C5.3 Velocidad fija: No posee la regulación mencionada en el párrafo anterior.

C5.4 Diámetro del rotor: Esta variable considera solamente esa magnitud.

C5.5 Potencia generada: Potencia nominal del aerogenerador en Mw. Consideramos que el control de la potencia es de los tipos: paso Variable y excitación rotórica y/o entrada en pérdida aerodinámica

C5.6 Supervisión remota: El aerogenerador posee un sistema informático y de comunicación que permite realizar a distancia operaciones de control y diagnóstico de averías.

C5.7 Control de tensión: sistema incorporado que colabora en el control de tensión de la red en su punto de conexión, siguiendo consignas en tiempo real del operador de red o la demanda generada por el cliente.

## **Alternativas**

Las características de cada una de las alternativas que planteamos al problema de selección de un generador mediante la aplicación de un método de decisión multicriterio, son las siguientes:

### **A1. Aerogenerador tipo ADA**

*Generador:* asíncrono de doble alimentación

*Sistema de acumulación:* no.

*Integración en redes de distribución:* si.

*Impacto acústico:* hasta 70 dBA a pie de aerogenerador.

*Impacto ambiental:* utiliza lubricantes.

*Impacto paisajístico:* utiliza colores neutros en toda la estructura externa.

*Velocidad del generador:* Variable

*Diámetro de rotor:* entre 45 y 50 m.

*Potencia:* más de 3Mw

*Altura de la torre:* hasta 110 m.

*Paso de palas:* Variable.

*Palas:* 2 con control de pitch independiente para cada pala

*Trafo:* seco sin protección

*Control de potencia:* Paso Variable y excitación rotórica

*Sistema de orientación:* doble motor en pista exterior corona.

*Multiplicadora:* sistema planetario y helicoidal de 3 etapas.

*Sistema de frenado:* Freno eléctrico en motor (principal), paso variable y pinza hidráulica en eje rápido (secundario).

*Operación:* Software de control para monitorización y operación automática inteligente.

*Control de tensión:* Si.

*Estructura:* La torre y la góndola están fabricadas con materiales que facilitan las labores de instalación, desmontaje y transporte. Está diseñada para un emplazamiento terrestre.

## **A2. Aerogenerador tipo SMS**

*Generador:* síncrono multipolar

*Sistema de acumulación:* no.

*Integración en redes de distribución:* si.

*Impacto acústico:* hasta 60 dBA a pié de aerogenerador.

*Impacto ambiental:* la ausencia de elementos mecánicos de multiplicación hace innecesario el uso de aceites minerales lubricantes y su potencial fuente de residuos tóxicos y contaminantes

*Impacto paisajístico:* su estructura reduce la dimensión en la obra civil necesaria y, en consecuencia, las afecciones sobre el entorno.

*Velocidad del generador:* Variable

*Diámetro de rotor:* entre 50 y 55 m.

*Potencia:* entre un 1Mw y 3MW.

*Altura de la torre:* hasta 50 m.

*Paso de palas:* Variable.

*Palas:* 3 con control de pitch independiente para cada pala

*Trafo:* seco y encapsulado.

*Control de potencia:* Paso Variable y excitación continua

*Sistema de orientación:* doble motor en pista exterior corona.

*Multiplicadora:* no (acoplamiento directo).

*Sistema de frenado:* Pinza hidráulica y paso variable.

*Operación:* control robusto QFT (regular las potencias activa y reactiva). Aporte de energía reactiva durante el hueco de tensión.

*Control de tensión:* Si.

*Estructura:* La torre es tubular de acero, fabricada en secciones con bridas en cada uno de los extremos y unidas con pernos en el momento de la instalación. Puede ser utilizada en emplazamientos terrestres.

### **A3. Aerogenerador tipo ADV**

*Generador:* asíncrono de doble velocidad

*Sistema de acumulación:* no.

*Integración en redes de distribución:* si.

*Impacto acústico:* hasta 45 dBA a pié de aerogenerador. Palas de aerodinámica pensada para bajo nivel de ruido.

*Impacto ambiental:* utiliza lubricantes.

*Impacto paisajístico:* utiliza colores neutros en toda la estructura externa.

*Velocidad del generador:* fija

*Diámetro de rotor:* entre 70 y 90 m.

*Potencia:* menor de 1 Mw.

*Altura de la torre:* hasta 45 m.

*Paso de palas:* Variable.

*Palas:* 3 con control de pitch independiente para cada pala.

*Trafo:* seco y encapsulado

*Control de potencia:* Paso variable y excitación rotórica

*Sistema de orientación:* doble motor en exterior corona.

*Multiplicadora:* dos ejes planetarios y uno helicoidal.

*Sistema de frenado:* Tres cilindros hidráulicos de paso independientes.

*Operación:* Microprocesador de todas las funciones del aerogenerador con supervisión remota.

*Control de tensión:* Si.

*Estructura:* La torre está fabricada con una aleación de acero que permite desarrollar una estructura que facilita las labores de instalación, desmontaje y transporte. El ensamblaje de los elementos que se sitúan en el interior de la góndola ofrece un mayor espacio libre, lo que facilita las labores de mantenimiento. Puede utilizarse en emplazamientos marinos y terrestres.