

Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

# Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica; AHP y Topsis Fuzzificado

**Titulación:** Ingeniería Industrial

**Alumno/a:** Maria Jesus Mellinas  
Fernandez

**Director/a/s:** Francisco Javier Cánovas  
Rodríguez

Cartagena, 4 de Septiembre de 2012

# Agradecimientos

---

En primer lugar, agradecer a mi director de proyecto, Francisco Javier Cánovas Rodríguez, por la ayuda y apoyo recibido durante la realización del proyecto, por todo su tiempo de dedicación. Siempre estaba disponible sin ningún tipo de problema, aun sin tener tiempo material, te hacia un hueco, y siempre con una sonrisa y un buen humor, por muy liado que estuviera, era de admirar. Es un gran profesor, para mí es uno de los pocos que me encontrado a lo largo de la carrera, que te hace ver que una asignatura a la que se le puede tener pánico y que puede resultar a priori muy complicada de superar, se puede convertir en una asignatura interesante y accesible. Es un gran profesional, pero seguro que muchos de mis compañeros, estarán conmigo, que ante todo, es un buen amigo.

Quiero agradecer todo el apoyo recibido por todos mis compañeros a lo largo de la carrera, en especial a Víctor Manuel, que ha sido mi compañero de la Ingeniería Técnica y siempre ha sido un gran apoyo para mí, en los momentos de exámenes y un gran compañero de piso, ha sabido siempre escucharme, darme buenos consejos.

Agradecer a mi pareja, Juan José, su gran apoyo y ayuda prestada todos estos años, siempre me ha hecho ver que los obstáculos no existen, y que ante un esfuerzo, siempre hay una recompensa.

Agradecer a mis amigas de la infancia; Fina, Marian, Mari Carmen, Ana y María del Mar, su gran apoyo y ánimos durante todos estos años, siempre han estado ahí en los momentos que más las he necesitado, les agradezco enormemente todo su apoyo y cariño prestado en los momentos de gran estrés y derrumbes. Gracias por todos los ánimos recibidos, y por los buenos consejos que me han dado siempre.

Por último, pero no menos importante, agradecer todo el apoyo recibido por mi familia y todo lo que me han dado siempre. Mi padre convertía siempre mis problemas en cosas en las que había que reír y no agobiarse, quitándole importancia. Agradecer en especial, a mis abuelos, que son una parte muy importante en mi vida, siempre he tenido su ayuda para lo que necesitase de forma incondicional. Seguro que mi abuelo en gloria esté, se sentiría muy orgulloso si pudiera verme con la carrera terminada. No tengo palabras para agradecerle a mi abuela María todo lo que ha hecho por mí desde pequeña y el gran apoyo que ha sido a lo largo de la carrera y de mi vida, ha sido más que una amiga. Siempre he tenido todo su apoyo, y sus ánimos en los exámenes, incluso podría decir que ella lo pasaba peor que yo, en cuanto a nervios. Para ella su lema siempre ha sido “todo tiene solución menos la muerte”, y “con interés, todo se puede sacar para adelante”, esas siempre ha sido sus frases. Así que no tengo palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí siempre.

Por ello, os lo dedico a todos vosotros, ya que todo lo que soy y todo lo bueno que hay en mí, es gracias a todos vosotros.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

# ÍNDICE.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## **Capítulo 1. Introducción al proyecto.**

---

**Pg.**

1. Introducción. ....	2
1.1. Antecedentes y motivación .....	2
1.2. Objeto del proyecto .....	3
1.3. Estructura del proyecto .....	5
1.4. Referencias .....	7
1.4.1. Figuras y Tablas	
1.4.2. Texto	

## **Capítulo 2. Métodos de Decisión Multicriterio (conceptos).**

---

2.1. Introducción .....	10
2.2. Técnicas de decisión .....	10
2.3. Conceptos básicos sobre decisión .....	12
2.3.1. Decisor/a o unidad decisora	
2.3.2. Analista	
2.3.3. Ambiente o contexto de la situación de decisión	
2.3.4. Criterios: objetivos, atributos y metas	
2.3.5. Pesos	
2.3.6. Alternativas o decisiones posibles	
2.3.7. Matriz de valoración	
2.3.8. Solución eficiente	
2.4. Clasificación de los problemas de decisión .....	15
2.4.1. Atendiendo a las situaciones de decisiones	
2.4.2. Atendiendo al estado del entorno	
2.4.3. Atendiendo a la naturaleza de las alternativas	
2.4.4. Atendiendo a las características de la unidad decisora	
2.5. Fases de un proceso de toma de decisión multicriterio ...	16

2.5.1. Estructuración del problema de decisión	
2.5.2. Análisis del problema de decisión	
2.5.3. Implementación de la decisión y evaluación de los resultados	
2.6. Principales métodos de decisión multicriterio	
2.7. Referencias .....	18
2.7.1. Texto	
2.7.2. Figuras y Tablas	

### **Capítulo 3. Métodos clásicos: AHP y Topsis**

---

3.1. Introducción. Método AHP .....	22
3.1.1. Características principales del método	
3.1.2. Axiomas básicos	
3.1.3. Metodología del proceso analítico jerárquico	
3.1.4. Ventajas e Inconvenientes de AHP	
3.2. Aplicación a nuestro caso .....	37
3.3. Método Topsis .....	38
3.3.1. Algoritmo del Método Topsis	
3.3.2. Problemas que se plantean en el Método Topsis	
3.3.3. Nueva Aproximación al Método Topsis	
3.4. Referencias .....	52
3.4.1. Figuras y Tablas	
3.4.2. Texto	

### **Capítulo 4. Lógica Fuzzy**

---

4.1. Introducción .....	56
4.1.1. Ejemplo de Lógica Fuzzy	
4.1.2. ¿En qué situaciones es útil aplicar la lógica difusa?	
4.2. Teoría de los Conjuntos difusos .....	58

4.2.1. Teoría de Conjuntos Clásicos (Conjuntos nítidos)	
4.2.2. Conjuntos Difusos	
4.2.2.1. Funciones de pertenencia	
4.2.2.2. Etiquetas lingüísticas	
4.2.3. Operaciones elementales con conjuntos difusos	
4.2.3.1. Complementario	
4.2.3.2. Intersección	
4.2.3.3. Unión	
4.2.4. Razonamiento difuso	
4.2.4.1. Inferencia difusa	
4.2.4.2. Decodificación (transformación de un conjunto difuso en un valor nítido)	
4.3. Referencias .....	80
4.3.1. Figuras y Tablas	
4.3.2. Texto	

## **Capítulo 5. Método AHP Fuzzy**

---

5.1. Introducción .....	84
5.2. Integración de AHP con los Conjuntos Difusos .....	85
5.2.1. Metodología AHP Fuzzy	
5.2.2. Caso práctico del método AHP difuso; Evaluación de tres alternativas de Maquina Herramienta Automatizadas	
5.2.3. Conclusiones del método	
5.3. Comparación del AHP convencional con el AHP Fuzzy ....	95
5.4. Referencias .....	95
5.4.1. Figuras	
5.4.2. Texto	

## **Capítulo 6. Método Topsis Fuzzy**

---

6.1. Introducción .....	98
6.2. Variables Lingüísticas y conjuntos difusos .....	98
6.2.1. Variable Lingüística	
6.2.2. Conjuntos Difusos	
6.3. Topsis difuso .....	100
6.3.1. Método Algoritmo Propuesto	
6.4. Caso Práctico .....	104
6.4.1. Estructuración del problema de decisión	
6.4.2. Análisis del problema de decisión	
6.5. Conclusiones .....	108
6.6. Referencias .....	108
6.6.1. Figuras	
6.6.2. Texto	

## **Capítulo 7. Aspectos Medioambientales y Sociales**

---

7.1. Introducción .....	112
7.2. Objetivo de éste capítulo .....	112
7.3. Aspectos Medioambientales .....	113
7.3.1. Impactos más relevantes de la generación eléctrica	
7.3.1.1. Impacto locales	
7.3.1.2. Impacto globales	
7.3.2. Emisiones contaminantes en la generación eléctrica	
7.3.2.1. Indicadores de Calidad Ambiental	
7.3.2.2. Aumento de emisiones CO <sub>2</sub> en el Sector Eléctrico por la quema de Carbón Nacional	
7.3.2.3. Energía Eólica en lugar del Carbón	
7.3.2.4. Los Gases de Efecto Invernadero	

7.3.2.5.	Las emisiones de CO <sub>2</sub> en la Región de Murcia	
7.3.3.	Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	
7.3.4.	Comparación de los Impactos Ambientales de Ocho Tecnologías de Generación Eléctrica.	
7.4.	Aspectos Sociales .....	129
7.4.1.	Motivación y objetivo del estudio	
7.4.2.	Estudio Energías Renovables; generación de empleo en España, presente y futuro.	
7.4.2.1.	Resumen del estudio del IDAE	
7.4.3.	La Región de Murcia hacia el Autoabastecimiento	
7.4.4.	Moratoria Renovable en el sector de la Bioenergía	
7.4.4.1.	Déficit de Tarifa	
7.4.4.2.	Margen de Maniobra	
7.4.4.3.	Pronunciamiento de la Comisión Nacional de la Energía	
7.4.4.4.	Instalaciones Afectadas	
7.4.5.	Plan de Implantación 2015	
7.5.	Referencias .....	139
7.5.1.	Figuras y Tablas	
7.5.2.	Textos	

## **Capítulo 8. Aspectos Económicos y Tecnológicos**

---

8.1.	Introducción .....	144
8.2.	Objetivos de este capítulo .....	144
8.3.	Aspectos Económicos .....	145
8.3.1.	Situación actual en España en la generación de electricidad	
8.3.2.	Informe CNE de la situación actual sobre el Real Decreto	
8.3.3.	Objetivos del Real Decreto-ley 1/2012	
8.3.4.	Ámbito de aplicación del Real Decreto-ley 1/2012	

8.3.5.	Supresión de los incentivos económicos para las nuevas instalaciones, Real Decreto-ley 1/2012	
8.3.6.	Suspensión del procedimiento de pre-asignación de retribución, Real Decreto-ley 1/2012	
8.3.6.1.	Tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial	
8.3.6.2.	Costes considerados para 2012	
8.3.7.	No a la moratoria al desarrollo de las Energías Renovables	
8.3.8.	¿Qué es el déficit de tarifa y cómo combatirlo?	
8.4.	Aspectos Tecnológicos .....	157
8.4.1.	Introducción del Sistema Eléctrico Español	
8.4.2.	Datos de WWF de febrero de 2012 para las diferentes tecnologías	
8.4.3.	Barreras Energéticas	
8.4.3.1.	Barreras económicas	
8.4.3.2.	Barreras tecnológicas	
8.4.4.	Tecnologías Energéticas de Estudio	
8.4.4.1.	Energía Eólica	
8.4.4.2.	Energía Fotovoltaica	
8.4.4.3.	Energía Termoeléctrica	
8.4.4.4.	Micro-cogeneración	
8.4.4.5.	Micro-trigeneración	
8.4.4.6.	Biomasa	
8.4.5.	Maquinas frigoríficas	
8.4.6.	Rendimientos para la facturación de energía	
8.4.6.1.	Horas equivalentes y factor de capacidad	
8.4.6.2.	Rendimiento eléctrico equivalente en cogeneración y trigeneración	
8.4.6.3.	Metodología de evaluación del REE para trigeneración	
8.5.	Referencias .....	180
8.5.1.	Figuras y Tablas	

8.5.2. Textos

## **Capítulo 9. Respuesta a los Subcriterios**

---

9.1. Introducción .....	186
9.2. Medioambiente .....	188
9.2.1. Emisiones de CO <sub>2</sub>	
9.2.1.1. Micro-cogeneración y Micro-trigeneración	
9.2.1.2. Fotovoltaica	
9.2.1.3. Energía eólica, termoeléctrica y minihidráulica	
9.2.1.4. Biomasa y el ciclo neutro	
9.2.2. Terreno necesario	
9.3. Sociedad .....	193
9.3.1. Prejuicios	
9.3.2. Ruido	
9.3.3. Empleo generado	
9.4. Tecnología .....	195
9.4.1. Madurez	
9.4.1.1. Antecedentes Micro-cogeneración	
9.4.2. Proveedores cercanos	
9.4.3. Rendimiento de la Instalación	
9.4.4. Disponibilidad de recursos	
9.5. Economía .....	198
9.5.1. Formulación a considerar	
9.5.2. Inversión Inicial	
9.5.3. Coste de la materia prima	
9.5.3.1. Micro-cogeneración y Micro-trigeneración	
9.5.4. Periodo de retorno de la inversión (Pay-back)	
9.5.4.1. Las energías renovables se quedan sin primas: ¿Cómo nos afecta?	

9.5.4.2. ¿Por qué se suspenden las primas a las energías renovables?	
9.5.5. Ingresos .....	206
9.5.5.1. Micro-cogeneración y Micro-trigeneración	
9.5.5.2. Energías renovables	
9.5.5.3. ¿Cómo afecta la suspensión de las primas?. “El déficit de tarifa podría superar los 28.500 millones de euros”	
9.5.5.4. Supresión de los incentivos económicos para las nuevas instalaciones (Real Decreto-ley 1/2012, [80])	
9.5.5.5. Instalaciones que hubieran obtenido autorización administrativa para una modificación sustancial con fecha anterior a la entrada en vigor del presente real decreto-ley 1/2012 [80]	
9.5.6. Costes .....	212
9.5.6.1. Costes considerados para 2012	
9.6. Normalización de criterios y pesos .....	214
9.6.1. Normalización de los datos de referencia	
9.7. Referencias .....	217
9.7.1. Figuras y Tablas	
9.7.2. Textos	

## **Capítulo 10. Aplicación de los Métodos de Decisión Multicriterio**

---

10.1. Introducción .....	222
10.2. Métodos de Decisión Multicriterio .....	225
10.3. Aplicación del Método AHP Clásico .....	226
10.4. Aplicación del Método AHP Fuzzy .....	234
10.5. Aplicación del Método Topsis Clásico .....	247
10.5.1. Establecimiento de la matriz de decisión normalizada	
10.5.2. Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada	
10.5.3. Determinación de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)	

10.5.4.Cálculo de las medidas de distancia	
10.5.5.Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal	
10.5.6.Ordenación de preferencias	
10.6. Aplicación del Método Topsis Fuzzy .....	253
10.6.1.Estructuración del problema de decisión	
10.6.2.Análisis del problema de decisión	
10.7. Referencias .....	263
10.7.1.Figuras y Tablas	
10.7.2.Textos	

## **Capítulo 11. Código y Conclusiones**

---

11.1. Código de Excel .....	270
11.1.1.Código de AHP Fuzzy	
11.1.2.Código de Topsis Fuzzy	
11.2. Conclusiones del estudio realizado .....	273
11.3. Líneas de investigación futuras .....	275

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

# ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## **Capítulo 1. Introducción al proyecto.**

---

**Pg.**

Tabla 1.1.a Datos recopilados por Carlos Baldasquín Cáceres [2] .....	3
Tabla 1.1.b Datos actualizados .....	3
Figura 1.1. Localización de la hipotética mini central eléctrica .....	6

## **Capítulo 2. Métodos de Decisión Multicriterio (conceptos).**

---

Tabla 2.1. Matriz de valoración [1] .....	15
Figura. 2.1. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio [1] .....	17

## **Capítulo 3. Métodos clásicos: AHP y Topsis**

---

Figura 3.1. Esquema de valoración de alternativas .....	22
Figura 3.2. Diagrama de flujo del proceso de analítico jerárquico A.H.P. [7] ..	26
Figura 3.3. Jerarquía en A.H.P. ....	27
Tabla 3.1. Propuestas de escala de asignación directa .....	29
Tabla 3.2. Escala fundamental de comparación pareada [9] .....	32
Tabla 3.3. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n) [22] .....	33
Tabla 3.4. Matriz de valoración [1] .....	34
Tabla 3.5. Criterios y subcriterios en nuestro proyecto .....	37
Figura 3.4. Jerarquía AHP aplicada a nuestro proyecto .....	38
Figura 3.5. Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal .....	39
Figura 3.6. Pasos del método Topsis .....	40
Tabla 3.6. Matriz de decisión .....	40
Tabla 3.7. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio .....	43
Tabla 3.8. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio al que se ha añadido una nueva alternativa .....	45
Tabla 3.9. Métodos de normalización .....	46
Tabla 3.10. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la	

norma .....	47
Tabla 3.11. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma con inclusión de una nueva alternativa .....	48
Figura 3.7. Concepto PIS y NIS para el modo relativo y el modo absoluto .....	49
Figura 3.8. Modo relativo para 3 y 4 alternativas .....	50
Figura 3.9. Modo absoluto para 3 y 4 alternativas .....	50
Tabla 3.12. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias .....	51
Tabla 3.13. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias y la inclusión de una nueva .....	51

## **Capítulo 4. Lógica Fuzzy**

---

Tabla 4.1. Conjunto difuso “joven” .....	57
Figura 4.1. Función de pertenencia del conjunto difuso joven .....	57
Figura 4.2. Función de pertenencia de joven si U es continuo .....	57
Figura 4.3. Funciones escalón .....	59
Figura 4.4. Altura de los seres humanos .....	61
Figura 4.5. Función concentración .....	66
Figura 4.6. Función dilatación .....	66
Figura 4.7. Función intensificación del contraste .....	67
Figura 4.8. Función difuminación .....	67
Tabla 4.2. FuzzyCLIPS .....	67
Figura 4.9 .....	68
Figura 4.10 .....	69
Figura 4.11 .....	69
Figura 4.12. Función t-norma del mínimo .....	70
Figura 4.13. Función t-norma del producto .....	70
Figura 4.14. Función del producto drástico .....	71
Figura 4.15. Función t-conorma del máximo .....	72
Figura 4.16. Función t-conorma de la suma .....	72
Figura 4.17. Función t-conorma de la suma drástica .....	72
Figura 4.18. Función inferencia tipo max-min .....	76
Figura 4.19. Función inferencia tipo max-pro .....	76

Figura 4.20. Función con implicación de la lógica (max) .....	77
Figura 4.21. Función con implicación de la lógica (min) .....	77
Figura 4.22. Función de pertenencia de los conjuntos difusos .....	78
Figura 4.23. Función inferencia tipo max-min (implicación de Mamdani) .....	78
Figura 4.24. Función inferencia tipo max-prod (implicación de Mamdani) .....	78
Figura 4.25. Función MOM en FuzzyCLIPS .....	79

## **Capítulo 5. Método AHP Fuzzy**

---

Figura 5.1. Elementos de complejidad en los procesos de decisión	
Multicriterio [23] .....	84
Figura 5.2. Función de pertenencia de un número difuso triangular .....	85
Tabla 5.1. Definición de un número difuso triangular de forma analítica .....	86
Figura 5.3. Escala de Saaty expresada como conjuntos difusos .....	86
Tabla 5.2. Escala de Saaty usando números difusos .....	87
Figura 5.4. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP .....	88
Tabla 5.3. Escala de Comparación de Saaty usando números difuso .....	88
Figura 5.5. Jerarquía AHP para nuestro ejemplo, con conjuntos difusos .....	91
Tabla 5.4. Matriz comparación entre criterios. Escala de Saaty con números triangulares .....	91
Tabla 5.5. Matriz comparación con respecto a los atributos (alternativas) ...	93
Tabla 5.6. Obtención del vector final para la clasificación .....	94
Tabla 5.7. Clasificación final .....	94

## **Capítulo 6. Método Topsis Fuzzy**

---

Figura 6.1. Representación de $S_L(A_i)$ , $S_M(A_i)$ y $S_R(A_i)$ .....	103
Tabla 6.1. Valores numéricos asociados a las etiquetas de bondad .....	105
Tabla 6.2. Pesos normalizados de la importancia de los criterios .....	105
Tabla 6.3. Información lingüística del problema de decisión .....	106
Tabla 6.4. Matriz de decisión .....	106
Tabla 6.5. Matriz Normalizada .....	106
Tabla 6.6. Matriz ponderada normalizada .....	107
Tabla 6.7. Solución ideal positiva y negativa .....	107

Tabla 6.8. Valores de las distancias a las alternativas ideal y anti-ideal .....	107
Tabla 6.9. Coeficientes de proximidad .....	107
Tabla 6.10. Alternativas y salidas lingüísticas .....	108

## **Capítulo 7. Aspectos Medioambientales y Sociales**

---

Figura 7.1. Fuente NOAA, gráfico original de <a href="http://www.nasa.gov">www.nasa.gov</a> .....	117
Figura 7.2. Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> -eq edición 1990-2008 .....	118
Figura 7.3. Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> en España (2005-2009)[43] ...	118
Figura 7.4. Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> en la UE [46] .....	119
Tabla 7.1. Variación 2009-2010 en porcentaje % .....	119
Figura 7.5.a. Ciclo de Vida de la Generación Eléctrica .....	125
Figura 7.5.b. Metodología del ACV .....	126
Figura 7.6. Fases de un análisis de ciclo de vida .....	126
Tabla 7.2.a. Ecopuntos asignados a diversas tecnologías de generación eléctrica .....	128
Tabla 7.2.b. Ecopuntos asignados a diversas tecnologías de generación eléctrica .....	128
Tabla 7.3. Distribución de empleados directos por subsectores de actividad ...	131
Tabla 7.4. Distribución del empleo indirecto generado por subsectores de Actividad .....	132
Tabla 7.5. Distribución de los empleados directos por actividades .....	132
Tabla 7.6. Previsiones de empleo directo por tecnologías: 2015 .....	133
Tabla 7.7. Previsiones de empleo indirecto por tecnologías: 2015 .....	133
Tabla 7.8. Previsiones de empleo directo por tecnologías: 2020 .....	134
Tabla 7.9. Previsiones de empleo indirecto por tecnologías: 2020 .....	134

## **Capítulo 8. Aspectos Económicos y Tecnológicos**

---

Figura 8.1.a. Generación de Electricidad en el Sist. Español en 2011 .....	159
Figura 8.1.b. Generación de Electricidad en el Sist. Español en 2011 .....	160
Figura 8.2.a. Balance Eléctrico Peninsular del mes de Febrero 2012 .....	161
Figura 8.2.b. Balance Eléctrico Peninsular del mes de Febrero 2012 .....	161
Tabla 8.1. ....	163

Figura 8.3. ....	163
Tabla 8.2. Estudio Estratégico Ambiental del Litoral (abril 2009) .....	164
Figura 8.4. Periodo 2011-2020. Previsiones de incremento anual .....	164
Figura 8.5. Situación en 2010 .....	165
Figura 8.6. Evolución 2011-2020 .....	166
Figura 8.7. Situación 2010 .....	167
Figura 8.8. Evolución 2011-2020 .....	167
Tabla 8.3. ....	168
Figura 8.9. Evolución: Costes de generación .....	168
Figura 8.10. Sistema de Micro-cogeneración [64] .....	169
Tabla 8.4. Valores de referencia para la producción separada de calor .....	173
Tabla 8.5. Valores básicos de referencia para la generación eléctrica separada...	177
Tabla 8.6. Factores de corrección por nivel de tensión .....	178
Tabla 8.7. Valores por defecto de los consumos propios en función del tipo de ciclo empleado, expresados en función de la electricidad producida .....	178
Tabla 8.8. kWh de frio por compresión o absorción por MWh de energía eléctrica y térmica .....	180

## **Capítulo 9. Respuesta a los Subcriterios**

---

Tabla 9.1. Alternativas, Criterios y Subcriterio, de nuestro caso de estudio ...	186
Figura 9.1. Modelo para la toma de decisiones. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas .....	187
Tabla 9.2 Datos recopilados por Carlos Baldasquín Cáceres [71] .....	188
Tabla 9.3. Factores de Emisión de CO <sub>2</sub> por las diferentes tecnologías [72] ....	189
Tabla 9.4. Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kWh) [71] .....	190
Tabla 9.5. Factores de Emisión de CO <sub>2</sub> por las diferentes fuentes de energía [72] .....	190
Tabla 9.6. Emisiones de CO <sub>2</sub> en la producción de módulos [71] .....	191
Figura 9.2. Ciclo neutro en las emisiones de CO <sub>2</sub> de la biomasa .....	192
Tabla 9.7. Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) [71] .....	193

Tabla 9.8. Prejuicios (notas de 0 a 10 en aceptación) [71] .....	194
Tabla 9.9. Ruido a 300-350 metros de distancia (dB) [71] .....	194
Figura 9.3. Nivel de sonoro en función de la distancia .....	194
Tabla 9.10. Ruido a 1 metro de distancia (dB) [71] .....	195
Tabla 9.11. Empleo generado directo e indirecto para la instalación de 4 MW [71] .....	195
Tabla 9.12. Media de edad de las empresas (años) [71] .....	196
Tabla 9.13. Puntuación del grado de madurez [71] .....	196
Tabla 9.14. Proveedores murcianos [71] .....	197
Tabla 9.15. Proveedores cerca [71] .....	197
Tabla 9.16. Rendimiento de las instalaciones (%) [71] .....	197
Tabla 9.17. Disponibilidad de los recursos (%) [71] .....	198
Tabla 9.18. ....	198
Figura 9.4. Evolución del VAN [72] .....	201
Tabla 9.19. Inversión inicial (Millones de euros) [71] .....	202
Tabla 9.20. Coste de la materia prima (€/MWh) .....	202
Tabla 9.21. Tarifas del gas natural a 28 de abril de 2012 [74] .....	203
Tabla 9.22. Tarifas de alquiler de los contadores de gas [75] .....	204
Tabla 9.23. Periodos de retorno de las inversiones en años [71] .....	205
Figura 9.5. Periodo de amortización de la fotovoltaica según el grado de subvención .....	206
Tabla 9.24. Tarifas reguladas por Tecnología .....	207
Tabla 9.25. Tarifas y primas para cogeneración [77] .....	207
Tabla 9.26. Tarifas y primas para el 2º trimestre de 2012. [78] .....	208
Tabla 9.27. Tarifas y primas para energía renovables [79] .....	209
Tabla 9.28. Costes durante el periodo de explotación [71] .....	212
Figura 9.6. Costes de explotación de las energías del régimen especial [71] ...	213

Tabla 9.29. Datos de referencia actualizados .....	214
Tabla 9.30. Datos de referencia normalizados .....	217

## Capítulo 10. Aplicación de los Métodos de Decisión Multicriterio

---

Figura 10.1. Modelo para la toma de decisiones. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas .....	223
Tabla 10.1. Valoración de las alternativas respecto a los subcriterios .....	224
Tabla 10.2. Datos de referencia normalizados .....	225
Tabla 10.3. Propuestas de escala de asignación directa .....	226
Tabla 10.4. Escala fundamental de Saaty, comparación pareada [9] .....	226
Tabla 10.5. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO <sub>2</sub> , a Minimizar .....	227
Tabla 10.6. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar .....	228
Tabla 10.7. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar .....	228
Tabla 10.8. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar .....	228
Tabla 10.9. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar .....	229
Tabla 10.10. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar .....	229
Tabla 10.11. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar .....	229
Tabla 10.12. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar .....	230
Tabla 10.13. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar.....	230

Tabla 10.14. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar .....	230
Tabla 10.15. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar .....	231
Tabla 10.16. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar.....	231
Tabla 10.17. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar .....	231
Tabla 10.18. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar .....	232
Tabla 10.19. Ratios de consistencia de cada criterio .....	232
Tabla 10.20. Pesos de los criterios y subcriterios .....	233
Tabla 10.21. Clasificación de las alternativas .....	233
Figura 10.2. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP .....	234
Tabla 10.22. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones .....	235
Tabla 10.23. Pesos de los subcriterios .....	236
Tabla 10.24. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO <sub>2</sub> , a Minimizar .....	236
Tabla 10.25. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar .....	237
Tabla 10.26. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar.....	237
Tabla 10.27. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar.	237
Tabla 10.28. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar .....	238
Tabla 10.29. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar .....	238
Tabla 10.30. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar .....	238

Tabla 10.31. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a	
Maximizar .....	238
Tabla 10.32. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a	
Maximizar.....	239
Tabla 10.33. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a	
Minimizar .....	239
Tabla 10.34. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a	
Minimizar .....	239
Tabla 10.35. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a	
Minimizar .....	240
Tabla 10.36. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a	
Maximizar .....	240
Tabla 10.37. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a	
Minimizar .....	240
Tabla 10.38. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO <sub>2</sub> , a	
Minimizar .....	240
Tabla 10.39. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a	
Minimizar .....	241
Tabla 10.40. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a	
Maximizar.....	241
Tabla 10.41. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar..	241
Tabla 10.42. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a	
Maximizar .....	242
Tabla 10.43. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a	
Maximizar.....	242
Tabla 10.44. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a	
Maximizar .....	242
Tabla 10.45. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a	
Maximizar.....	242

Tabla 10.46. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a	
Maximizar .....	243
Tabla 10.47. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a	
Minimizar .....	243
Tabla 10.48. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a	
Minimizar .....	243
Tabla 10.49. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a	
Minimizar .....	244
Tabla 10.50. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a	
Maximizar .....	244
Tabla 10.51. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar.	244
Tabla 10.52. Prioridades locales de las comparaciones binarias de las alternativas,	
“ $r_{ij}$ ” .....	245
Tabla 10.53. Ratios de consistencia de cada criterio .....	245
Tabla 10.54. Prioridades locales, vector final para la clasificación (continua)	
Tabla 10.55. Prioridades locales, vector final para la clasificación	
(continuación).....	246
Tabla 10.56. Clasificación de alternativas .....	247
Tabla 10.57. Matriz de decisión normalizada .....	249
Tabla 10.58. Matriz de decisión normalizada ponderada .....	250
Tabla 10.59. PIS y NIS .....	250
Tabla 10.60. Medida de distancia a la PIS .....	251
Tabla 10.61. Medida de distancia a la NIS .....	252
Tabla 10.62. Proximidad relativa de las alternativas .....	252
Tabla 10.63. Valores numéricos asociados a las etiquetas lingüísticas de 9 conjuntos	
difusos .....	254
Tabla 10.64. Pesos normalizados de la importancia de los criterios .....	255
Tabla 10.65. Valoración de las alternativas respecto a los subcriterios, normalizados	
para conjuntos difusos .....	256
Tabla 10.66. Información lingüística del problema de decisión .....	257

Tabla 10.67. Matriz de decisión, etiquetado fuzzy (continua)	
Tabla 10.68. Matriz de decisión, etiquetado fuzzy (continuación) .....	258
Tabla 10.69. Matriz de decisión normalizada, etiquetado fuzzy (continua)	
Tabla 10.70. Matriz de decisión normalizada, etiquetado fuzzy (continuación) ...	259
Tabla 10.71. Matriz ponderada normalizada fuzzy (continua)	
Tabla 10.72. Matriz ponderada normalizada fuzzy (continuación) .....	260
Tabla 10.73. Solución ideal positiva y negativa (continua)	
Tabla 10.74. Solución ideal positiva y negativa (continuación) .....	261
Tabla 10.75. Valores de las distancias a las alternativas ideal y anti-ideal .....	261
Tabla 10.76. Coeficientes de proximidad .....	262
Tabla 10.77. Alternativas y salidas lingüísticas .....	263

## **Capítulo 11. Código y Conclusiones**

---

Tabla 11.1. Prioridades entre los criterios .....	270
Tabla 11.2. Comparación de resultados de estudios anteriores con el presente estudio .....	274

# Capítulo 1. Introducción al proyecto.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

## 1. Introducción.

Este proyecto surge de la idea de explorar el uso de los métodos de decisión multicriterio (MCDM- “multicriterio decision-making”) en el campo energético, para ayudarnos en la elección de la técnica de generación eléctrica más adecuada en una zona específica de la Región de Murcia. En estas primeras páginas se realiza una introducción al trabajo desarrollado, presentando en primer lugar el origen y la motivación para llevarlo a cabo; seguidamente, se plantean los objetivos que se desean alcanzar, y a continuación se describe cómo se estructurará todo el documento.

### 1.1. Antecedentes y motivación

El presente proyecto parte del excelente trabajo realizado por mis compañeros Mario Bastida Dólera y Carlos Baldasquín Cáceres. Dicho proyecto consistía en la aplicación del método “Analytic Hierarchy Process” (AHP) y el método Topsis “Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution”, para apoyarse en la toma de decisión, de la forma más objetiva y fiable posible, en la elección de la técnica de generación eléctrica distribuida a construir para alimentar unas franjas concretas de la zona norte de la Región de Murcia. Gracias a estas herramientas le permitieron contar con una mejor visualización de los factores que intervienen en los procesos, así como de las preferencias existentes.

El objetivo principal de este proyecto, será dar un paso más en relación al excelente trabajo realizado por mis compañeros, profundizando en cada uno de los métodos indicados al comienzo del proyecto. Partiremos de los datos recogidos en proyectos anteriores (tabla 1.1.), que previamente han sido actualizados, para el desarrollo de los métodos citados, centrando nuestra mayor atención en el método AHP fuzzy (es el método AHP, modificado en el contexto de los conjuntos difusos) y el método Topsis fuzzy.

Alternativas		Eólica	Solar	Solar	Micro-	Micro-	Biomasa	Mini-
Criterios		A <sub>1</sub>	Fotovoltaica	Termoeléctrica	Cogeneración	Trigeneración	A <sub>6</sub>	Hidráulica
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	24	138,5	29	257,41	257,41	35,8	11,93
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	350000	100.000	137.500	25	51	14.660	2·10 <sup>6</sup>
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	8,3	7,8	8,6	6,8	6,9	7,7	7,7
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	108,1	31,2	53	33,2	42	67,5	103
	Empleo generado C <sub>23</sub>	6	14	16	24	24	56	6
	Madurez C <sub>31</sub>	9,2	8,9	6,4	9,8	8,3	7,7	9

Tecnología C <sub>3</sub>	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	17	90	22	11	9	15	6
	Rendimiento C <sub>33</sub>	50	13	19	90	76	26	85
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	15,98	32,84	49,49	95,50	95,50	85,62	12,23
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	5,14	16	21,6	3,33	4	6	6,5
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	46,9552	46,9552	17,3770	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	8,36	10,29	11,08	4,42	5,11	9,46	4,16
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	7,9084	45,0886	29,0916	9,4341	9,4341	12,6897	8,4237
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	6,81	30	23,23	5,05	5,55	13,7	7,3

*Tabla 1.1.a Datos recopilados por Carlos Baldasquín Cáceres [2]*

Alternativas		Eólica A <sub>1</sub>	Solar Fotovoltaica A <sub>2</sub>	Solar Termoeléctrica A <sub>3</sub>	Micro- Cogeneración A <sub>4</sub>	Micro- Trigeneración A <sub>5</sub>	Biomasa A <sub>6</sub>	Mini- Hidráulica A <sub>7</sub>
Criterios								
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	24	138,5	29	257,41	257,41	35,8	11,93
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	350000	100.000	137.500	25	51	14.660	2·10 <sup>6</sup>
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	8,3	7,8	8,6	6,8	6,9	7,7	7,7
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	108,1	31,2	53	33,2	42	67,5	103
	Empleo generado C <sub>23</sub>	6	14	16	24	24	56	6
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	9,2	8,9	6,4	9,8	8,3	7,7	9
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	17	90	22	11	9	15	6
	Rendimiento C <sub>33</sub>	50	13	19	90	76	26	85
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	15,98	32,84	49,49	95,50	95,50	85,62	12,23
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	5,14	16	21,6	3,33	4	6	6,5
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	49,9125	49,9125	17,3770	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	8,36	10,29	11,08	4,42	5,11	9,46	4,16
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	8,1270	46,3348	29,8957	11,0864	11,0864	13,0404	8,6565
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	6,81	30	23,23	5,05	5,55	13,7	7,3

*Tabla 1.1.b Datos actualizados*

Como podemos observar en la tabla 1.1.b, hay datos que han sufrido variación en el tiempo, sobre todo el criterio económico.

La tabla 1.1.b, ha sido fruto de meses de investigación, donde se han ido comprobando de manera exhaustiva los datos recogidos de compañeros de estudios anteriores, para comprobar su validez actual. Como podemos ver en esta tabla con respecto a la tabla 1.1, que nos sirvió de referencia para esta investigación, muchos de los subcriterios no se vieron modificados en el tiempo transcurrido desde el estudio de Carlos Baldasquín a este presente estudio. Donde su modificación en subcriterios fue nula o tan pequeña que se consideraron los datos obtenidos de los estudios anteriores.

La motivación de continuar con dicho estudio recae en la gran importancia de verificar la eficacia de dichos métodos de decisión y estudiar la posible influencia que tendría modelos con números fuzzy con respecto a los métodos clásicos. Utilizando las alternativas que consideramos más adecuadas en el contexto local y global en el que se encontraría la mini-central. Las tecnologías posibles serán evaluadas en base a idénticos atributos o criterios que se utilizaron en el proyecto precedente. Gracias a esto se verificará el grado de similitud entre estas herramientas y, si finalmente la solución alcanzada por todos los métodos resulta ser la misma, obtendremos mayor fiabilidad y argumentos para adoptar dicha decisión

Como ocurre en cualquier actividad realizada por el hombre, esta decisión está sujeta a posibles errores humanos, como es la mala asignación de pesos respecto a la importancia de los criterios, no incluir factores que puedan ser relevantes, la no previsión de agentes cambiantes con el tiempo, etc. En cualquier caso, esta forma de trabajar ayuda a realizar los juicios de valor, a subdividir el trabajo decisorio, tener una visión más global del problema y a eliminar riesgos.

## 1.2. Objeto del proyecto

En nuestra sociedad la política energética está cobrando cada vez más y más importancia. España tiene un déficit de estructura energética muy grande, y eso va en detrimento de la ciudadanía. Cada vez más se les exige a los gobernantes que se preocupen más por este asunto y pongan medidas que ayuden a paliar el problema. Tenemos varios ejemplos: las subidas del recibo de la luz, la compra de energía eléctrica a Francia, el fracaso de las energías renovables...

- **El déficit tarifario:** Desemboca en los incrementos que cada seis meses se introducen en los recibos de la luz (excepto en el bono social) y se justifica por varias causas. Una de ellas es cuando a finales de los años noventa el Gobierno decidió congelar a los usuarios estas subidas y que fuera el propio Estado quien pagara a las empresas generadoras y distribuidas de energía eléctrica la diferencia. En el año 2010 llegó un momento en el que esto era insostenible, y por eso en enero de 2011 tuvo lugar el incremento más notable de los últimos años del 10 %.
- **La compra energía eléctrica a Francia:** En España no hay demasiadas infraestructuras apropiadas para la energía eléctrica suficiente como para

autoabastecemos, y por eso se importa. Además, no hay que olvidar que el gas natural que consumimos, tanto a nivel doméstico como a nivel industrial en plantas de cogeneración y demás, también es importado desde Argelia.

- **La inconsistencia de la política respecto a las energías renovables:** Las energías renovables tienen importantes ventajas, tanto tecnológicas como medioambientales, pero su rentabilidad económica es bastante discutible hoy en día. La prueba de ello es que principalmente han subsistido gracias a las ayudas económicas que les daba el Gobierno, en algunos casos desproporcionados (energía solar). Esto ha repercutido en pérdidas de puestos de trabajo, promotores arruinados y menos energía eléctrica generada.

Por otra parte en los países desarrollados está implantándose la conocida como Generación Distribuida (GD), un nuevo modelo de generación y distribución de energía eléctrica que es más eficiente y respetuoso con el medio ambiente, y también más rentable económicamente que el sistema clásico (Generación Centralizada).

La tendencia actual en los países más avanzados, entre ellos España, es dirigirnos hacia la generación distribuida (GD) de energía eléctrica, frente a la clásica generación centralizada. Hay una gran diversidad de tecnologías de generación a pequeña escala (potencias menores de 10 MW), entre ellas están las renovables o la micro-cogeneración y micro-trigeneración, que son sistemas de alta eficiencia energética basadas en la producción simultánea de electricidad y energía térmica.

Las ventajas con las que nos encontramos son múltiples, entre ellas, menores pérdidas por transporte y distribución de electricidad, incremento o menores emisiones contaminantes.

Tras este breve análisis, encontramos motivos más que suficientes para plantearnos el diseñar una instalación para abastecer la zona norte de la ciudad de Murcia, concretamente los centros comerciales “Thader” y “Nueva Condomina”, el estadio de fútbol “Nueva Condomina” y parte del vecindario de Molina de Segura y algunas pedanías cercanas. Concretamente estaría ubicado en algún lugar de la figura 1.1. Este proyecto se centra en seleccionar qué tipo de central diseñar, teniendo en cuenta diversos factores medioambientales, económicos, sociales y económicos.



*Figura 1.1. Localización de la hipotética mini central eléctrica.*

Para llevar a cabo la decisión, nos ayudaremos de los denominados “Métodos de Decisión Multicriterio” (Multicriteria Decision Making en inglés, MCDM). Consisten en algoritmos matemáticos mediante los cuales, en base a unos datos de entrada, en forma de alternativas y criterios, devuelven el orden de prioridad de cada una de las alternativas.

### **1.3. Estructura del proyecto**

En los siguientes capítulos, desarrollaremos cada uno de los métodos que vamos a utilizar en este proyecto, explicando el algoritmo matemático.

En el **capítulo 2**, se tratará de definir ciertos conceptos que hay que tener en mente para el entendimiento de los métodos multicriterio que en este proyecto se van a plantear, como herramienta de trabajo. Explicando conceptos básicos sobre decisión, para encauzar al lector en el lenguaje de los métodos multicriterio.

En el **Capítulo 3**, se tratará el método AHP (proceso de análisis jerárquico). El propósito del AHP es permitir que el decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, dándole la forma de una jerarquía de atributos, la cual contendría mínimamente tres niveles: el propósito u objetivo global del problema, ubicado en la parte superior, los varios criterios que definen las alternativas en el medio, y las alternativas concurrentes en la parte inferior del diagrama. En la medida que los criterios sean muy abstractos, tal como bienestar humano, o capacidad, por ejemplo, pueden incluirse sub-criterios más operativos en forma secuencial entre el nivel de los criterios y el de las alternativas, lo que da origen entonces a una jerarquía multinivel [1]. También se presentará en este capítulo, el método Topsis, dando una breve explicación de la aplicación de los métodos clásicos, y así comprenderemos mejor, la aplicación de los métodos AHP y Topsis con lógica difusa, que se tratarán en posteriores capítulos.

En el **Capítulo 4**, se presenta conceptos de la lógica Fuzzy, donde se presentan ejemplos sencillos, para poder entender su funcionamiento de una manera fácil,

presentando las variables lingüísticas, las funciones de pertenencia, los etiquetados lingüísticos y las operaciones elementales con los conjuntos difusos. Ya que todo ello, lo aplicaremos en posteriores capítulos.

En el **Capítulo 5**, se presenta en método AHP difuso, con la integración de los conjuntos difusos. Se presenta la metodología de cálculo, y para su fácil entendimiento, le acompaña un sencillo ejemplo de aplicación, al final del capítulo. Utilizando la lógica difusa, acompañado de las conclusiones del método aplicado.

En el **Capítulo 6**, se trata el método Topsis o método de programación por compromiso. El método es una técnica de programación matemática utilizada originalmente en contextos continuos y que ha sido modificada para el análisis de problemas multicriterio de tipo discretos. Es utilizada para identificar soluciones que se encuentran lo más cerca posible a una solución ideal aplicando para ello alguna medida de distancia. Las soluciones así identificadas se denominan soluciones compromiso y constituyen el conjunto de compromiso. Esta técnica está basada en el concepto que una alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal positiva y estar lo más lejos posible respecto de la solución ideal negativa [1]. Donde se presentan los conjuntos difusos y el método de aplicación, junto con un sencillo ejemplo para su comprensión.

En el **Capítulo 7**, se trata los Aspectos Medioambientales y Sociales, dándole respuesta a los subcriterios que planteamos, como estudio en nuestro proyecto. En este capítulo se expone la situación actual de la Calidad Medioambiental y los Aspectos Sociales sobre las Energías Renovables, así como la situación de la Región de Murcia en estos aspectos. También se trata, el déficit tarifario, así como la desaparición de las primas adjudicadas al régimen especial, donde en el capítulo siguiente, se trata en profundidad el Real Decreto actual sobre este tema.

En el **Capítulo 8**, se trata los Aspectos Económicos y Tecnológicos, dándole respuesta a los subcriterios que planteamos para estos criterios. En este capítulo, nos centramos en el gran cambio legislativo sufrido acerca del sector eléctrico, centrándonos en la generación de energía eléctrica, que es nuestro objetivo de estudio, para entender la situación actual que hay en el sector. Exponiendo una serie de Real decreto, junto con la opinión de las energías renovables en la actualidad frente a todos estos cambios sufridos en este año.

Trataremos cada una de las Tecnologías, exponiendo datos actuales de generación eléctrica, que entran en estudio, pero en este momento, los cambios son tan recientes, que hasta que no trascurren unos años, no podremos observar las repercusiones sufridas en el sector, a causa de estos recortes establecidos.

En el **Capítulo 9**, se trata de darle respuesta a todos los subcriterios, con toda la información recogida en los capítulos anteriores. Con la utilización de los datos recogidos por Carlos Baldaquín [2], como referencia de estudio, y actualizando aquellos que han sufrido variación en el tiempo, que sobre todo son los datos referentes al criterio económico, por la variación sufrida en el sector eléctrico en el último semestre.

En el **Capítulo 10**, es donde aplicaremos los Métodos de Decisión Multicriterio; el AHP difuso y el Topsis difuso, con los datos actualizados, que Carlos Baldasquín recogió en su Pfc, que nos servirá de referencia para llevar a cabo este estudio. Y en la implementación de estos métodos, se harán a partir de conjuntos difusos, donde se analizarán los datos obtenidos, para llegar a la conclusión final del estudio.

## **1.4. Referencias**

### **1.4.1. Figuras y Tablas**

Figura 1.1. Localización de la hipotética mini central eléctrica. Fuente: Google Maps. España. <http://maps.google.es/maps?hl=es&tab=wl>

Tabla 1.1.a Datos recopilados por Carlos Baldasquín Cáceres [2]

Tabla 1.1.b Datos actualizados

### **1.4.2. Texto**

[1]. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maurtua\\_od/cap2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maurtua_od/cap2.pdf)

[2] “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica: Aplicando a Métodos de Relaciones de Superación”. PFC. Carlos Baldasquín Cáceres. PFC. Director Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. Ingeniería Eléctrica.

# Capítulo 2. Métodos de Decisión Multicriterio (conceptos)

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## **CAPÍTULO 2: METODOS DE DECISION MULTICRITERIO (CONCEPTOS)**

### **2.1. Introducción**

La explotación de las energías renovables (EERR) ha ganado mucho interés en los últimos años. Una preocupación creciente en los temas medioambientales, debido al incremento en los efectos negativos de los combustibles fósiles, lo precario de la dependencia de las importaciones de éstos y la llegada de las EERR ha hecho que muchos países, especialmente los desarrollados, usen las EERR. Éstas son respetuosas con el medio ambiente y capaces de remplazar fuentes de energía convencionales por una variedad de aplicaciones a precios competitivos.

La selección de varios proyectos de inversiones energéticas es una tarea laboriosa. Muchos factores que afecta al éxito de un proyecto de EERR deben ser analizados y tenidos en cuenta. La toma de decisiones debe tener en consideración varios objetivos conflictivos debido a los factores medioambientales, sociales, económicos y tecnológicos tan complejos que están presentes. Diferentes grupos de expertos en tomar decisiones se ven envueltos en el proceso, cada uno de ellos aportando diferentes criterios y puntos de vista, los cuales deben ser resueltos dentro de un marco de trabajo de comprensión y compromiso mutuo.

La clásica toma de decisiones con un solo criterio ya no es capaz de meter mano a estos problemas. La política para la sustitución de la energía aportada por los combustibles fósiles por EERR debe ser dirigida en un contexto multicriterio. La complejidad de la planificación energética y los proyectos de energía hacen el análisis multicriterio una herramienta útil en el proceso de toma de decisiones.

Pues bien, en este segundo capítulo hablamos de algunos de los procedimientos más utilizados, los discutimos y finalmente elegimos uno para llevar a cabo nuestro proyecto.

### **2.2. Técnicas de decisión**

La toma de decisiones resulta un proceso habitual en la vida cotidiana del ser humano. En multitud de 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, y el ámbito laboral no es una excepción. Los ejecutivos de las empresas y organizaciones, los responsables políticos, los directores de proyectos y en general los profesionales han de adoptar decisiones difíciles durante el transcurso de sus actividades.

Estas decisiones difíciles se caracterizan por:

- Observar intereses contrapuestos.
- Tener elementos de incertidumbre.
- Envolver distintas personas en la decisión.

- Poseer elementos fácilmente valorables y elementos difícilmente valorables.

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, al menos dos, y un conflicto tal que es necesario elegir una de las alternativas, o bien establecer en ese conjunto unas preferencias. Tomar una decisión es una situación que genera tensión psicológica a la mayoría de las personas que asumen esta responsabilidad. Esta tensión proviene de dos fuentes: la primera es la preocupación del decisor por las consecuencias materiales y sociales que se derivan de cualquier curso de acción que se haya elegido; la segunda fuente es el riesgo que se corre de perder el prestigio y la autoestima del decisor.

A menudo se entiende que una buena decisión se da cuando, transcurrido el tiempo, las consecuencias se han mostrado favorables. Sin embargo, la mayor parte de las veces no se pueden comparar las consecuencias de una decisión adoptada con las que hubiera ocurrido si se hubiera adoptado una 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 ese 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. Una buena decisión 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.

En proyectos de ingeniería la toma de decisiones es una actividad intelectual esencial, sin la cual el proyecto no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; complejidad que viene marcada por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, por las responsabilidades que ello implica para los proyectistas o directores de proyecto, por los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que a menudo están en conflicto.

Se citan a continuación las diferentes razones que justifican la atención especial que se debe prestar a la toma de decisiones en proyectos:

- El incremento de la magnitud de los problemas de decisión como consecuencia del tamaño y complejidad de los proyectos que se desarrollan en la actualidad.
- La necesidad que tienen las empresas de tomar buenas decisiones o tomar la mejor de las decisiones posibles, en un entorno económico cada vez más competitivo, para obtener mejores resultados.
- La limitación de los seres humanos a la hora de enfrentarse a problemas complejos

de toma de decisiones. Ello es debido a la limitada capacidad de mejora de atención, a la tendencia a cambiar las metas y los valores y a ser selectivos en la adquisición y procesamiento de información.

- El aumento de la responsabilidad de los proyectistas debido a que cada vez la legislación exige mayor seguridad y calidad en los productos, instalaciones y obras de ingeniería, y por tanto, mayor rigor en los documentos del proyecto y en la dirección de su ejecución.

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 Decisión Multicriterio (en inglés Multi-criteria Decisión 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.

En los apartados siguientes se van a exponer los conceptos básicos del Análisis de Decisión Multicriterio y se van a presentar algunos de los métodos más conocidos que pueden ser de gran ayuda para el director de proyectos en la difícil tarea de tomar decisiones. Con estas técnicas no se pretende sustituir al decisor en el proceso de toma de decisiones, sino que éste, de forma ordenada, sea capaz de determinar sus preferencias mediante una metodología que le aportará información y transparencia.

### **2.3. Conceptos básicos sobre decisión**

Resulta conveniente en este momento definir los conceptos que se emplean con más frecuencia en relación a la Teoría de Decisión, con el objeto de facilitar la comprensión de apartados posteriores.

#### **2.3.1. Decisor/a o unidad decisora**

Individuo o conjunto de individuos que tienen la responsabilidad de tomar la decisión.

#### **2.3.2. Analista**

Es la figura que modela la situación concreta y que eventualmente hace las recomendaciones relativas a la selección final. El analista no expresa opiniones personales, sino que se limita a reconocer las del decisor y a tratarlas de la manera más objetiva posible. Es frecuente que el decisor intente remplazar al analista por un programa de

ordenador. Sin embargo, la máquina no puede ofrecer más que un modelo predefinido, por lo que todo el peso del analista recae sobre los hombros del decisor: el ordenador es solamente un soporte para la formalización, la memorización y la reflexión.

### 2.3.3. Ambiente o contexto de la situación de decisión

Todo proceso de decisión transcurre en un contexto que se denomina ambiente o entorno. El conjunto de características que definen perfectamente la situación de decisión respecto al entorno se denomina estado del ambiente o de la naturaleza.

### 2.3.4. Criterios: objetivos, atributos y metas

Los criterios de decisión  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ , donde  $C_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) constituyen los puntos de vista o parámetros que se utilizan para manifestar las preferencias del decisor, son elementos de referencia en base a los cuales se realiza la decisión. En la mayor parte de problemas de decisión multicriterio es difícil establecer estos criterios de decisión, no obstante su determinación resulta un paso esencial del proceso. Según Romero, el concepto de criterio engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta:

- Un **objetivo** indica la dirección en la que la unidad decisora debería esforzarse para hacer las cosas mejor. Por ejemplo, minimizar el presupuesto de ejecución de un proyecto.
- Los **atributos** son las características que definen a las alternativas y miden el grado de alcance o cumplimiento de un objetivo. Para cada alternativa se definen unos atributos que permiten definir la consecuencia de la decisión en relación con el sistema de preferencias del decisor. Los atributos siempre dan unos valores del decisor respecto a una realidad objetiva y se pueden expresar mediante una función matemática de variables de decisión, de tal forma que cada alternativa se puede caracterizar mediante un conjunto de medidas relacionadas con los objetivos del decisor. Por ejemplo, el volumen en euros del presupuesto total de ejecución de un proyecto.
- Una **meta** se define como el valor que cuantifica un nivel de logro aceptable que un atributo debe esforzarse por alcanzar. Por ejemplo, que el presupuesto total de ejecución de un proyecto sea inferior a 600.000 euros.

### 2.3.5. Pesos

Los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado a los criterios, se asigna un vector de pesos  $\vec{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , siendo  $n$  el número de criterios.

En los problemas de toma de decisión multicriterio es muy frecuente que los criterios tengan distinta relevancia para el decisor, aunque esto no significa que los criterios menos

importantes no deban ser considerados. Estas diferencias justifican la existencia de los pesos asociados a los criterios.

Existen en la bibliografía diferentes formas de asignación de pesos. Las más habituales son:

- **Método de asignación directa:** Aquel en el que el decisor asigna directamente valores a los pesos. Se pueden asignar de diferentes formas: por ordenación simple, por tasación simple o por comparaciones sucesivas. El método de tasación simple, por ejemplo, consiste en pedir al decisor que dé una valoración de cada peso en una cierta escala (0 a 5, 0 a 10, etc.); una vez obtenidas las valoraciones, éstas se normalizan dividiendo cada valor por la suma de todos ellos.
- **Método del autovector:** En este método los pesos asociados a cada criterio son las componentes del autovector asociado al autovalor dominante de una matriz de comparaciones por pares entre los criterios.

### 2.3.6. Alternativas o decisiones posibles

Se define el conjunto de alternativas como el conjunto finito de soluciones, estrategias, acciones, decisiones, etc., posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere. Constituye el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión. El conjunto de alternativas se designa por  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , donde  $A_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) son cada una de las alternativas posibles.

Se supondrá que este conjunto  $A$  está formado por alternativas diferentes, excluyentes y exhaustivas. Diferentes porque cada alternativa está definida de tal forma que es claramente diferenciable del resto; excluyentes porque la elección de una de ellas imposibilita la elección de cualquier otra; y exhaustivas porque definido el conjunto, éste constituye el universo de decisión. Estos términos se concretan en que se prohíbe que el decisor escoja una solución mixta, es decir, intermedia entre dos alternativas,  $A_i$  y  $A_j$ . También se le prohíbe escoger una alternativa que no pertenezca al conjunto de elección: si el decisor introduce una nueva alternativa es preciso volver a comenzar el análisis con el nuevo conjunto así definido.

### 2.3.7. Matriz de valoración

Una vez establecidos los criterios y sus pesos asociados, se supone que el decisor es capaz de dar, para cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa del conjunto de elección, un valor numérico o simbólico  $x_{ij}$  que expresa una evaluación o juicio de la alternativa  $A_i$  con respecto al criterio  $C_j$ .

Esta evaluación puede ser numérica o lingüística y se puede representar en forma de matriz, denominada matriz de valoración ( $x_{ij}$ ) (Tabla 2.1).

	$w_1$	$w_2$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mn}$

*Tabla 2.1. Matriz de valoración [1]*

Cada fila de la matriz expresa valoraciones de la alternativa  $A_i$  con respecto a los  $n$  criterios considerados. Cada columna de la matriz recoge las evaluaciones o juicios emitidos por el decisor de todas las alternativas respecto al criterio  $C_j$ .

### 2.3.8. Solución eficiente

Un conjunto de soluciones es eficiente cuando está formado por soluciones factibles, tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. A esta solución se le denomina solución Pareto eficiente en honor al economista italiano Pareto.

## 2.4. Clasificación de los problemas de decisión

Atendiendo a algunos de los conceptos definidos en el apartado anterior podemos establecer la siguiente clasificación de los problemas de decisión:

### 2.4.1. Atendiendo a las situaciones de decisiones

- **Programables:** Son problemas de decisión que tienen las siguientes características:
  - Son bien definidos.
  - Son rutinarios.
  - Tienen la información adecuada.
  - Existen muchas reglas para seleccionar las alternativas.
  - Las decisiones se pueden tomar a través de una tabla de decisión.
  
- **No programables:** Son problemas de decisión que tienen las siguientes características:
  - No son bien definidos.
  - No son rutinarios.
  - No se tiene la información adecuada.
  - No tienen tantas reglas para seleccionar alternativas.
  - El criterio usado es de tipo personal, sentido común. Mayormente usado en el proceso de simulación.
  - Tienen una extensa base de datos. En muchos casos se hace tedioso el procesamiento de la información.

- Presencia de altos costes

### 2.4.2. Atendiendo al estado del entorno

- **Decisiones bajo certeza:** Llamados también determinísticos, debido a que son conocidos los estados de la naturaleza, y por tanto, los resultado o consecuencias establecidos para cada alternativa y estado de la naturaleza.
- **Decisiones bajo incertidumbre:** En la cual el decisor se enfrenta a situaciones que nunca han ocurrido y que tal vez no vuelvan a repetirse en el futuro de esta misma forma, no se conocen las probabilidades de ocurrencia de los criterios. No hay información sobre los estados de la naturaleza.
- **Decisiones bajo riesgo:** Son aquellos en los que existe un factor probabilística de ocurrencia ligado a los criterios. Se conocen las probabilidades objetivas o subjetivas de los estados de la naturaleza.

### 2.4.3. Atendiendo a la naturaleza de las alternativas

- **Continuo:** Las alternativas pertenecen a un conjunto infinito no numerable: El valor que representa a la alternativa pertenece a la recta real. Este tipo de decisiones son habituales en el mundo de la ciencia y la técnica, en el que se busca optimizar el valor de un parámetro técnico.
- **Discreto:** El conjunto de alternativas es finito.

### 2.4.4. Atendiendo a las características de la unidad decisor

- **Unipersonal:** Si la unidad incluye una sola entidad, física o jurídica.
- **Grupo:** Si la unidad está formada por más de una entidad. En este caso el decisor es un conjunto de individuos interesados en el proceso de decisión, de tal forma que tienen que adoptar una solución única que refleje globalmente las opciones o intereses del grupo. Este tipo de unidades son cada vez más frecuentes. En la actualidad se extiende cada vez más en el ámbito empresarial la cultura de la multidisciplinaridad, es decir, la formación de equipos de trabajo mediante profesionales de diferentes áreas. Este hecho viene a reforzar la importancia de la consideración de varias entidades den el proceso de toma de decisiones.

Los métodos de decisión multicriterio han sido ampliamente utilizados en los proyectos de EERR en áreas tales como parques eólicos, centrales mini hidráulicas, etc. Los métodos de decisión multiobjetivo han sido usados en la decisión de la mezcla óptima de tecnologías de EERR en varios sectores.

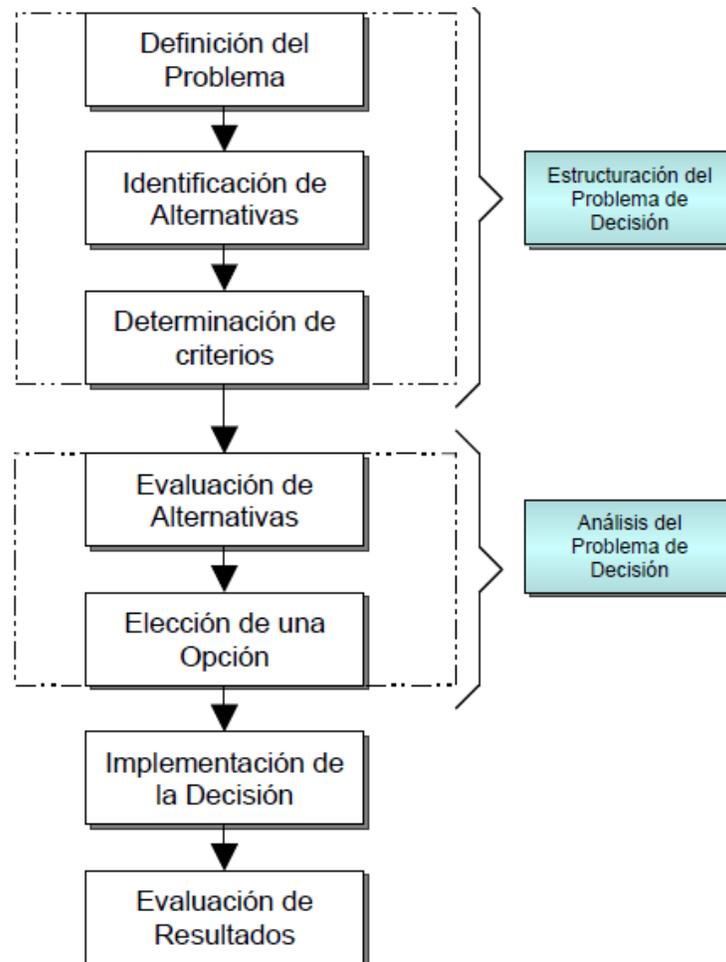
## 2.5. Fases de un proceso de toma de decisión multicriterio

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. El proceso de toma de decisión se divide generalmente en cuatro partes y se plasma en la Figura 2.1.

### 2.5.1. Estructuración del problema de decisión

Es parte del proceso de toma de decisión que comprende los siguientes componentes:

- **Definición del problema:** Es el paso inicial para la toma de decisión; sin un problema bien definido, no hay objetivo definido y no hay una solución veraz.
- **Identificación de alternativas:** Es la detección de la cantidad de opciones que tiene el decisor para efectuar la toma de decisión.
- **Determinación de criterios:** Corresponde a las características más relevantes que los decisores han considerado para luego evaluar en función de ellos qué alternativa resulta más conveniente. Existen dos tipos de criterios: cualitativos y cuantitativos.



*Figura. 2.1. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio [1]*

## 2.5.2. Análisis del problema de decisión

Es la parte del proceso de toma de decisión consecuente con la estructuración del problema de decisión, que comprende los siguientes componentes:

- **Evaluación de alternativas:** Depende del método de evaluación utilizado en cada caso.
- **Elección de una opción o ranking de alternativas:** En función de la evaluación de las alternativas, se obtiene una alternativa con mejor perspectiva que otras.

## 2.5.3. Implementación de la decisión y evaluación de los resultados

Al tener la alternativa más favorable, se procede a su ejecución. Ya estando en ejecución, los resultados que genera la alternativa pasan a ser evaluados.

## 2.6. Principales métodos de decisión multicriterio

Hay diversidad de métodos de decisión multicriterio, que a continuación se nombran;

- El método TOPSIS.
- El Proceso Analítico Jerárquico (AHP).
- Modelo secuencial interactivo para la sostenibilidad urbana (SIMUS).
- Método de ponderación lineal (Scoring).
- Teoría de la Utilidad Multi-Atributo (MAUT).
- ELECTRE.
- PROMETHEE.
- El método MACBETH.
- El método axiomático de Arrow-Raynaud.
- El método VIKOR.

Pero en la realización de este proyecto, nos vamos a centrar en los métodos Topsis y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), con los datos de compañeros de estudios anteriores, basándonos en el proyecto de Mario Bastida para los datos del proceso AHP y en el proyecto de Carlos Baldasquín para los datos del proceso Topsis.

Profundizando en los métodos citados, y centrando la atención de estudio al método AHP difuso y el método Topsis fuzzificado, que desarrollaremos en capítulos posteriores.

## 2.7. Referencias

### 2.7.1. Figuras y Tablas

Figura 2.1. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio [1]

Tabla 2.1. Matriz de valoración [1]

## 2.7.2. Texto

[1] [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maurtua\\_od/cap2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maurtua_od/cap2.pdf)



# Capítulo 3. Métodos clásicos: AHP y Topsis.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## CAPÍTULO 3: METODOS CLASICOS: AHP Y TOPSIS.

### 3.1. Introducción. Método AHP.

Los métodos clásicos resultan ineficientes para problemas de decisión complejos, sobre todo en aquellos casos en los que nos encontramos con criterios de los que solo disponemos de información cualitativa. Por ello resulta más interesante la utilización de métodos híbridos donde se combinen las ventajas que puedan aportar cada uno de dichos métodos.

De este modo planteamos un sistema híbrido de la siguiente manera, ver figura 3.1. Utilizaremos la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obtención del peso de los criterios y el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) para la evaluación de las alternativas [3].

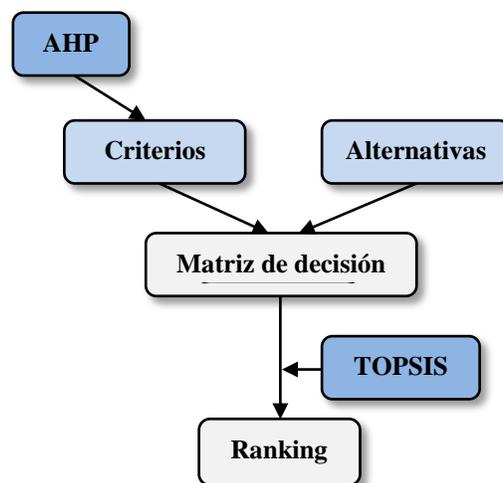


Figura 3.1. Esquema de valoración de alternativas

Este capítulo está dedicado al estudio de los métodos clásicos; el método AHP y el método TOPSIS. En ambos métodos, analizaremos los pasos a seguir en el ámbito del modelado lingüístico difuso en el que trabajamos.

#### 3.1.1. Características principales del método

El Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process, AHP*), propuesto por Saaty en 1980 [4], se basa en la idea de que la complejidad inherente a un problema de toma de decisión con criterios múltiples, se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados. Este método puede considerarse, según la orientación dada al mismo, de muy diversas maneras. Su contribución es importante en niveles operativos, tácticos y estratégicos, sirviendo para mejorar el proceso de decisión debido a la gran información que aporta y a la mejora en el conocimiento del problema. Se puede entender como:

- Una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando en el modelo los aspectos tangibles e intangibles, así como el subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisión.
- Una teoría matemática de la medida generalmente aplicada a la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo.
- Una filosofía para abordar, en general la toma de decisión.

La principal característica del AHP, es que el problema de decisión se modeliza mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema, meta (goal) a alcanzar, y en la base se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se representan los criterios (los cuales a su vez se pueden estructurar también en jerarquías) en base a los cuales se toma la decisión. El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que se plantea, para la cual es indispensable disponer de toda la información necesaria.

La segunda característica del método es que, en cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. Las comparaciones por pares se realizan por medio de ratios de preferencia (si se comparan alternativas) o ratios de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta por el método, que más adelante se presentará. Los pesos o prioridades relativas deben sumar la unidad.

La tercera característica del AHP, es que la información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente. Las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido de que en una matriz de tamaño  $n \times n$  se suelen emitir  $n \cdot (n - 1)/2$  juicios (ya que conocido un término  $a_{ij}$  se obtiene fácilmente el término  $a_{ji}$  por la propiedad de reciprocidad), cuando de hecho solo se necesitaran  $n - 1$  juicios si se utilizase el álgebra (pues si se conoce el término  $a_{ij}$  y el término  $a_{jk}$  es posible conocer, mediante sencillos cálculos, el término  $a_{ik}$ ). Esta diferencia en el número de juicios supone tiempo invertido que se podría haber evitado y puede producir inconsistencias dentro de la matriz. Sin embargo, desde otro punto de vista, esta redundancia resulta útil para mejorar la exactitud de los juicios y se aprovecha para, mediante la técnica matemática, reducir los errores y mejorar la consistencia de la matriz.

Por último, una vez evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel de la jerarquía inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta mediante una agregación de tipo aditivo.

En resumen, según Saaty [5], el método AHP es un modelo de decisión que interpreta los datos y la información directamente mediante la realización de juicios y medidas en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida. Es un método de selección

de alternativas (estrategias, inversiones, etc.) en función de una serie de criterios o variables, las cuales suelen estar en conflicto.

### 3.1.2. Axiomas básicos

Los axiomas básicos en los que se basa la teoría AHP son [6]:

- **Axioma de comparación recíproca:** El decisor debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición recíproca: “Si  $A$  es  $x$  veces preferido que  $B$ , entonces  $B$  es  $1/x$  veces preferido que  $A$ ”.
- **Axioma de homogeneidad:** “Las preferencias se representan por medio de una escala limitada”
- **Axioma de independencia:** “Cuando se expresan preferencias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas”.
- **Axioma de las expectativas:** “Para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa”.

### 3.1.3. Metodología del proceso analítico jerárquico

Las etapas generales de la metodología AHP propuestas por Saaty [5] en su formulación inicial son:

**1ª etapa: Modelización:** En esta etapa se construye un método o estructura jerárquica en la que quedan representados todos los aspectos considerados relevantes en el proceso de resolución; actores, escenarios, factores, elementos e interdependencias. La jerarquía resultante debe ser completa, representativa, no redundante y minimalista. Su construcción es la parte más creativa del proceso de resolución, pudiendo aparecer posiciones enfrentadas entre los distintos participantes.

**2ª etapa: Valorización:** En la segunda etapa se incorporan las preferencias, gustos y deseos de los actores mediante los juicios incluidos en las denominadas matrices de comparación por pares. Estas matrices cuadradas reflejan la dominación relativa de un elemento frente a otro respecto a un atributo o propiedad común. El significado teórico es el siguiente, de los dos elementos comparados, se toma como referencia el que posee en menor medida o grado la característica en estudio y se da un valor numérico de las veces que “el mayor” incluye, recoge, domina o es más preferido que “el menor” respecto al atributo estudiado.

**3ª etapa: Priorización y síntesis:** Esta última etapa proporciona las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema. Se entiende por prioridad una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles. En el problema de decisión se consideran tres tipos de prioridades:

- **Las prioridades locales:** Que son las prioridades de los elementos que cuelgan de un nodo común.
- **Las prioridades globales:** Que son la importancia de esos elementos respecto a la meta global fijada para el problema. La forma de calcular las prioridades globales consiste en aplicar el principio de composición jerárquica, multiplicando los diferentes pesos que aparecen en el recorrido de la jerarquía desde el elemento inferior u hoja hasta la meta.
- **La prioridad final o total:** De una alternativa se obtiene agregando las prioridades globales obtenidas para esa alternativa en los diferentes caminos a que la unen con la meta. El método habitualmente empleado en AHP para la agregación es el equivalente a la suma ponderada.

**4ª etapa: Análisis de sensibilidad,** se suele hacer para examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión al realizar cambios en las prioridades de los criterios principales de un problema. Lo que se lleva a cabo es un cambio en la prioridad de un determinado criterio manteniendo las proporciones de las prioridades de los otros criterios, de manera que todos ellos, incluido el criterio alterado, al modificarse sigan sumando la unidad.

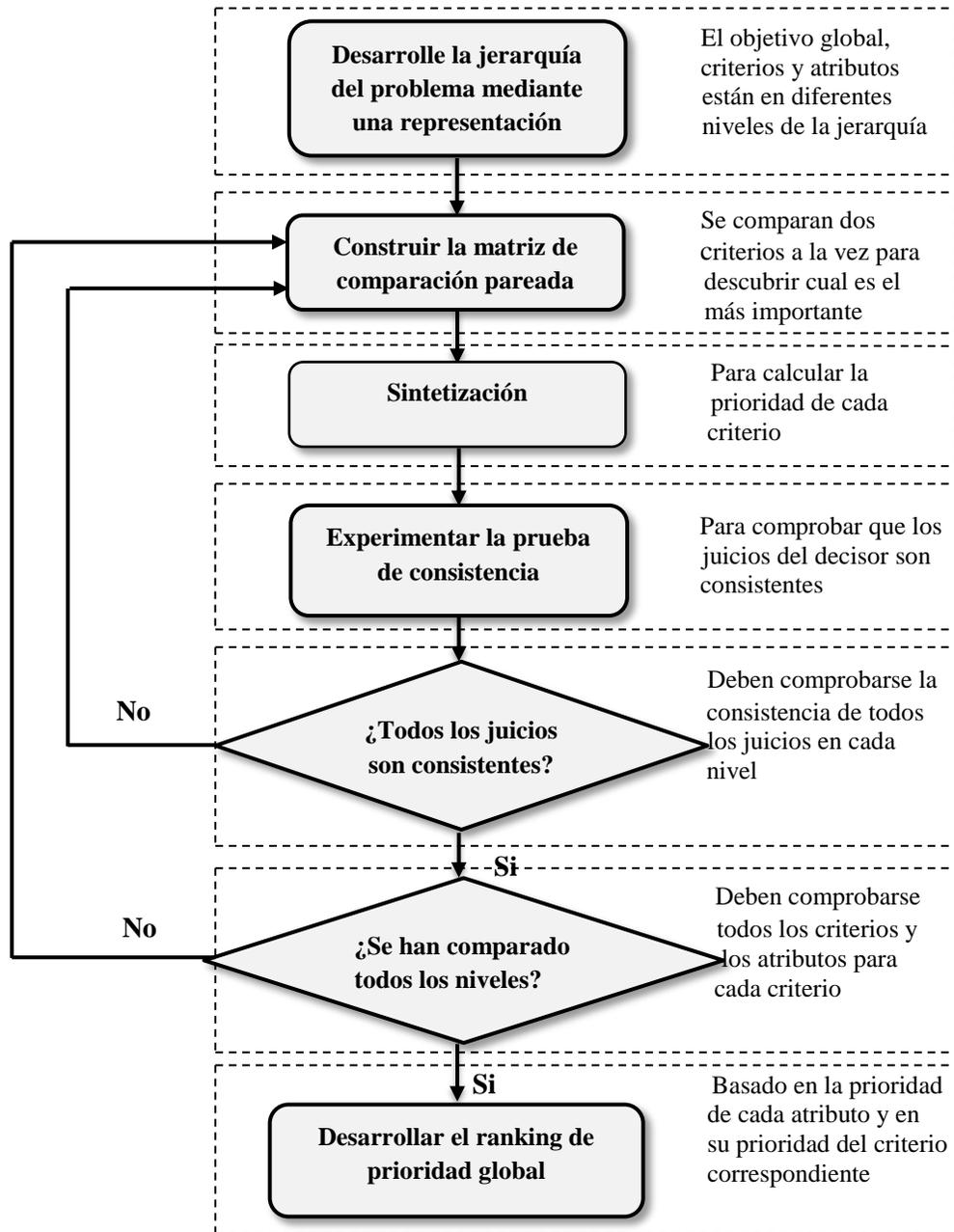


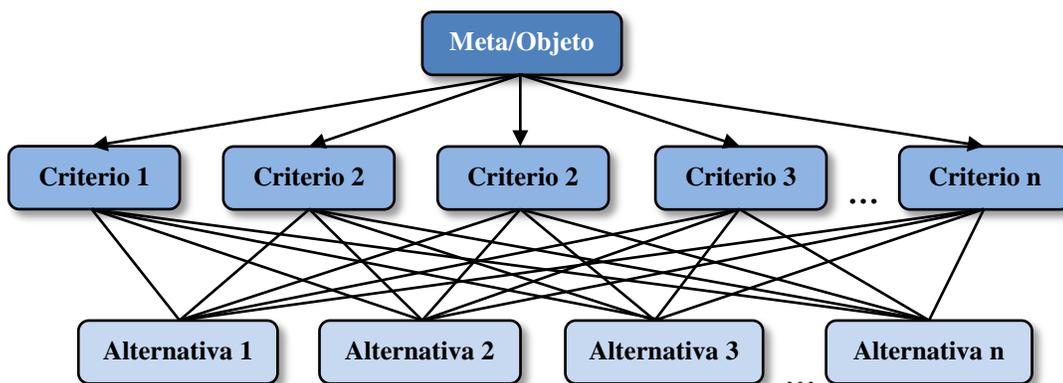
Figura 3.2. Diagrama de flujo del proceso de analítico jerárquico A.H.P. [7]

Estas etapas generales se pueden concretar en una serie de pasos. Los pasos que hay que seguir en el método AHP son los siguientes [5]:

### Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía

El primer paso del método AHP consiste en modelar el problema de decisión que se pretende resolver como una jerarquía. Este hecho es una de las principales características del método, de ahí el término “jerárquico” aparece en su denominación.

La jerarquía adopta, tiene la siguiente forma:



*Figura 3.3. Jerarquía en A.H.P.*

- En el vértice superior de la jerarquía se sitúa la **meta u objetivo** que se pretende alcanzar. El problema de decisión consiste en elegir la alternativa que mejor contribuye a la consecución de la meta del nivel superior de la jerarquía.
- En el siguiente nivel, en orden descendente desde la meta, se sitúan los **criterios**. Como ya se comentó, los criterios de decisión corresponden a aspectos tales como atributos, objetivos o parámetros que constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor justifica, transforma y argumenta sus preferencias. La selección adecuada de los criterios constituye una etapa fundamental en cualquier proceso de toma de decisión, ya que un planteamiento inadecuado de los mismos puede llevar a resultados poco satisfactorios o incluso a invalidar todo el proceso, se deben definir los criterios que son importantes en el problema.

El conjunto de criterios a considerar difiere según sea el agente decisor y el tipo de problema que se analice, por eso no se puede proponer un conjunto de criterios fijo que sirva para cualquier situación. No obstante, si se pueden sugerir algunas recomendaciones para la selección de los criterios.

En primer lugar los criterios deben ser comprensibles y medibles, es decir, el valor del atributo ha de ser el adecuado para expresar o medir el grado de cumplimiento del objetivo asociado y debe ser posible asociarle una escala conocida, bien mediante la obtención de una distribución de probabilidad sobre los distintos niveles del atributo para cada alternativa, o bien mediante la asignación de un orden a las preferencias del decisor para los diferentes niveles del atributo. También es recomendable que el conjunto de atributos tenga las siguientes propiedades:

- **Completitud:** Se considera completo cuando el conjunto de atributos es adecuado para indicar el grado de cumplimiento de todos los objetivos, condición que se satisface si todos los objetivos del nivel más bajo de la jerarquía incluyen a

todas las áreas implicadas en el problema y si los atributos asociados a estos objetivos satisfacen la propiedad de comprensibilidad.

- *Descomponibilidad*: Los atributos deben permitir la simplificación del proceso de evaluación mediante la descomposición en partes del problema.
- *No redundancia*: El conjunto de atributos debe evitar cuantificar dos veces las mismas consecuencias.
- *Minimalidad*: El conjunto de atributos debe ser lo más pequeño posible sin que se pierdan por ello aspectos importantes. Esta condición se formaliza diciendo que no debe existir otro conjunto completo de atributos que represente el mismo problema con un número menor de atributos.

Una vez definidos los criterios puede darse el caso de que éstos a su vez se puedan descomponer en otros subcriterios formando otra jerarquía descendente. Durante la construcción de esta jerarquía de criterios y subcriterios se debe analizar el problema en profundidad con el fin de representarlo de la forma más completa y global posible (aunque dejando abierta la posibilidad de algunos cambios en los elementos), considerar el entorno que rodea al problema, identificar los atributos que contribuyen a la solución y considerar a las personas interesadas en el problema.

- Finalmente, en el último nivel de la jerarquía se sitúan las *alternativas*, que son el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión. El Proceso Analítico Jerárquico pretende ser una herramienta de ayuda al decisor en el proceso de elección de la alternativa que mejor contribuye a alcanzar la meta del problema planteado.

## **Paso 2: Establecimiento de las prioridades entre los criterios**

El objetivo de este paso es construir un vector de prioridades o pesos que evalúa la importancia relativa que la unidad decisora otorgada a cada criterio.

El problema clave que se plantea en este punto, es responder a cómo se puede asignar un valor numérico a cada criterio que represente, del modo más ajustado posible, la preferencia del decisor de un criterio frente a otro. Para ello existen dos estrategias: *asignación directa* (mediante una escala definida que correlaciona valores de grado con valores numéricos) o *asignación indirecta* (mediante técnicas de comparación entre criterios).

La *asignación directa* es sencilla, ya que el decisor sólo tiene que realizar una valoración sobre la importancia del criterio verbalizada en términos cualitativos y después acudir a una escala, que previamente ha sido establecida, para obtener los valores numéricos que se corresponden con su valoración. Por tanto, como paso previo a la resolución del problema de asignación de pesos, se debe definir la correspondencia entre la valoración cualitativa del decisor y la asignación numérica.

Utilizando una aplicación un tanto reduccionista, aunque sin pérdida de generalidad, podemos afirmar que ésta correspondencia es lo que se conoce como la *función utilidad*, de Von Neumann [8]. Esta función debe ser definida por el decisor, aunque lo más habitual es el uso de correspondencias establecidas, dado que la construcción de una función de utilidad propia supone un coste de trabajo muy alto y podría resultar incluso ineficiente en determinadas decisiones. Algunas de las escalas de asignación directa más comunes en la bibliografía son las que se presentan en la Tabla 3.1.

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa	
	Escala simple	Escala de Saaty
Muy débil	1	1
Débil	2	3
Moderada	3	5
Fuerte	4	7
Muy fuerte	5	9

Tabla 3.1. Propuestas de escala de asignación directa

El otro método de asignación de pesos es la *asignación indirecta*, que implica un análisis más exhaustivo. Esta técnica constituye la segunda de las características del método AHP, para establecer las prioridades de los criterios, éste método emplea los conceptos matemáticos de autovalor/vector y autovalor/vector propio, y realiza comparaciones entre pares de criterios.

Supóngase que el decisor compara unos criterios para  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) establecer unas prioridades  $w_j$  (pesos asociados a los criterios). La comparación se expresa mediante la matriz  $W$  y se quiere encontrar un vector de prioridades  $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ . Entonces se plantea la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \mu \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

Donde;

- $w_j$  es la magnitud que mide los pesos de los criterios.
- Los elementos de la matriz  $W = (w_{ij})$  con  $w_{ij} = w_i/w_j$  para  $i, j = 1, 2, \dots, n$  son números positivos.

La matriz  $W$  tiene una forma especial, pues su rango es igual a 1 debido a que cada fila es múltiplo constante de la primera. Por ello esta matriz tiene un único autovalor distinto de cero. La ecuación anterior se puede poner de la forma;

$$W \cdot \vec{w} = \mu \cdot \vec{w}$$

El autovalor de  $W$  distinto de cero es igual a la dimensión  $n$  de la matriz y  $\vec{w}$  es el vector propio asociado.

Se puede observar que la suma de los elementos de la matriz  $W$  para la fila  $i$  se:

$$w_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{w_j}$$

Y la suma de los elementos de la matriz para la columna  $j$  se puede escribir:

$$\frac{1}{w_j} \cdot \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j}$$

Por tanto si se normaliza la suma de columnas se obtiene el vector  $\vec{w}$ . Esta característica de  $W$  se utiliza en el análisis de perturbaciones.

Hay que destacar también que cada columna de la matriz  $W$  es múltiplo constante de  $\vec{w}$ . Así,  $\vec{w}$  se puede encontrar mediante la normalización de cualquier columna de  $W$ . Además, se dice que  $W$  es consistente porque satisface la condición;

$$w_{ik} \cdot w_{kj} = w_{ij} \quad \forall i, j, k.$$

Cuando se pide al decisor que establezca las prioridades mediante comparación entre pares para determinar los pesos relativos de los criterios, lo que hace es construir una matriz  $R$  cuyos elementos  $r_{ij}$  son valores numéricos positivos que indican la importancia o prioridad relativa entre el criterio  $C_i$  y el criterio  $C_j$  respecto al elemento del nivel inmediatamente superior en la jerarquía del problema, que en este caso es la meta u objetivo. Para determinar esta importancia se recurre a escalas previamente establecidas, de las cuales destaca la *escala fundamental* propuesta por Saaty. Según Saaty [9], este tipo de escalas son esenciales para representar una prioridad o importancia relativa.

El método AHP toma pares de elementos que se encuentran en un mismo nivel de una jerarquía y los compara en base a una determinada prioridad de un nivel superior, sin tener en cuenta otras prioridades ni otros elementos. Consecuencia de esta comparación surge una prioridad relativa de los objetos respecto a esa prioridad, cuya medida está basada en una escala ratio. La escala de comparación pareada sugerida es la de la Tabla 3.2.

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

**Tabla 3.2. Escala fundamental de comparación pareada [9]**

Estos números de la escala representan la proporción en la que uno de los elementos que se consideran en la comparación pareada domina al otro respecto a una propiedad o criterio que tienen en común. El elemento menor tiene el valor recíproco o inverso respecto al mayor, es decir, si  $x$  es el número de veces que un elemento domina a otro, entonces este último es  $x^{-1}$  veces dominado por el primero, de tal modo que;

$$x^{-1} \cdot x = x \cdot x^{-1} = 1.$$

Este es el principio del axioma de comparación recíproca que ya se ha comentado.

Para determinar los pesos de los criterios, el decisor, haciendo uso de la escala fundamental, debe completar la matriz  $R$ , de tal modo que el término  $r_{ij}$  representa la prioridad relativa entre el criterio  $C_i$  y el criterio  $C_j$  respecto a la meta del problema. Este término será mayor, igual o inferior a uno dependiendo de cuál de los dos criterios sea más importante para el logro de la meta. La matriz obtenida es de la forma:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Donde  $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$ . Una matriz con esta propiedad es denominada *matriz recíproca*. Para este tipo de matrices se cumple que el autovalor máximo  $\lambda_{\max}$ , es un número real positivo

y que existe un vector propio  $\vec{Z}$ , cuyas componentes son positivas, asociado a este autovalor. Posteriormente se normaliza este autovector para que la suma sea la unidad.

Una vez establecida la matriz  $R$ , ésta concibe como una perturbación de la matriz  $W$  y se considera que el vector propio  $\vec{Z}$  es una aproximación al vector de prioridades  $\vec{w}$ .

Por tanto, para determinar los pesos  $w_j$  bastará calcular el autovector asociado al autovalor máximo de la matriz  $R$ . Este proceso de cálculo es sencillo hoy en día con las herramientas informáticas que existen, no obstante, cuando el tiempo lo requiera, se pueden aproximar el vector  $w$  mediante la suma normalizada de las filas de la matriz  $R$  según la expresión:

$$\frac{\sum_j r_{ij}}{\sum_i \sum_j r_{ij}}$$

Asimismo otra manera de obtener el vector de pesos de la matriz sería mediante el cálculo de la media geométrica normalizada, como:

$$\frac{(\prod_j r_{ij})^{1/n}}{\sum_i (\prod_j r_{ij})^{1/n}}$$

Para que la aplicación de las comparaciones por pares arroje resultados adecuados, es necesario que en el proceso de comparación por pares el decisor haya sido cuidadoso con las valoraciones, ya que un error de incoherencia genera una matriz de la que se obtiene un autovalor poco representativo. Esto se produce, por ejemplo, cuando se genera una contradicción al incumplir la transitividad de los valores. Supongamos que hemos hecho unas valoraciones en las que representamos que  $C_1 > C_2$  y  $C_2 > C_3$ . Pero puede ser que al comparar por separado hayamos juzgado que  $C_3 > C_1$ . Por tanto, estamos ante un error de incoherencia. Se dice que una matriz es totalmente consistente si verifica que  $r_{ij} \cdot r_{jk} = r_{ik} \forall i, j, k$ .

Existen varias formas de detectar la inconsistencia de la matriz y medir la consistencia de los juicios emitidos. Una de ellas consiste en resolver, tras construir la matriz  $R$ , la ecuación;

$$R \cdot \vec{w} = \lambda_{max} \cdot \vec{w}$$

Cuanto más próximo esté el valor  $\lambda_{max}$  a  $n$ , siendo  $n$  la dimensión de la matriz, mayor es la consistencia de los juicios. El resto de autovalores de  $R$  deben estar próximos a cero. Pero no siempre es posible obtener por parte del evaluador una coherencia total en sus juicios que  $\lambda_{max}$  sea igual a  $n$ . Esto se debe tanto al propio decisor como a la escala de valoración, cuando esto sucede es necesario construir una función para medir la consistencia de los juicios. La consistencia se puede medir mediante el *índice de consistencia* ( $CI$ ), que tiene la siguiente expresión:

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

Esta medida puede utilizarse para mejorar la consistencia de los juicios si se compara con el número apropiado de la tabla que se presenta a continuación, que recoge el índice de *consistencia aleatorio (RI)*:

<b>n</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>RI</b>	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41
<b>n</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	
<b>RI</b>	1,45	1,49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,59	

**Tabla 3.3. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n) [22]**

El índice de consistencia aleatorio (RI) se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas [10] generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8,9).

Si se calcula el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RI), se obtiene el denominado *ratio de consistencia (CR)*.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,10$$

Si este cociente vale 0,10 ó menos, entonces se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido. Para  $n=3$  el umbral se fija en 0,05 y para  $n=4$  en 0,08. Para  $n \geq 5$ , si CR es mayor que 0,10 se debe estudiar el de nuevo el problema y revisar los juicios emitidos.

Una vez calculado el vector de prioridades  $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  (bien calculando  $\lambda_{max}$  y el vector propio  $\vec{Z}$  asociado, bien de una manera aproximada), se analizan los resultados y se establece definitivamente el vector  $\vec{w}$ .

### **Paso 3: Establecimiento de las prioridades locales y globales entre los Subcriterios**

Si en la modelización del problema de decisión como una jerarquía se ha considerado la descomposición de algunos o todos los criterios en subcriterios, antes de continuar debe calcularse el vector de pesos global asociado a dicho subcriterios.

El procedimiento es el mismo que el descrito en el paso anterior, pero en este caso se deberán realizar las comparaciones pareadas entre subcriterios para determinar su importancia relativa respecto al criterio inmediatamente superior en la jerarquía. De este modo, es posible calcular el vector de pesos asociados a un conjunto de subcriterios respecto a su criterio “padre”. Es lo que se ha denominado prioridad local.

Una vez calculada la importancia relativa de los criterios respecto a la meta del

problema, en el paso 2, y la importancia relativa de los subcriterios respecto al criterio del que dependen, para calcular la importancia relativa global de cada subcriterio respecto a la meta del problema bastará calcular el producto de los diferentes pesos de cada uno de los criterios y subcriterios que se recorran en la jerarquía desde el subcriterio del que se quiere calcular su peso hasta la cúspide de la jerarquía, procedimiento que se denomina composición jerárquica.

#### Paso 4: Establecimiento de las prioridades locales entre las alternativas

Una vez obtenida la ponderación de los criterios y subcriterios en los pasos anteriores, se procede a la valoración de las alternativas para así poder calcular las prioridades locales correspondientes. Para ello, con cada criterio o subcriterio del último nivel de la jerarquía se plantea la matriz  $R$  de juicios por comparación pareada entre alternativas. El procedimiento es el mismo que explicado en el paso 2, pero esta vez se establece el nivel de prioridad de una alternativa sobre otra tomando como base de comparación el grado de cumplimiento o satisfacción de cada criterio o subcriterio. La escala a utilizar es la misma también.

Una vez planteada la matriz  $R$  de comparación entre alternativas, se procede como ya se ha comentado: se calcula el autovalor máximo de la matriz  $R$ , el vector propio asociado, y el índice de consistencia de los juicios. Una vez realizadas estas operaciones, si el índice de consistencia es aceptable, para cada criterio o subcriterio se obtiene un vector de pesos locales de las alternativas, que corresponde con el autovector calculado. Toda esta información, junto con los pesos de los criterios o subcriterios calculados anteriormente, se puede presentar en la siguiente matriz, que recibe el nombre de matriz de valoración:

	$w_1$	$w_2$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mn}$

Tabla 3.4. Matriz de valoración [1]

Dónde:

- $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  es el vector de pesos o prioridades relativas asociado a los criterios o subcriterios
- $\vec{x}_j = \begin{pmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \dots \\ x_{mj} \end{pmatrix}$  es el vector de prioridades locales de las alternativas establecidas en base al criterio o subcriterio  $C_j$ .

- $\vec{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$  es el vector de prioridades locales asociado a la alternativa  $A_i$ , cuyas componentes son las prioridades locales asociadas a esta alternativa según cada uno de los criterios.

### **Paso 5: Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa.**

Cuando se dispone de toda la información de la matriz de valoración, para finalizar el método AHP, solo resta aplicar cualquiera de los métodos de la bibliografía para calcular las prioridades totales asociadas a cada alternativa, que representan la importancia de las alternativas con respecto a la meta. Saaty propone que el método a utilizar sea el método de la suma ponderada. Es un método basado en una función valor y parte del principio de valorar la adición de buenas valoraciones como argumento para seleccionar una alternativa. También se podrían emplear métodos de sobre clasificación, como ELECTRE y PROMETHEE, pero la propuesta de Saaty es más sencilla.

Recordemos el procedimiento del método de la suma ponderada. El objetivo es encontrar el vector global  $\vec{p}$  de prioridades que agrega las prioridades obtenidas en las dos jerarquías consideradas: criterios y alternativas. Las componentes  $p_i$  de este vector son las prioridades totales asociadas a cada alternativa  $A_i$ , que reflejan el valor total que cada alternativa tiene para el decisor. Cada componente de este vector se calcula según la expresión:

$$p_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot r_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde  $w_j$  son los pesos asociados a cada uno de los criterios que se consideran y  $r_{ij}$  son las componentes de la matriz de valoración tras el proceso de normalización. Finalmente, por ordenación de las alternativas en base a los valores  $p_1, p_2, \dots, p_m$  es posible resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa de entre las posibles, que será la de suma ponderada mayor.

### **Paso 6: Análisis de sensibilidad**

Como último paso de la metodología AHP puede realizarse un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son robustos y no son fruto del azar.

La realización de este análisis puede facilitarse y agilizarse si se emplea para ello herramientas informáticas de cálculo. El software *Expert Choice*®, uno de los principales paquetes informáticos que implementa la metodología AHP, permite realizar el análisis de sensibilidad de cinco formas diferentes: *sensibilidad de valoración*, *sensibilidad dinámica*, *sensibilidad de gradiente*, *gráfico en dos dimensiones* y *sensibilidad de diferencias ponderadas*. En todos estos análisis el procedimiento es el mismo: se realizan variaciones en el valor de un peso (no mayores al 10%) y se observa numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de alternativas. La diferencia entre un análisis de sensibilidad y otro se reduce a la forma de representar la información.

### 3.1.4. Ventajas e Inconvenientes de AHP

En todas las técnicas de decisión multicriterio se pueden encontrar aspectos positivos y negativos, bien desde un punto de vista teórico o bien desde la práctica.

Algunas de las ventajas del método AHP son:

- *Teoría:* El AHP es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica.
- *Práctica:* El AHP es una de las técnicas multicriterio que mejor comportamiento práctico tiene.
- *Unidad:* El AHP proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados.
- *Complejidad:* El AHP integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos.
- *Estructura jerárquica:* El AHP refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel.
- *Medida:* El AHP proporciona una escala para medir imponderables y un método para esclarecer prioridades.
- *Síntesis:* El AHP conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa.
- *Compensaciones:* El AHP toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa en virtud de objetivos.
- *Juicio y consenso:* El AHP no insiste en el consenso, pero sintetiza un resultado representativo de diversos juicios.
- *Repetición del proceso:* El AHP permite que la gente afine su definición de un problema y mejore su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso.

No obstante, el método AHP también representa una serie de inconvenientes, como se cita a continuación.

Inconvenientes del método de AHP son;

- La justificación de la independencia exigida en la modelización jerárquica.

- La escala fundamental empleada para expresar los juicios relativos en las comparaciones pareadas.
- Los procedimientos de priorización de los elementos mediante el cálculo del autovector.
- La forma de evaluar la consistencia de los juicios emitidos.
- La interpretación de las prioridades totales obtenidas en el procedimiento.
- La introducción de una nueva alternativa puede hacer variar la estructura de preferencias del decisor, o poner de manifiesto alguna inconsistencia en los juicios.

### 3.2. Aplicación a nuestro caso

Tenemos que instalar una mini central que abastezca de electricidad a la ciudad de Murcia. Existen varias alternativas para ello: mini central de micro-cogeneración, parque eólico, placas solares... En los sucesivos capítulos vamos a recabar toda la información acerca de estas y otras tecnologías, pero... ¿información sobre qué? Para ello tenemos que plantearnos qué criterios establecemos, y en base a ellos buscar la información.

Dichos criterios van a ser de índole económica, tecnológica y medioambiental y social. Pero cada uno se puede concretar más mediante la descomposición en varios subcriterios, y para ello vamos a ayudarnos de la siguiente tabla, en la que cada subcriterio intentará dar respuesta a las preguntas que se plantean (Tabla 3.5 y Fig. 3.4):

Criterios	Preguntas asociadas
<b>Medioambiente</b>	¿Qué niveles de gases de efecto invernadero emite la planta?
	¿Cuánto terreno hace falta para la instalación?
<b>Sociedad</b>	¿Hay prejuicios en contra de la tecnología?
	¿Se generan ruidos molestos para los vecinos de la zona?
	¿Cuánto empleo se crea en la localidad?
<b>Tecnología</b>	¿La tecnología está madura?
	¿Hay proveedores de la tecnología cerca?
	¿Cuál es el rendimiento de la instalación?
	¿Cuál es la disponibilidad de los recursos?
<b>Economía</b>	¿Cuál es la inversión inicial?
	¿Cuánto cuesta la materia prima?
	¿Cuál es el tiempo de Pay-back?
	¿Cuánto se ingresa?
	¿Cuáles son los costes?

*Tabla 3.5. Criterios y subcriterios en nuestro proyecto.*

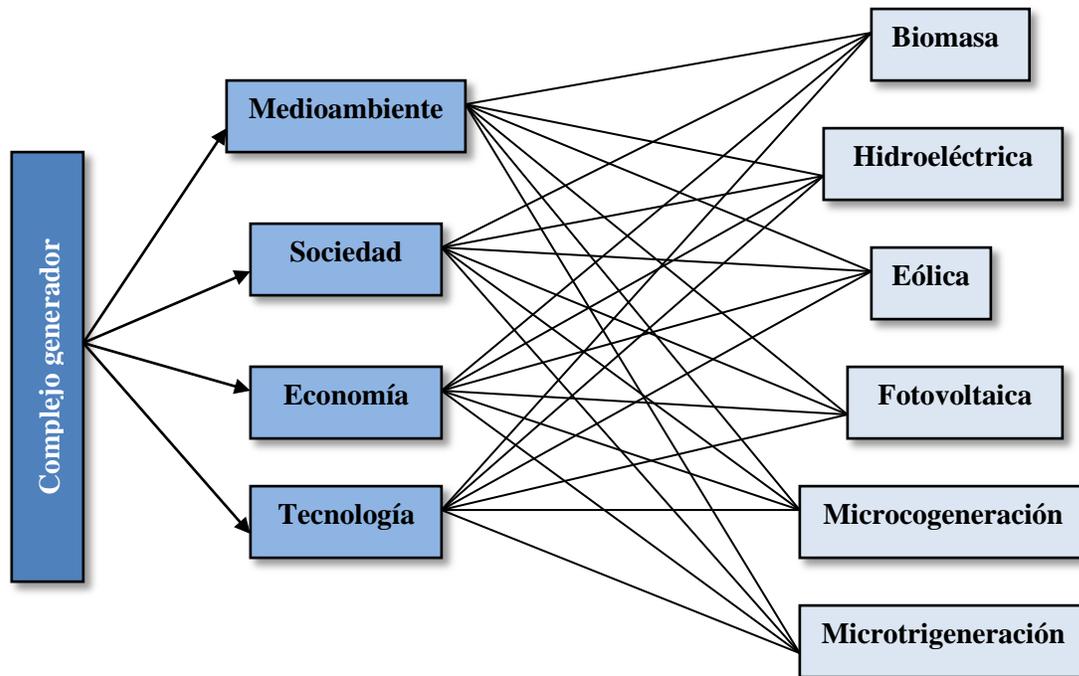


Figura 3.4. Jerarquía AHP aplicada a nuestro proyecto.

### 3.3. Método Topsis.

#### Introducción. El concepto de alternativa ideal

El concepto de alternativa ideal tiene una larga tradición en diversos campos científicos, especialmente en la literatura psicométrica, en donde se maneja una noción absoluta de ideal [11]. Pero es Zeleny [12] quien lo elige en pieza central de su propuesta de *solución de compromiso*, en el sentido de la alternativa más *próxima* al ideal. Para Zeleny [13] el concepto de ideal y de solución de compromiso incluso es una hipótesis sobre la racionalidad subyacente en los procesos humanos de decisión. El concepto se ha difundido desde entonces, pasando a otros campos como el de las decisiones en grupo [14].

Pero es en el método TOPSIS donde se contemplan las sutilezas que el concepto de ideal tiene y se construye un método operativo. [15].

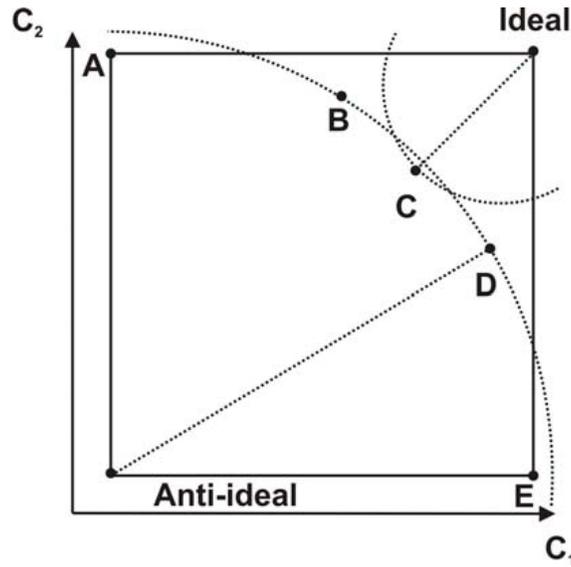
Formalicemos algunas definiciones básicas. Partimos, de tener unas alternativas  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  y una matriz de decisión, con  $x_{ij} = U_j(A_i)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Donde  $U$  es la función utilidad del decisor. Podemos, sin pérdida de generalidad, transformar las utilidades de manera que todos los criterios sean a maximizar/minimizar y que todos los  $x_{ij} > 0$ .

✓ Se denomina *punto ideal* en  $(\mathfrak{R}^n)$  al punto  $A^M = (A_1^M, A_2^M, \dots, A_n^M)$ , donde  $A_i^M = \text{Max}_i x_{ij}$  para el caso de criterios de beneficio y  $A_i^m = \text{Min}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de coste. La alternativa  $A^M$  se llama *alternativa ideal*.

✓ Se denomina *punto anti-ideal* en  $(\mathfrak{R}^n)$  al punto  $A^m = (A_1^m, A_2^m, \dots, A_n^m)$ , donde

$A_i^m = \text{Min}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de beneficio y  $A_i^M = \text{Max}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de coste. La alternativa  $A^m$  se llama *alternativa anti-ideal*.

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) de Hwang y Yoon [16] afronta el dilema de trabajar con el ideal, con el anti-ideal o con la mezcla de los dos. Para ver que esto es realmente un dilema, pues puede conducir a resultados diferentes, basta observar la siguiente figura, en la que se han representado cinco alternativas (A, B, C, D y E) para un problema de dos criterios. También aparecen en la figura los puntos ideal y anti-ideal, respecto a los que es inmediato observar que C es la más próxima al ideal mientras que D es la más lejana del anti-ideal (en ambos casos utilizando una métrica de distancia eucléida y pesos iguales).



**Figura 3.5. Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal**

TOPSIS resuelve el problema, inspirándose en una idea que Dasarathy [17] aplicó en un contexto de análisis multivariante de datos. Para cada alternativa  $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ , se calculan  $d_p^M(A_i)$  y  $d_p^m(A_i)$ , las distancias ponderadas al ideal y al anti-ideal según la métrica  $p$  escogida:

$$d_p^M(A_i) = \left[ \sum_j w_j^p |A_j^M - x_{ij}|^p \right]^{1/p}$$

$$d_p^m(A_i) = \left[ \sum_j w_j^p |A_j^m - x_{ij}|^p \right]^{1/p}$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene el ratio de similiaridad al ideal:

$$D_p(A_i) = \frac{d_p^m(A_i)}{d_p^M(A_i) + d_p^m(A_i)}$$

Que varía desde  $D_p(A^m) = 0$  para el anti-ideal, hasta  $D_p(A^M) = 1$  para el ideal. Finalmente,  $D_p(a_i)$  se utiliza para la ordenación final de las alternativas.

### 3.3.1. Algoritmo del Método Topsis



Figura 3.6. Pasos del método Topsis

#### Paso 1: Establecimiento de la matriz de decisión

El método TOPSIS evalúa la siguiente matriz de decisión que se refiere a  $m$  alternativas  $A_i, i = 1, \dots, m$ , las cuales son evaluadas en función de  $n$  criterios  $C_j, j = 1, \dots, n$ ;

	$w_1$	$w_2$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mn}$

Tabla 3.6. Matriz de decisión

Donde  $x_{ij}$  denota la valoración de la  $i$ -ésima alternativa en términos del  $j$ -ésimo criterio. Y donde  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  es el vector de pesos asociado con  $C_j$ .

### Paso 2: Normalización de la matriz de decisión

En el método TOPSIS primero convierte las dimensiones de los distintos criterios en criterios no dimensionales. Un elemento  $\bar{n}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada  $N = [\bar{n}_{ij}]_{\text{man}}$  se calcula como sigue:

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}} \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m.$$

### Paso 3: Construir la matriz de decisión normalizada ponderada

El valor normalizado ponderado  $\bar{v}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada ponderada  $V = [\bar{v}_{ij}]_{\text{man}}$  se calcula como:

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij} \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m$$

Donde,  $w_j$  tal que  $1 \in \sum_{j=1}^n w_j$  es el peso del  $j$ -ésimo atributo o criterio, si hablamos del caso crisp se verifica la igualdad. Es bien conocido que los pesos de los criterios en un problema de decisión no tienen el mismo significado y no todos tienen la misma importancia. Estos pesos pueden obtenerse de diferentes modos: mediante asignación directa, mediante el método AHP, etc. Como se ha comentado con anterioridad utilizaremos el método AHP para la obtención de los pesos en el ejemplo de aplicación que nos ocupa.

### Paso 4: Determinar la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

El conjunto de valores ideal positivo  $\bar{A}^+$  y el conjunto de valores ideal negativo  $\bar{A}^-$  se determina como:

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \left\{ \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \left\{ \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde  $J$  está asociado con los criterios de beneficio y  $J'$  está asociado con los criterios de costes.

### Paso 5: Cálculo de las medidas de distancia

La separación de cada alternativa de la solución ideal positiva  $\bar{A}^+$  está dada como:

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, \dots, m$$

Y la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa  $\bar{A}^-$  es como sigue:

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, \dots, m$$

En este caso se utiliza la distancia Euclídea m-multidimensional.

### Paso 6: Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa  $\bar{R}_i$  a la solución ideal puede expresarse como sigue:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, \quad i = 1, \dots, m$$

- Si  $\bar{R}_i = 1 \rightarrow A_i = \bar{A}^+$
- Si  $\bar{R}_i = 0 \rightarrow A_i = \bar{A}^-$

Cuanto más próximo es el valor de  $\bar{R}_i$  a 1, implica una mayor prioridad de la alternativa i-ésima.

### Paso 7: Ordenación de preferencias

Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con  $\bar{R}_i$  en orden descendente.

#### 3.3.2. Problemas que se plantean en el Método Topsis

##### Efecto de la normalización

Uno de los pasos en TOPSIS para eliminar anomalías en las unidades y escalas es el proceso de normalización, de esta manera los criterios son adimensionales.

Una vez ubicada toda la información en la matriz de valoración, se dispone de los elementos suficientes para aplicar cualquiera de los métodos existentes en la bibliografía, que permiten calcular las prioridades totales asociadas a cada alternativa. Pero para ello es

necesario primero comprobar que los criterios sean comparables entre sí.

Nuestra principal cuestión es si la normalización afecta al resultado final. La respuesta debería ser no pero esto no es así tal y como demostraremos:

Supongamos un ejemplo sencillo de tres candidatos a ocupar una cierta posición. Para ello, a cada uno de ellos se le ha pasado un cuestionario para su evaluación. Cada uno de los cuestionarios tiene el mismo peso  $w$  ( $C_1$ ) =  $w$  ( $C_2$ ) = 0,5. De acuerdo con esto, suponemos un problema multicriterio con tres alternativas y 2 criterios.

Sean los tres individuos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  cuyas valoraciones provienen de la escala  $\{0,1, 2, 3, 4, 5\}$ , donde  $5 > 4 > 3 > 2 > 1 > 0$ , estas son:  $x_{1j} = (1, 5)$ ,  $x_{2j} = (4, 2)$  y  $x_{3j} = (3, 3)$  para  $j = 1, 2$ .

Si aplicamos el criterio normativo de la esperanza matemática  $ME_i = \sum_{j=1}^2 w_j \cdot x_{ij}$ , podemos observar que las tres alternativas son igualmente satisfactorias para el decisor, porque:

$$EM_i = \frac{1 + 5}{2} = \frac{4 + 2}{2} = \frac{3 + 3}{2}$$

Entonces los tres individuos ocuparían la misma posición dentro del ranking.

Veamos que ocurre al aplicar el método TOPSIS.

Pesos	0.5	0.5							
	$C_1$	$C_2$							
$A_1$	1	5	$n_1$	0.196	0.405	$v_1$	0.098	0.405	
$A_2$	4	2	$n_2$	0.392	0.162	$v_2$	0.392	0.162	
$A_3$	3	3	$n_3$	0.294	0.243	$v_3$	0.294	0.243	
$\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}$	5.099	6.164					$A^+$	0.392	0.405
							$A^-$	0.098	0.162

Ranking						
$d^+ A_1$	0.294	$d^- A_1$	0.243	$RA_1$	0.453	3
$d^+ A_2$	0.243	$d^- A_2$	0.294	$RA_2$	0.547	1
$d^+ A_3$	0.189	$d^- A_3$	0.212	$RA_3$	0.528	2

*Tabla 3.7. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio*

Lo primero que llama la atención es que el tercer individuo, que tenía la misma valoración para los dos cuestionarios (3, 3) al normalizar tiene diferente valoración. Esto es debido al proceso de normalización donde en un caso se ha dividido por 5.099 y en el otro por 6.164. De este modo una vez normalizada la matriz podemos obtener la matriz

normalizada ponderada.

En el paso 4 del algoritmo TOPSIS, a la hora de determinar  $A^+$ , se podría interpretar este como una alternativa ficticia que se correspondería con el mejor valor de los existentes para cada uno de los criterios, en este caso sería la alternativa  $A_4 = (4, 5)$ , que una vez normalizada, y ponderada nos daría los valores  $A^+ = (0.392, 0.405)$ . Mientras que la  $A^-$ , se correspondería con la valoración de una hipotética alternativa valorada como  $A_5 = (1, 2)$ , dándonos una vez normalizada y ponderada  $A^- = (0.098, 0.162)$ . Ver Tabla 3.7.

Seguidamente se calculan los valores de  $d^+$  y  $d^-$  que se corresponden con las distancias euclídeas a las tres alternativas respecto a estas antes definidas respectivamente.

Finalmente se calcula el valor de la proximidad relativa. Y la ordenación final de las alternativas sería  $A_2 > A_3 > A_1$ . Con este método hemos sido capaces de pasar de una igualdad entre los tres candidatos a obtener una ordenación entre ellos.

### **Inversión del orden**

La inversión del orden es un fenómeno que ocurre cuando un decisor, en el proceso de selección de una alternativa de un conjunto de selección, se encuentra con una nueva alternativa que no se tuvo en cuenta al principio de la selección. Esta nueva alternativa puede hacer que tenga que volverse a calcular la evaluación de todas las alternativas.

La primera vez que aparece en la literatura el concepto de “independencia de alternativas irrelevantes” fue en Luce y Raiffa [18] en el axioma 7.

**Axioma 7:** Si una acción es no-óptima para un problema de decisión bajo incertidumbre (p.d.b.i.) esta no puede ser óptima añadiendo nuevas acciones al problema.

**Axioma 7':** La adicción de nuevas acciones no pueden transformar una antigua acción, originariamente no-óptima, en una óptima, y no se puede cambiar una antigua acción, originariamente óptima en una no-óptima solo si al menos uno de los acciones es óptima.

**Axioma 7'':** La adición de nuevas acciones a un (p.d.b.i.) nunca cambia antiguos, originariamente acciones no-óptimas en óptimas y, además:

- a) Todas las antiguas, acciones originariamente óptimas permanecen óptimas o
- b) Ninguna de las antiguas, acciones originariamente óptimas permanecen óptimas

**Axioma 7''':** Una acción  $A'$  es óptima si y solo si es óptima en las comparaciones pareadas entre  $A'$  y  $A$ .

La inversión de orden, es un fenómeno asociado con los resultados de la ordenación de alternativas al añadir/eliminar alternativas en un proceso de toma de decisión. Es bien conocido que cuando las alternativas están muy próximas, el orden entre ellas depende del método de evaluación utilizado.

Siguiendo con el ejemplo anteriormente planteado si añadimos una nueva alternativa  $A_4$ , para su evaluación y que su valoración sea  $A_4 = (5, 1)$ . Igual que para los otros tres candidatos  $ME_4 = 3$ . Veamos que ocurre con el desarrollo del algoritmo TOPSIS para este caso. Ver tabla 3.8.

Aplicando los mismos pasos que hemos hecho con anterioridad llegamos a que ahora al normalizar las valoraciones del tercer individuo pasan a ser (0.420, 0.480). Es decir, ahora es el segundo cuestionario el que más vale, aunque partíamos de que  $w(C_1) = w(C_2) = 0,5$ . La razón se debe a que al introducir la cuarta alternativa los factores de normalización cambian siendo ahora (7.141, 6.245).

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.140	0.801	$v_1$	0.070	0.400
$A_2$	4	2	$n_2$	0.560	0.320	$v_2$	0.280	0.160
$A_3$	3	3	$n_3$	0.420	0.480	$v_3$	0.210	0.240
$A_4$	5	1	$n_4$	0.700	0.160	$v_4$	0.350	0.080
$\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}$			7.141			6.245		
						$A^+$	0.350	0.400
						$A^-$	0.070	0.080

Ranking						
$d^+A_1$	0.280	$d^-A_1$	0.320	$RA_1$	0.533	1
$d^+A_2$	0.250	$d^-A_2$	0.225	$RA_2$	0.473	3
$d^+A_3$	0.212	$d^-A_3$	0.213	$RA_3$	0.500	2
$d^+A_4$	0.320	$d^-A_4$	0.280	$RA_4$	0.466	4

Tabla 3.8. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio al que se ha añadido una nueva alternativa

Podemos observar que ahora la primera alternativa que antes era la peor, pasa ahora a ser la mejor. Con esto, vemos que la introducción de una nueva alternativa cambia completamente el orden y en este caso, no encontramos con una inversión de orden total.

No parece razonable que la posición del mejor candidato dependa del número de participantes en el proceso.

### 3.3.3. Nueva Aproximación al Método Topsis

Para hallar una solución a los problemas que plantea el Método TOPSIS planteamos algunas modificaciones al algoritmo propuesto por Hwang y Yoon.

## Modificaciones en la norma

Vamos a realizar un estudio de las principales formas de normalización existentes en la literatura [20; 21] para ello a continuación se presenta un cuadro resumen de los principales procedimientos. Ver Tabla 3.9.

El procedimiento que suele emplearse para normalizar las valoraciones de las alternativas en el método TOPSIS es el procedimiento 1, está norma junto con la correspondiente al procedimiento 2 conservan la proporcionalidad, pero nos lleva a un MCDM que es contexto dependiente, ya que si añadimos una nueva alternativa al sistema hay que recalculer todos los datos.

	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Procedimiento 3	Procedimiento 4
Tipo	Normalización Vector	Normalización lineal	Normalización lineal	Normalización lineal
Definición	$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$	$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$	$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}}$ Criterio de beneficio	$r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\max} - x_{ij}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}$ Criterio de beneficio
			$r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}}$ Criterio de coste	$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\min}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}$ Criterio de coste
Rango	$0 < r_{ij} < 1$	$0 < r_{ij} < 1$	$0 < r_{ij} \leq 1$	$0 \leq r_{ij} \leq 1$
Conserva la proporcionalidad	SI	SI	SI	NO
Interpretación	i-esima componente del vector unitario	% del total	% del máximo	% del rango
			% del mínimo	

**Tabla 3.9. Métodos de normalización**

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

Las normas correspondientes al procedimiento 4, representa el tanto por ciento del rango y no conserva la proporcionalidad, más bien la invierte. Pero esto no es un inconveniente ya que únicamente hay que invertir el proceso de decisión en el siguiente sentido.

- Si  $\overline{R}_i = 1 \rightarrow A_i = \overline{A}^+$
- Si  $\overline{R}_i = 0 \rightarrow A_i = \overline{A}^-$

Por tanto,  $A_i > A_j \Leftrightarrow R_i < R_j$

Asimismo en el procedimiento 4, nos podemos encontrar con casos en los que existe división por cero en el caso de utilizar números difusos. En general esto sucederá siempre que se verifique que el extremo inferior del máximo sea igual al extremo superior del mínimo. También hay problemas de valores negativos a la hora de utilizar números difuso, esto es, cuando nos encontramos con valores en el denominador menores que 0,  $x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min} < 0$  que se producen por la propiedad de la operación de diferencia entre números difusos, (ver el epígrafe 4.1. Lógica Difusa), que luego desvirtúan el número difuso. Por lo que es un procedimiento poco recomendado a utilizar con números difusos.

Por lo tanto viendo los problemas que plantean los procedimientos, 1,2 y 4, planteamos la utilización del procedimiento 3 en el segundo paso del algoritmo TOPSIS. Con lo que en vez de utilizar la norma propia del método TOPSIS, consideramos más apropiada la norma  $r_{ij} = x_{ij} / x_{ij}^{\max}$ , como seguidamente veremos.

Para la demostración consideramos el mismo ejemplo anterior y las mismas consideraciones, salvo el cambio de norma.

Pesos	0.5	0.5							
	$C_1$	$C_2$							
$A_1$	1	5	$n_1$	0.250	1.000	$v_1$	0.125	0.500	
$A_2$	4	2	$n_2$	1.000	0.400	$v_2$	0.500	0.200	
$A_3$	3	3	$n_3$	0.750	0.600	$v_3$	0.375	0.300	
$x_{ij}^{\max}$	4	5					$A^+$	0.500	0.500
							$A^-$	0.125	0.200

Ranking						
$d^+ A_1$	0.375	$d^- A_1$	0.300	$RA_1$	0.444	3
$d^+ A_2$	0.300	$d^- A_2$	0.375	$RA_2$	0.555	1
$d^+ A_3$	0.235	$d^- A_3$	0.269	$RA_3$	0.534	2

Tabla 3.10. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma

En este caso,  $A^+ = (0.5, 0.5)$  y  $A^- = (0.125, 0.2)$ . Como resultado obtenemos como índice de proximidad  $R_1 = 0.444$ ,  $R_2 = 0.555$  y  $R_3 = 0.534$ , siendo la ordenación  $A_2 > A_3 > A_1$ , la misma que la obtenida con el método clásico.

**Proposición:** Es posible probar que, en todos los casos, los valores de  $A^+$  se corresponden con el vector de pesos asociado a los criterios

**Demostración:** Esto se debe a que para cada criterio, en la matriz de los valores normalizados siempre hay un 1, esto supone que al multiplicar por los pesos, estos se obtienen en los puntos donde se da este 1. De ahí que  $A^+$  sea el vector de pesos.

Entendemos que esto es una buena consecuencia del método y por lo tanto no queremos modificarlo. Supongamos ahora, que se añade la nueva alternativa.  $A_4$ , el desarrollo del algoritmo con la modificación planteada se desarrolla en la Tabla 3.11. En este caso,  $A^+ = (0.5, 0.5)$  y  $A^- = (0.1, 0.1)$ . Como resultado obtenemos como índice de proximidad  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.500$ , así los cuatro candidatos tienen la misma ordenación  $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$ . Por consiguiente tenemos inversión del orden.

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.200	1.000	$v_1$	0.100	0.500
$A_2$	4	2	$n_2$	0.800	0.400	$v_2$	0.400	0.200
$A_3$	3	3	$n_3$	0.600	0.600	$v_3$	0.300	0.300
$A_4$	5	1	$n_4$	1.000	0.200	$v_4$	0.500	0.100
$x_{ij}^{\max}$	5	5				$A^+$	0.500	0.500
						$A^-$	0.100	0.100

Ranking						
$d^+ A_1$	0.400	$d^- A_1$	0.400	$RA_1$	0.500	-
$d^+ A_2$	0.316	$d^- A_2$	0.316	$RA_2$	0.500	-
$d^+ A_3$	0.283	$d^- A_3$	0.283	$RA_3$	0.500	-
$d^+ A_4$	0.400	$d^- A_4$	0.400	$RA_4$	0.500	-

**Tabla 3.11. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma con inclusión de una nueva alternativa**

Luego, únicamente con la modificación de la norma no solucionamos el problema de la inversión de orden.

### Modificaciones en el PIS y el NIS

Dado que el cambio en la normalización no es suficiente para solucionar el problema de la inversión de orden, proponemos otra modificación al método que está relacionada con la conceptualización del PIS y el NIS.

Dentro del concepto de alternativa ideal propuesto por el método TOPSIS vamos a considerar dos posibles variantes de este. La idea del Método TOPSIS está representada en las Figuras 3.7. a) y b), donde tendríamos que evaluar la 5 alternativas (A, B, C, D, E), y donde por cuestiones relacionadas con la representación gráfica únicamente consideramos dos criterios. Así, la solución es una solución de compromiso de acuerdo con las preferencias del decisor. En base al concepto de que la alternativa elegida debe tener la distancia más corta a la solución ideal positiva PIS, en nuestro caso (C, D, E) y la más lejana de la solución ideal negativa NIS en nuestro caso (A, B, C).

En la Figura 3.7.a) representamos la concepción del PIS y el NIS de manera relativa y

que se corresponde con el Método TOPSIS clásico. Mientras que en la Figura 3.7.b) representamos la alternativa Ideal Positiva (como la mejor posible) y la ideal negativa (como la peor posible) en términos absolutos.

De este modo, entre todas las alternativas que tienen la misma distancia al PIS, elegiremos la alternativa que más se aleje de la línea recta que une PIS con NIS, en nuestro caso  $E > D > C$ . Por el contrario, entre todas las alternativas que tiene el mismo NIS, será mejor, en este sentido TOPSIS la de aquella que esté más próxima a la línea recta que une PIS-NIS, esto es  $C > B > A$ .

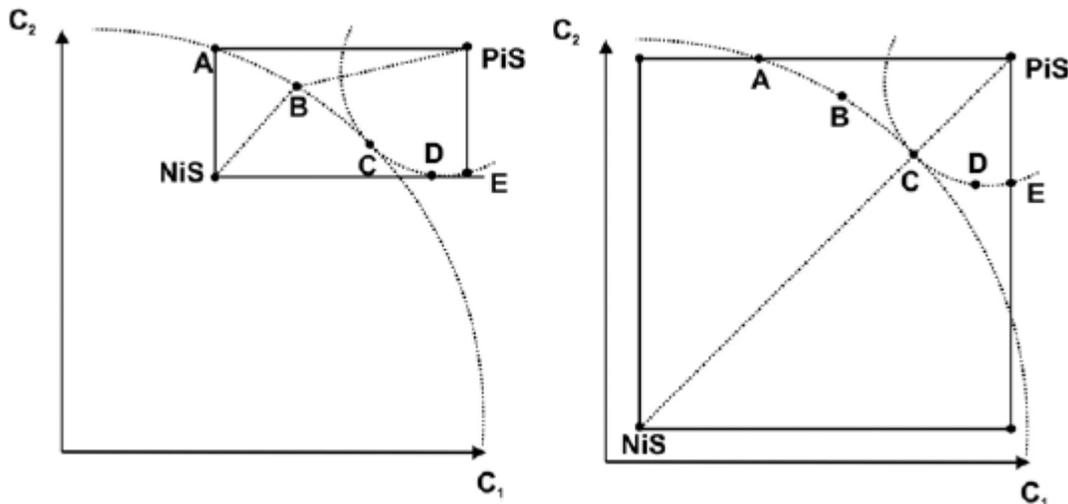
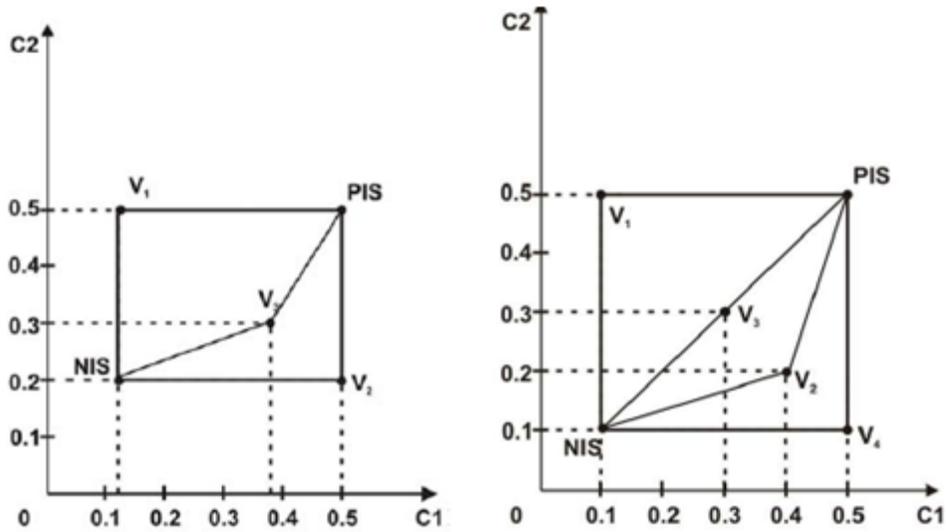


Figura 3.7. Concepto PIS y NIS para el modo relativo y el modo absoluto

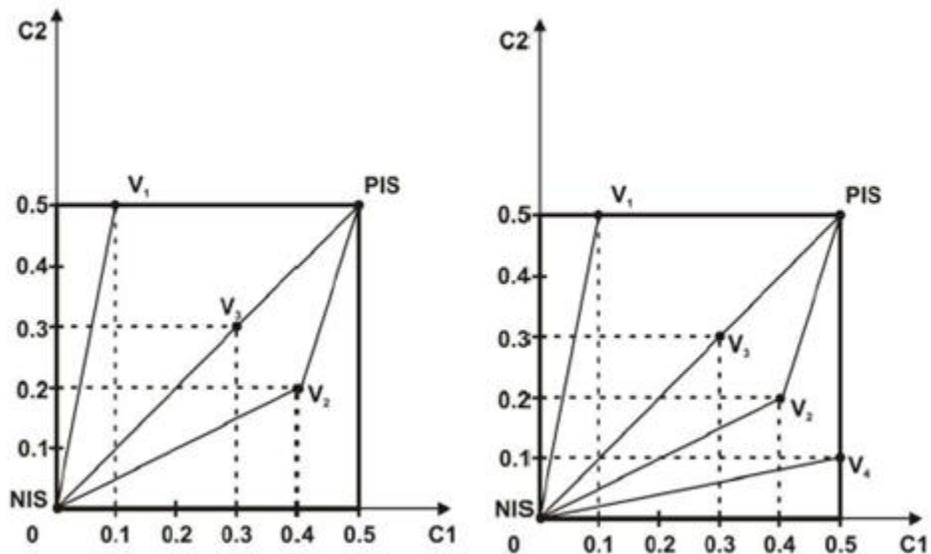
Veamos ahora que ocurre en el ejemplo a estudio:

### Modo relativo

El concepto puesto de manifiesto anteriormente es el de “relatividad”. Esto significa que elegimos como  $A^-$  aquellos valores que representan el mínimo valor de las 3 o  $n$  alternativas que estemos valorando, en nuestro caso será  $A^- = (0.125, 0.2)$ . De igual forma  $A^+ = (0.5, 0.5)$  será entendido como el máximo valor posible de las 3 alternativas. Los gráficos correspondientes a las Tablas 3.11. y 3.12 se corresponden con las Figuras 3.8.



*Figura 3.8. Modo relativo para 3 y 4 alternativas*



*Figura 3.9. Modo absoluto para 3 y 4 alternativas*

Pero es posible que queramos obtener la mejor alternativa en términos “absolutos”. En este caso el NIS se correspondería con la peor alternativa que pudiéramos obtener en el espacio de las alternativas. En nuestro ejemplo se correspondería con (0, 0), de igual forma el PIS debería corresponderse con la mejor alternativa posible (5, 5), y que reflejamos en la Figura 3.9. Estas alternativas pueden ser reales o no.

Por tanto lo que conseguimos es que  $A^- = (0, 0)$  y que  $A^+ = (0.5, 0.5)$ , que se corresponde con los pesos de los criterios, al igual que el modelo relativo.

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.200	1.000	$v_1$	0.100	0.500
$A_2$	4	2	$n_2$	0.800	0.400	$v_2$	0.400	0.200
$A_3$	3	3	$n_3$	0.600	0.600	$v_3$	0.300	0.300
$F_1$	5	5	$nF_1$	1.000	1.000	$vF_1$	0.500	0.500
$F_2$	0	0	$nF_2$	0.000	0.000	$vF_2$	0.000	0.00
$x_{ij}^{\max}$	5	5						
Ranking								
$A^+$ 0.500 0.500								
$A^-$ 0.000 0.000								

Ranking						
$d^+ A_1$	0.400	$d^- A_1$	0.509	$RA_1$	0.560	3
$d^+ A_2$	0.316	$d^- A_2$	0.447	$RA_2$	0.586	2
$d^+ A_3$	0.283	$d^- A_3$	0.424	$RA_3$	0.600	1

**Tabla 3.12. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias**

Para ello lo que debemos hacer es introducir dos alternativas ficticias  $F_1 = (Max S, Max S)$  y  $F_2 = (Min S, Min S)$  siendo  $S$  el espacio de las valoraciones. De esta forma y para nuestro caso particular  $F_1 = (5, 5)$  y  $F_2 = (0, 0)$ . Donde los resultados del algoritmo se pueden ver en la tabla 3.12.

Si en vez de considerar criterios de beneficio, consideráramos criterios de costes, el razonamiento para  $A^+$  y  $A^-$  sería el opuesto.

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.200	1.000	$v_1$	0.100	0.500
$A_2$	4	2	$n_2$	0.800	0.400	$v_2$	0.400	0.200
$A_3$	3	3	$n_3$	0.600	0.600	$v_3$	0.300	0.300
$A_4$	5	1	$n_4$	1.000	0.200	$v_4$	0.500	0.100
$F_1$	5	5	$nF_1$	1.000	1.000	$vF_1$	0.500	0.500
$F_2$	0	0	$nF_2$	0.000	0.000	$vF_2$	0.000	0.00
$x_{ij}^{\max}$	5	5						
Ranking								
$A^+$ 0.500 0.500								
$A^-$ 0.000 0.000								

Ranking						
$d^+ A_1$	0.400	$d^- A_1$	0.509	$RA_1$	0.560	3
$d^+ A_2$	0.316	$d^- A_2$	0.447	$RA_2$	0.586	2
$d^+ A_3$	0.283	$d^- A_3$	0.424	$RA_3$	0.600	1
$d^+ A_4$	0.400	$d^- A_4$	0.510	$RA_4$	0.560	3

**Tabla 3.13. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias y la inclusión de una nueva**

Si introducimos la cuarta alternativa vemos como los valores que nos aparecen son los mismos que tenemos para las tres primeras, es decir  $R_1 = 0.560$ ,  $R_2 = 0.586$ ,  $R_3 = 0.600$  y  $R_4 = 0.560$ ,  $A_3 > A_2 > A_1 = A_4$ . Como vemos esto es debido a que los valores de referencia son  $A+$  y  $A-$  y no varían con el número de alternativas que podamos considerar.

Por tanto confirmamos que las tres alternativas tienen el mismo ranking, con lo que no existe inversión de orden.

## **3.4. Referencias**

### **3.4.1. Figuras y Tablas**

Figura 3.1. Esquema de valoración de alternativas

Figura 3.2. Diagrama de flujo del proceso de analítico jerárquico A.H.P [7].

Figura 3.3. Jerarquía en A.H.P.

Figura. 3.4. Jerarquía AHP aplicada a nuestro proyecto.

Figura 3.5. Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal

Figura 3.6. Pasos del método Topsis

Figura 3.7. Concepto PIS y NIS para el modo relativo y el modo absoluto

Figura 3.8. Modo relativo para 3 y 4 alternativas

Figura 3.9. Modo absoluto para 3 y 4 alternativas

Tabla 3.1. Propuestas de escala de asignación directa

Tabla 3.2. Escala fundamental de comparación pareada [9]

Tabla 3.3. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n)

Tabla 3.4. Matriz de valoración [1]

Tabla 3.5. Criterios y subcriterios en nuestro proyecto

Tabla 3.6. Matriz de decisión

Tabla 3.7. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio

Tabla 3.8. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio al que se le ha añadido una nueva alternativa

Tabla 3.9. Métodos de normalización

Tabla 3.10. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma

Tabla 3.11. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma con inclusión de una nueva alternativa

Tabla 3.12. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e incluso de alternativas ficticias

Tabla 3.13. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e incluso de alternativas ficticias y la inclusión de una nueva alternativa

### 3.4.2. Texto

[1]. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maurtua\\_od/cap2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maurtua_od/cap2.pdf)

[3]. Tesis Doctoral de M<sup>a</sup> del Socorro García Cáscas.

<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1022/1/Msgc.pdf>

[4] T. Saaty, *The analytic hierarchy process* McGraw-Hill, New York, 1980.

[5] T. Saaty, *Fundamentals of decision making and priority theory*. Pittsburgh: RWS Publications, 1994.

[6] G. Vargas, "An overview of the Analytic Hierachy Process and its Applications," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, pp. 2- 8, 1990.

[7] W. Ho, P. K. Dey, and H. Higson, "Mutiple criteria decision-making techniques in higher education," *International Journal of Educational Management*, vol. 20, no. 5, pp. 319-337, 2006.

[8] J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of games and economic behaviour*. Princeton: Princeton University Press, 1944.

[9] T. Saaty, "An exposition of the AHP. In reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process", " *Management science*, vol. 36, no. 3, pp. 259-268, 1990.

[10] J. Aguarón and J. Moreno-Jimenez, "The geometric consistency index: Approximated thresholds," *European Journal of Operational Research*, vol. 147, no. 1, pp. 137-145, 2003.

- [11] C. H. Coombs, "On the use of inconsistency of preferences in psychological measurement," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 55, pp. 1-7, 1958.
- [12] M. Zeleny, "Compromise programming," in *Multi criteria decision making*. J.-L. Cochrane and M. Zeleny, Eds. Columbia: University of South Carolina. USA, 1973, pp. 262-301.
- [13] M. Zeleny, *Multiple criteria decision making*. New-York: McGrawHill, 1982.
- [14] P. L. Yu, "A class of solutions for group decision problems," *Management science*, vol. 19, no. 8, pp. 936-946, 1973.
- [15] S. Barba-Romero and J. Pomerol, *Decisiones Multicriterio, Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica* Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, 1997.
- [16] C. L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*, Springer, Berlin Heidelberg ed 1981.
- [17] B. V. Dasarathy, "Smart: Similarity measured anchored ranking technique for the analysis of multidimensional data," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-6, no. 10, pp. 708-711, 1976.
- [18] R. D. Luce and H. Raiffa, *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey* New York. John Wiley and Sons, 1957.
- [19] C. Kahraman, G. Büyüközkan, and N. Y. Ates, "A two phase multiattribute decision-making approach for new product introduction," *Information Sciences*, vol. 177, no. 7, pp. 1567-1582, Apr.2007.
- [20] A. Kaufmann and Gupta M.M., *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science* North Holland, 1988.
- [21] A. S. Milani, A. Shanian, R. Madoliat, and J. A. Nemes, "The effect of normalization norms in multiple attribute decision making models: a case study in gear material selection," *Industrial Applications*, vol. 29, p. -312, 2005.
- [22] Saaty TL. 1980 the Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill. New York

# Capítulo 4. Lógica Fuzzy.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## CAPÍTULO 4: LÓGICA FUZZY.

### 4.1. Introducción.

La lógica difusa, como su nombre indica, es una lógica alternativa a la lógica clásica introducido por Zadeh (1965), que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que califica. En el mundo real existe mucho conocimiento no-perfecto, es decir, conocimiento vago, impreciso, incierto, ambiguo, inexacto, o probabilístico por naturaleza. El razonamiento y pensamiento humano frecuentemente conlleva información de este tipo, probablemente originada de la inexactitud inherente de los conceptos humanos y del razonamiento basado en experiencias similares pero no idénticas a experiencias anteriores. El problema principal surge de la poca capacidad de expresión de la lógica clásica.

**NOTA:** A la hora de traducir el término inglés fuzzy, se barajaron principalmente dos alternativas: borroso y difuso. Aunque en alguna bibliografía se habla aún de Lógica Borrosa o Teoría de los conjuntos borrosos, se utiliza más el término difuso.

#### 4.1.1. Ejemplo de Lógica Fuzzy

Supongamos por ejemplo que tenemos un conjunto de personas que intentamos agrupar según su altura, clasificándolas en *altas* o *bajas*. La solución que presenta la lógica clásica es definir un umbral de pertenencia (por ejemplo, un valor que todo el mundo considera que de ser alcanzado o superado, la persona en cuestión puede llamarse *alta*). Si dicho umbral es 1.80, todas las personas que midan 1.80 o más serán *altas*, mientras que las otras serán *bajas*. Según esta manera de pensar, alguien que mida 1.79 será tratado igual que otro que mida 1.50, ya que ambos han merecido el calificativo de *bajas*. Sin embargo, si dispusiéramos de una herramienta para caracterizar las alturas de forma que las transiciones fueran suaves, estaríamos reproduciendo la realidad mucho más fielmente.

Asimismo, no hay un valor cuantitativo que defina el término joven. Para alguna gente, 25 años es joven, mientras que para otros, 35 es joven. Incluso el concepto puede ser relativo al contexto. Un presidente de gobierno de 35 años es joven, mientras que un futbolista no lo es. Hay sin embargo cosas que están claras: una persona de 1 año es joven, mientras que una de 100 años no lo es. Pero una persona de 35 años tiene algunas posibilidades de ser joven (que normalmente dependen del contexto). Para representar este hecho, definiremos el conjunto joven de modo que cada uno de sus elementos pertenezca a él con cierto grado (posibilidad). De un modo más formal, un conjunto difuso  $A$  se caracteriza por una función de pertenencia:

$$\mu_A = U \rightarrow [0, 1]$$

que asocia a cada elemento  $x$  de  $U$  un número  $\mu_A(x)$  del intervalo  $[0,1]$ , que representa el grado de pertenencia de  $x$  al conjunto difuso 'A'. A 'U' se le llama *universo de discurso*. Por ejemplo, el término difuso *joven* puede definirse mediante el conjunto difuso siguiente:

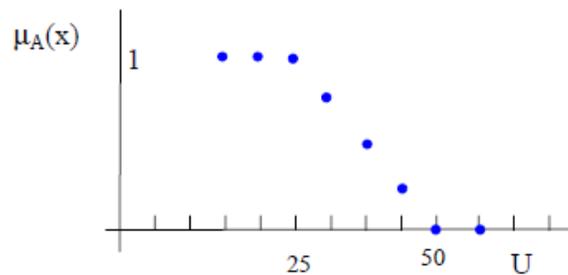
Edad	Grado de Pertenencia
$\leq 25$	1.0
30	0.8
35	0.6
40	0.4
45	0.2
$\geq 50$	0.1

*Tabla 4.1. Conjunto difuso "joven"*

Es decir, la función de pertenencia del conjunto difuso *joven* viene dada por:

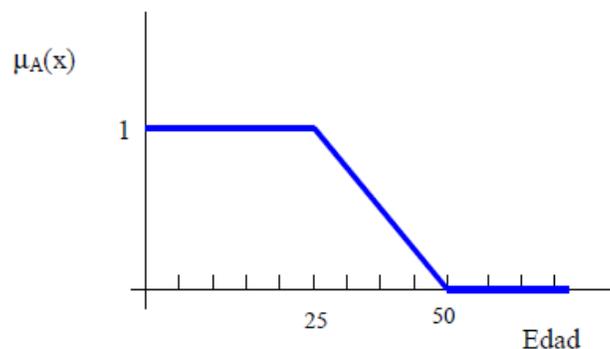
$$\mu_A(x) = 1 \text{ si } x \leq 25; \mu_A(30) = 0.8, \dots, \mu_A(x) = 0 \text{ si } x \geq 50$$

Que podemos representar en la siguiente gráfica:



*Figura 4.1. Función de pertenencia del conjunto difuso joven*

Si el universo de discurso es continuo, tendremos funciones de pertenencia continuas:



*Figura 4.2. Función de pertenencia de joven si U es continuo*

En general, si una función de pertenencia se da especificando los valores correspondientes a un conjunto discreto de elementos del universo de discurso, el valor asociado al resto de los elementos se obtiene por interpolación (utilizando la ecuación de la recta que une los dos puntos, así se hace en FuzzyCLIPS).

El origen del interés actual por la teoría de conjuntos difusos se debe a un artículo

publicado por Lofti Zadeh en 1.965. En la actualidad es un campo de investigación muy importante, tanto por sus implicaciones matemáticas o teóricas como por sus aplicaciones prácticas. Prueba de esta importancia es el gran número de revistas internacionales (Fuzzy Sets and Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems..) congresos (FUZZ-IEEE, IPMU, EUSFLAT, ESTYLF...) y libros (Kruse, 1994), (McNeill, 1994), (Mohammad, 1993), (Pedrycz, 1998) dedicados al tema.

#### **4.1.2. ¿En qué situaciones es útil aplicar la lógica difusa?**

- En procesos complejos, si no existe un modelo de solución sencillo.
- Cuando haya que introducir la experiencia de un operador “experto” que se base en conceptos imprecisos.
- Cuando ciertas partes del sistema a controlar son desconocidas y no pueden medirse de forma fiable (con errores posibles).
- Cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras.

En general, cuando se quieran representar y operar con conceptos que tengan imprecisión o incertidumbre.

Algunas aplicaciones importantes de la lógica difusa son:

- *Control de sistemas:* Control de tráfico, control de vehículos (helicópteros...), control de compuertas en plantas hidroeléctricas, centrales térmicas, control en máquinas lavadoras, control de metros (mejora de su conducción, precisión en las paradas y ahorro de energía), ascensores...
- *Predicción y optimización:* Predicción de terremotos, optimizar horarios...
- *Reconocimiento de patrones y Visión por ordenador:* Seguimiento de objetos con cámara, reconocimiento de escritura manuscrita, reconocimiento de objetos, compensación de vibraciones en la cámara, sistemas de enfoque automático...
- *Sistemas de información o conocimiento:* Bases de datos, sistemas expertos...

## **4.2. Teoría de los Conjuntos difusos**

### **4.2.1. Teoría de Conjuntos Clásicos (Conjuntos nítidos)**

Los Conjuntos Clásicos (nítidos en la terminología de lógica difusa) surgen de forma natural por la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Por ejemplo, si pensamos en los productos de alimentación, podemos hacer varios conjuntos:

*Frutas:* Manzana, Pera, plátano, etc.

Verduras: Calabacín, Espinaca, ...

Carnes: ...

Pescados:...

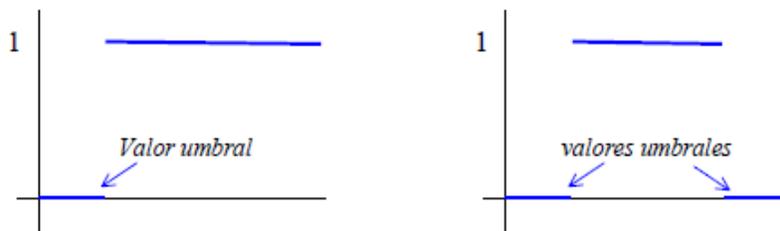
Los conjuntos nítidos pueden definirse de varias formas:

- *Mediante un listado de sus elementos:*  $Frutas = \{manzana, pera, \dots\}$
- *Mediante una función de pertenencia*  $\mu$  que toma valores 0 o 1 definida sobre el universo de discurso  $U$  (todos los elementos que pueden o no pertenecer al conjunto):

Por ejemplo: Sea  $U$  el conjunto de todos los alimentos. Entonces  $Frutas$  es un conjunto tal que  $\mu(\text{manzana})=1$ ,  $\mu(\text{pargo})=0$ , etc. De este modo, para definir un conjunto nítido  $A$  podemos utilizar la función de pertenencia dada por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin A \\ 1 & \text{si } x \in A \end{cases}$$

Es decir, una función tipo escalón centrada en el valor/valores umbral/umbrales de decisión.



**Figura 4.3. Funciones escalón**

Si se utilizan funciones de pertenencia, la forma de representar el vacío y el conjunto universo será:

- El vacío  $\emptyset$  es un conjunto tal que para todo  $x$  de  $U$ ,  $\mu(x)=0$
- El conjunto universo es tal para todo  $x$  de  $U$ ,  $\mu(x)=1$
- *Dando una característica que defina sus elementos.* Esto se puede hacer de varias formas:
  - Dando directamente la definición: Fruto = Producto del desarrollo del ovario de una flor después de la fecundación.
  - Como un subconjunto de un conjunto ya definido: Frutas = Fruto comestible

## 4.2.2. Conjuntos Difusos

En los conjuntos difusos relajamos la restricción de que la función de pertenencia valga 0 ó 1, y dejamos que tome valores en el intervalo  $[0,1]$ . La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge de un hecho: hay conceptos que no tienen límites claros.

Por ejemplo: ¿Una persona que mide 1.80 es *alta*? ¿Una temperatura de 15 grados es *baja*?. Vemos que, a diferencia de lo que ocurre en el caso de las frutas (no hay vaguedad, un alimento o bien es una fruta o bien no lo es), en otras situaciones nos vemos obligados a tratar con ella.

Veamos algunas definiciones útiles:

- Llamaremos *variable lingüística* a aquella noción o concepto que vamos clasificar de forma difusa. Por ejemplo: la altura, la edad, el error, la variación del error... Le aplicamos el adjetivo "lingüística" porque definiremos sus características mediante el lenguaje hablado.
- Llamaremos *universo de discurso* al rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística. En el caso de la variable lingüística 'altura de una persona normal', sería el conjunto de valores comprendido entre 1.4 y 2.3 m.
- Llamamos *valor lingüístico* a las diferentes clasificaciones que efectuamos sobre la variable lingüística: en el caso de la altura, podríamos dividir el universo de discurso en los diferentes valores lingüísticos: por ejemplo *bajo*, *mediano* y *alto*.
- Llamaremos conjunto difuso a un valor lingüístico junto a una función de pertenencia. El valor lingüístico es el "nombre" del conjunto, y la función de pertenencia se define como aquella aplicación que asocia a cada elemento del universo de discurso el grado con que pertenece al conjunto difuso. Decimos que un conjunto es *nítido* si su función de pertenencia toma valores en  $\{0,1\}$ , y *difuso* si toma valores en  $[0,1]$ .
- Dado un conjunto difuso A, se define como *alfa-corte* de A, al conjunto de elementos que pertenecen al conjunto difuso A con grado mayor o igual que alfa, es decir:

$$A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

- Se define como *alfa corte estricto* al conjunto de elementos con grado de pertenencia estrictamente mayor que alfa, es decir:

$$A_{\bar{\alpha}} = \{x \in X / \mu_A(x) > \alpha\}$$

- Se define como *soporte* de un conjunto difuso A, al conjunto nítido de elementos que tienen grado de pertenencia estrictamente mayor que 0, o sea, al alfa-corte

estricto de nivel 0.

$$\text{Soporte}(A) = \{ x \in X / \mu_A(x) > 0 \}$$

- Se define como *núcleo* de un conjunto difuso A, al conjunto nítido de elementos que tienen grado de pertenencia 1. (alfa-corte de nivel 1)

$$\text{Núcleo}(A) = \{ x \in X / \mu_A(x) = 1 \}$$

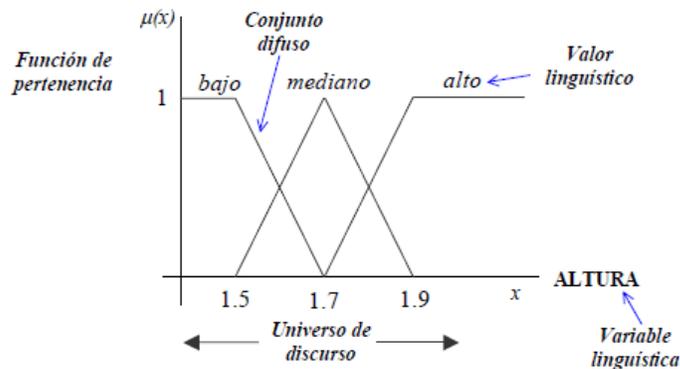
- Se define la *altura* de un conjunto difuso A como el valor más grande de su función de pertenencia.
- Se dice que un conjunto difuso está *normalizado* si y solo si su núcleo contiene algún elemento (o alternativamente, si su altura es 1), es decir:

$$\exists x \in X \mu_A(x) = 1$$

- El elemento x de U para el cual  $\mu_F(x) = 0.5$  se llama el *punto de cruce*.
- Un conjunto difuso cuyo soporte es un único punto x de U y tal que la función de pertenencia de x es 1 (es decir, el soporte coincide con el núcleo y tienen un único punto) se llama un *conjunto difuso unitario (singleton)*.

Comentamos un ejemplo sencillo para entender con mejor claridad, la aplicación de los conjuntos difusos;

Consideremos la variable lingüística “Altura de los seres humanos”, que toma valores en el universo de discurso  $U = [1.4, 2.50]$ . Vamos a hacer una clasificación difusa de los seres humanos en tres conjuntos difusos (o valores lingüísticos): *bajos*, *medianos* y *altos*.



**Figura 4.4. Altura de los seres humanos**

En esta ilustración hemos dibujado 3 conjuntos difusos sobre la variable lingüística altura, cuyos valores lingüísticos asociados son *bajo*, *mediano* y *alto* respectivamente.

Las funciones de pertenencia son de tipo L para *bajo*, Lambda o Triángulo para el *mediano* y Gamma para el *alto*. Más adelante aclararemos porqué usamos estos nombres, que únicamente determinan qué forma tendrán las funciones de pertenencia. De este modo si Luis mide 1.80 metros, la lógica difusa nos dice que es un 0.2 mediano y un 0.8 alto. De este modo expresamos que mientras un elemento puede estar dentro de un determinado conjunto, puede no cumplir las especificaciones de dicho conjunto al cien por cien (por ejemplo, en el caso de Luis, a la vista del resultado podríamos afirmar que es *poco mediano* y *más bien alto*).

En este ejemplo, dado el conjunto difuso mediano tenemos que:

- El alfa-corte 0.5 es el intervalo [1.6,1.8]
- El alfa corte estricto 0.5 es el intervalo (1.6, 1.8)
- El soporte es (1.5, 1.9)
- El núcleo es 1.7
- Es un conjunto difuso normalizado
- Tiene dos puntos de cruce: 1.6 y 1.8

La notación habitual para los conjuntos difusos es la definida por Lofti Zadeh, que es la siguiente: sea A un conjunto difuso definido sobre el universo U:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\}$$

que indica que A está formado por todos los pares ordenados x y el resultado de la función de pertenencia para todo elemento u dentro del universo de discurso U. Para denotar el conjunto difuso A:

$$\text{Si el universo es discreto: } \sum_U \mu_A(x) / x$$

$$\text{Si el universo es continuo: } F = \int \mu_A(x) / x$$

**NOTA:** ¡Cuidado con esta notación! El sumatorio o la integral pierden su significado habitual, en lógica difusa quieren simbolizar una mera enumeración de tuplas. La barra tampoco indica una fracción sino que simplemente separa los dos elementos de la tupla.

Así por ejemplo el conjunto difuso discreto "Tirada alta del dado" podría definirse como:

$$F = \{0/1 + 0/2 + 0.3/3 + 0.6/4 + 0.9/5 + 1/6\}$$

La parte derecha de la tupla indica el elemento y la parte izquierda el grado de pertenencia.

Los conjuntos difusos y las funciones de pertenencia pueden emplearse de dos formas posibles:

- Para estimar grados de pertenencia a un conjunto. Por ejemplo, si nos dicen que una persona mide 170 cm, ¿en qué grado es una persona alta?
- Para expresar *posibilidades* en una situación en la que se dispone de información incompleta. Por ejemplo, si nos dicen que una persona es mediana, ¿cuál será su altura? En este caso la función de pertenencia  $\mu$  puede interpretarse como una *distribución de posibilidad* que nos indica la preferencia sobre los valores que una variable de valor desconocido puede tomar.

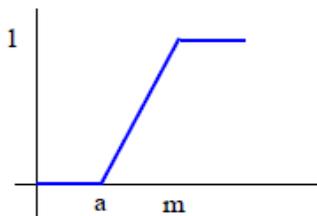
De este modo vemos que la principal diferencia entre la teoría de conjuntos clásica y la difusa es que mientras que los valores de la función de pertenencia de un conjunto nítido son siempre 0 o 1, la función de pertenencia de un conjunto difuso toma valores en todo el intervalo  $[0,1]$  (se suele normalizar el grado de pertenencia máximo a 1). De este modo vemos que, al contrario de los conjuntos nítidos, que pueden definirse de varias formas, los conjuntos difusos vienen siempre definidos por su función de pertenencia. Veamos qué tipos de funciones de pertenencia se usan más habitualmente en la lógica difusa.

#### 4.2.2.1. Funciones de pertenencia

Aunque en principio cualquier función sería válida para definir conjuntos difusos, en la práctica hay ciertas funciones típicas que siempre se suelen usar, tanto por la facilidad de computación que su uso conlleva como por su estructura lógica para definir su valor lingüístico asociado. Las funciones más comunes son:

- Función GAMMA ( $\Gamma$ ):

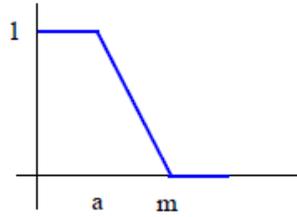
$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } x \in (a, m) \\ 1 & \text{si } x \geq m \end{cases}$$



$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{para } a < x < m \\ 1 & \text{para } x \geq m \end{cases}$$

- Función L:

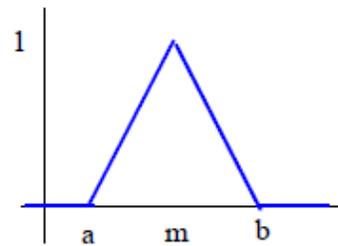
Puede definirse simplemente como 1 menos la función GAMMA



- Función LAMBDA o triangular:

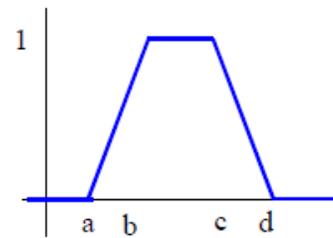
$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } x \in (a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{si } x \in (m, b) \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{para } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{para } m < x \leq b \\ 0 & \text{para } x > b \end{cases}$$



- Función PI o trapezoidal:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{para } a < x \leq b \\ 1 & \text{para } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{para } c < x \leq d \\ 0 & \text{para } x > d \end{cases}$$

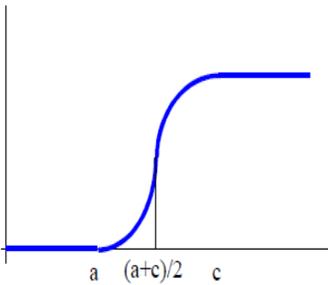


Las funciones L y GAMMA se usan para calificar valores lingüísticos extremos, tales como *bebé* o *anciano*, respectivamente. Las funciones PI y LAMBDA se usan para describir valores intermedios (como *joven*, de *mediana edad*, *maduro*). Su principal diferencia reside en que la función PI implica un margen de tolerancia alrededor del valor

que se toma como más representativo del valor lingüístico asociado al conjunto difuso.

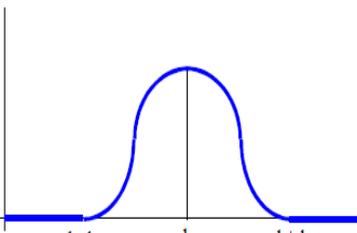
También se pueden utilizar otras funciones que no sean lineales a trozos. Por ejemplo, en FuzzyCLIPS se utilizan las siguientes funciones:

- Función s, definida mediante;

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ 2 \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^2 & \text{para } a \leq x \leq \frac{a+c}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^2 & \text{para } \frac{a+c}{2} \leq x \leq c \\ 1 & \text{para } x \geq c \end{cases}$$


- Función z, que es la función opuesta,  $\mu_z(x) = 1 - \mu_s(x)$

- Función  $\Pi$ , definida mediante;

$$\mu_{\Pi}(x) = \begin{cases} \mu_s(x) & \text{para } x \leq b \\ \mu_z(x) & \text{para } x > b \end{cases}$$


#### 4.2.2.2. Etiquetas lingüísticas

Tradicionalmente se han utilizado modificadores de los conjuntos difusos a los que llamamos etiquetas lingüísticas, equivalentes a lo que en lenguaje natural serían los adverbios. La interpretación en el modelo difuso de estos enunciados consiste en la composición de la función de pertenencia con una operación aritmética simple. Por ejemplo, es habitual considerar como interpretación del adverbio *muy* el cuadrado de la función de pertenencia original, Es decir, “Juan es muy alto” se interpretaría como:

$$\mu_{MUY\ ALTO}(x) = (\mu_{ALTO}(x))^2$$

Existe una amplia bibliografía sobre el tema, de la que podemos entresacar algunas interpretaciones clásicas de los adverbios, aunque no siempre serán las más adecuadas a un

problema de representación del conocimiento concreto:

$$MUY \quad \mu_{MUY A}(x) = (\mu_A(x))^2$$

De este modo, si el grado de pertenencia de una persona a la clase *alto* es 0.5, el grado de pertenencia a la clase muy alto es sólo 0.25.

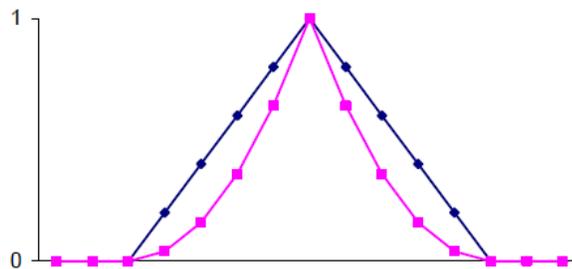
$$ALGO \quad \mu_{ALGO A}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}$$

Así, si el grado de pertenencia de una persona a la clase alto es 0.5, el grado de pertenencia a la clase algo alto es de 0.707.

Existe todo un catálogo de posibles adverbios y sus modificadores asociados, pero las modificaciones que más usualmente se aplican a un conjunto difuso son las siguientes:

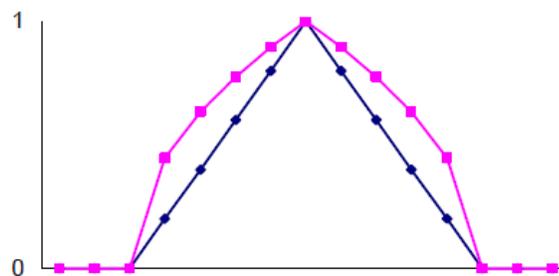
- *Normalización*, al convertir un conjunto difuso no normalizado en uno normalizado (dividiendo por la altura del conjunto).
- *Concentración*, al componer con una función tipo  $f(y)=y^p$ , con  $p>1$ . El efecto es que la función de pertenencia toma valores más pequeños, centrándose en los valores mayores.

El efecto de aplicar la concentración puede verse en la siguiente figura 4.5. (la función de pertenencia base es la azul, y la modificada la rosa):



**Figura 4.5. Función concentración.**

- *Dilatación*, al componer con una función tipo  $f(y)=y^p$  con  $0<p<1$  (o también con  $2y-y^2$ ). El efecto es el contrario a la concentración.

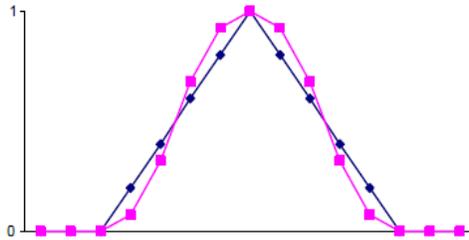


**Figura 4.6. Función dilatación.**

- *Intensificación del contraste.* Se disminuyen los valores menores a 1/2 y se aumentan los mayores. Componemos con una función del tipo:

$$f(x) = \begin{cases} 2^{p-1}y^p & \text{para } y \leq 0.5 \\ 1 - 2^{p-1}(1-y)^p & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde  $p > 1$ . Normalmente se suele poner  $p=2$  (a mayor  $p$ , mayor intensificación). El efecto es:

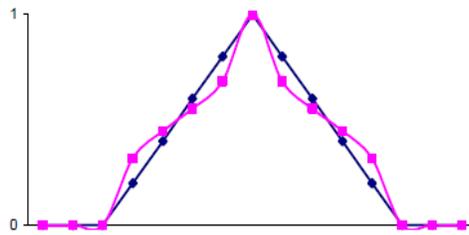


**Figura 4.7. Función intensificación del contraste**

- *Difuminación.* Efecto contrario al anterior. Se compone con la función:

$$f(y) = \begin{cases} \sqrt{y/2} & \text{para } y \leq 0.5 \\ 1 - \sqrt{(1-y)/2} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Cuyo efecto es;



**Figura 4.8. Función difuminación**

Los adverbios o modificadores pueden componerse entre sí, obteniendo múltiples combinaciones para representar enunciados complejos como “Juan es mucho más que alto”. FuzzyCLIPS tiene varios modificadores predefinidos:

Nombre del modificador	Descripción del modificador
Not	$1-y$
Very (muy)	$y^2$
Somewhat (algo)	$y^{1/3}$
More-or-less (más o menos)	$y^{1/2}$
Extremely (extremadamente)	$y^3$

**Tabla 4.2. FuzzyCLIPS**

y también admite la definición de nuevos modificadores por el usuario.

### 4.2.3. Operaciones elementales con conjuntos difusos

Al igual que en la teoría clásica de conjuntos, sobre los conjuntos difusos podemos definir las operaciones de unión, intersección, complementario, etc.

#### 4.2.3.1. Complementario

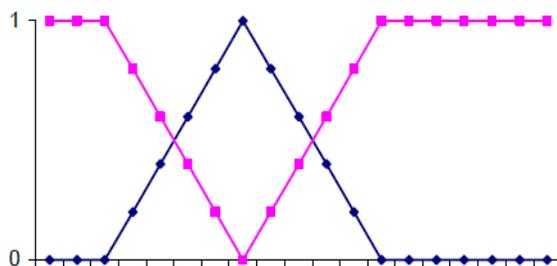
Dado un conjunto A, el conjunto complementario de A está formado por los elementos del universo que no pertenecen a A. En el caso difuso, este conjunto vendrá definido por una función de pertenencia que se calcula para cada elemento a partir de su pertenencia al conjunto A. Es decir:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = c(\mu_A(x))$$

Siendo c una función  $c: [0,1] \rightarrow [0,1]$  que, dado el grado de pertenencia al conjunto A, nos da el grado de pertenencia al conjunto complementario de A. A esta función c desde un punto de vista intuitivo deben exigírseles las siguientes características:

- **c1.** concordancia con el caso nítido  $c(1) = 0$  y  $c(0) = 1$
- **c2.** estrictamente decreciente  $\forall \alpha, \beta \in [0,1] \alpha > \beta \Rightarrow c(\alpha) < c(\beta)$
- **c3.** involución  $\forall \alpha \in [0,1] c(c(\alpha)) = \alpha$

En general se considera como función del complementario a  $c(\alpha) = 1 - \alpha$ . Así, para el conjunto difuso definido por una función triangular (por ejemplo, el conjunto difuso *mediano*) su complemento sería;



*Figura 4.9.*

aunque también existen otras variantes que cumplen las propiedades antes citadas como:

- Complementario de Yager  $c_w(\alpha) = (1 - \alpha^w)^{1/w}$   $w \in [0, \infty]$

Para una función triangular y con  $w = 2$ , tendríamos;

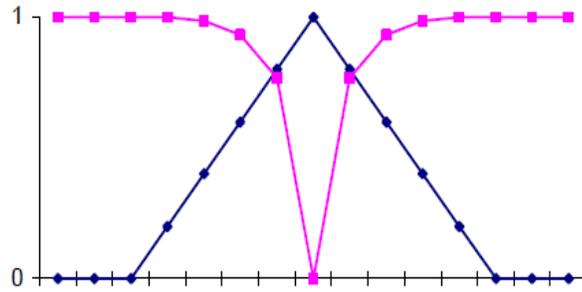


Figura 4.10.

- Clase de complementarios de Sugeno  $c_\lambda(\alpha) = \frac{1-\alpha}{1-\lambda\alpha}$   $\lambda \in [0, 1]$

Para  $\lambda = 1/2$ ;

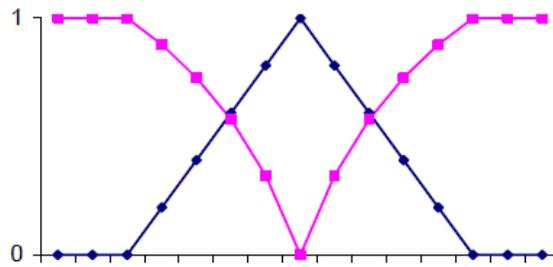


Figura 4.11.

### 4.2.3.2. Intersección

En teoría de conjuntos clásica, se considera que un elemento pertenece al conjunto intersección de dos conjuntos si pertenece a ambos. En el caso difuso el problema consiste en determinar el grado de pertenencia al conjunto intersección, conocido el grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos originales. Supongamos:

$$\mu_{A \cap B}(x) = i(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Donde;  $i: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$

Análogamente al caso anterior, imponemos las siguientes condiciones;  $\forall \alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$

- **i1.** concordancia con el caso nítido  $i(0,1) = i(0,0) = i(1,0) = 0$ ;  $i(1,1) = 1$
- **i2.** Conmutatividad  $i(\alpha,\beta) = i(\beta,\alpha)$
- **i3.** Asociatividad  $i(\alpha,i(\beta,\gamma)) = i(i(\alpha,\beta),\gamma)$
- **i4.** Identidad  $i(\alpha,1) = \alpha$

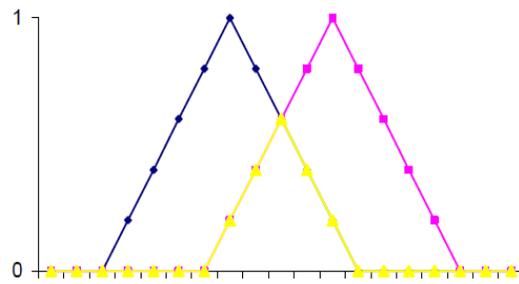
➤ **i5.** monotonía si  $\alpha \leq \alpha'$   $\beta \leq \beta'$ , entonces  $i(\alpha, \beta) \leq i(\alpha', \beta')$

Si se verifican los axiomas anteriores  $([0,1], i)$  tiene estructura de semigrupo abeliano con elemento neutro. Las funciones  $i$  que verifican esta propiedad se llaman dentro de la teoría de conjuntos difusos *normas triangulares* (t-normas).

Las t-normas usadas más habitualmente son las siguientes:

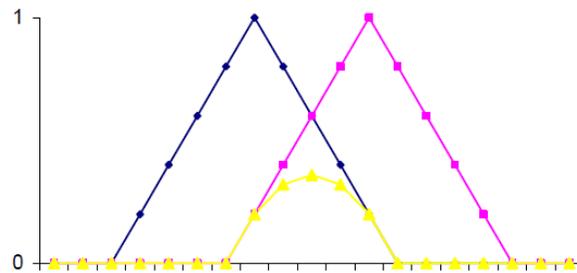
- t-norma del mínimo  $i_{\min}(\alpha, \beta) = \min(\alpha, \beta)$

Por ejemplo, si consideramos dos funciones tipo triangular (*niño, adolescente*), la t-norma del mínimo sería:



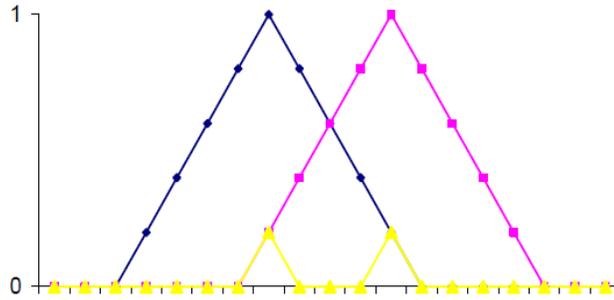
**Figura 4.12. Función t-norma del mínimo**

- t-norma del producto  $i^*(\alpha, \beta) = \alpha * \beta$



**Figura 4.13. Función t-norma del producto**

- t-norma del producto drástico  $i_{\inf}(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha & \text{si } \beta = 1 \\ \beta & \text{si } \alpha = 1 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$



**Figura 4.14. Función del producto drástico**

Aunque no siempre se puede decir que una t-norma es mayor que otra, se puede demostrar que toda t-norma verifica las siguientes desigualdades:

$$\forall \alpha, \beta \in [0,1] \quad i_{\text{inf}}(\alpha, \beta) \leq i(\alpha, \beta) \leq i_{\text{min}}(\alpha, \beta)$$

es decir, que la menor t-norma es la t-norma del producto drástico y la mayor t-norma es la norma del mínimo.

### 4.2.3.3. Unión

Al igual que en el caso anterior podemos declarar una axiomática intuitiva para la unión de dos conjuntos difusos. Sea:

$$\mu_{A \cup B}(x) = u(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Dónde  $u : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  que debe verificar:  $\forall \alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$

- **u1.** concordancia con el caso nítido  $u(0,1) = u(1,1) = u(1,0) = 1; u(0,0) = 0$
- **u2.** conmutatividad  $u(\alpha, \beta) = u(\beta, \alpha)$
- **u3.** Asociatividad  $u(\alpha, u(\beta, \gamma)) = u(u(\alpha, \beta), \gamma)$
- **u4.** identidad ( $A \cup \emptyset = A$ )  $u(\alpha, 0) = \alpha$
- **u5.** Monotonía así  $\alpha \leq \alpha', \beta \leq \beta'$ , entonces  $u(\alpha, \beta) \leq u(\alpha', \beta')$

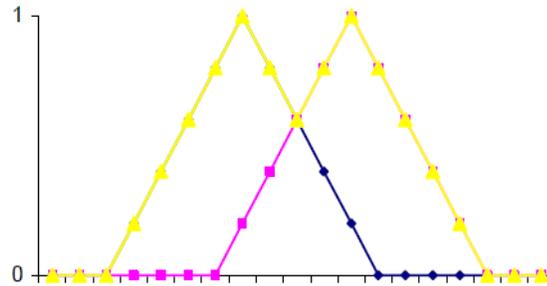
Además, sería deseable que se mantuvieran también las siguientes propiedades:

- **u6.** Leyes de De Morgan  $u(\alpha, \beta) = c(i(c(\alpha), c(\beta)))$   
 $i(\alpha, \beta) = c(u(c(\alpha), c(\beta)))$

Que nos permiten calcular el grado de la unión en función de los grados del complementario y la intersección. A las funciones que verifiquen estas seis propiedades se las llama *conormas triangulares* (t-conormas).

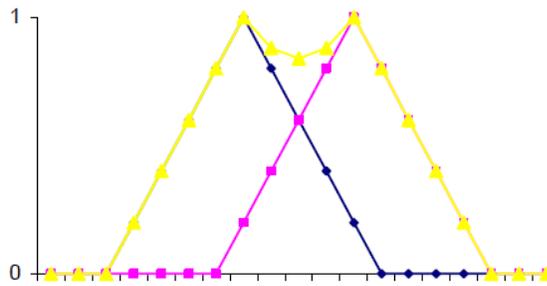
Considerando la función de complementación  $c(\alpha) = 1 - \alpha$ , las t-conormas correspondientes a las t-normas anteriores son:

- t-conorma del máximo  $u_{\max}(\alpha, \beta) = \max(\alpha, \beta)$



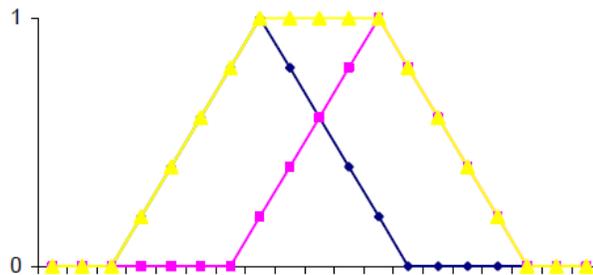
**Figura 4.15. Función t-conorma del máximo**

- t-conorma de la suma  $u^*(\alpha, \beta) = \alpha + \beta - \alpha * \beta$



**Figura 4.16. Función t-conorma de la suma**

- t-conorma de la suma drástica  $u_{\text{sup}}(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha & \text{si } \beta = 0 \\ \beta & \text{si } \alpha = 0 \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases}$



**Figura 4.17. Función t-conorma de la suma drástica**

Análogamente al caso de la intersección, se puede demostrar que cualquier t-conorma verifica las desigualdades:

$$\forall \alpha, \beta \in [0, 1] \quad u_{\max}(\alpha, \beta) \leq u(\alpha, \beta) \leq u_{\text{sup}}(\alpha, \beta)$$

Es decir, que la menor t-conorma es la del máximo y la mayor t-conorma la suma drástica.

Pero las condiciones que exigimos a la unión y a la intersección no garantizan en general que se cumplan las siguientes condiciones:  $\forall \alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$

- **I1:** Idempotencia ( $A \cap A = A$ )  $i(\alpha, \alpha) = \alpha$
- **I2:** Distributividad ( $A \cap (B \cup C) = \dots i(\alpha, u(\beta, \gamma)) = u(i(\alpha, \beta), i(\alpha, \gamma))$ )
- **U1 :** Idempotencia ( $A \cup A = A$ )  $u(\alpha, \alpha) = \alpha$
- **U2 :** Distributividad ( $A \cup (B \cap C) = \dots u(\alpha, i(\beta, \gamma)) = i(u(\alpha, \beta), u(\alpha, \gamma))$ )

Propiedades que sólo verifican la t-norma del mínimo y su t-conorma del máximo.

Podríamos también definir el conjunto vacío y el conjunto universal. El concepto de conjunto vacío corresponde al de aquel conjunto que no contiene ningún elemento. Por tanto, parece adecuado definirlo en la teoría de conjuntos difusos como:

$$\forall x \in X \mu_{\emptyset}(x) = 0$$

y consiguientemente el conjunto universal se definiría como:

$$\forall x \in X \mu_X(x) = 1$$

Pero asumiendo estas definiciones no se verifican en la teoría de conjuntos difusos algunos famosos teoremas de la teoría de conjuntos clásica, como:

$$A \cap \bar{A} = \emptyset$$

$$A \cup \bar{A} = X$$

que se conocen como el principio de contradicción y del tercio excluido, respectivamente (lógica aristotélica).

Si tomamos por ejemplo el conjunto difuso “joven” es fácil comprobar que no se cumplen ninguno de los dos principios.

Sin embargo es posible definir una t-norma y una t-conorma que satisfagan esto (la t-norma del producto acotado y la t-norma de la suma acotada), aunque entonces no se satisfarán las propiedades I1, I2, U1, U2.

#### 4.2.4. Razonamiento difuso

La teoría de conjuntos difusos nos permite representar hechos y relaciones vagas (imprecisas). Se entiende por razonamiento difuso el proceso de realizar inferencias a partir de hechos y relaciones difusas, así como la combinación de evidencias difusas y la actualización de la precisión de las creencias.

Una *proposición difusa simple* es aquella que asigna un valor a una variable difusa, por ejemplo: “la estatura de Pepe es *mediana*” o “la velocidad es *normal*”. Una proposición difusa tiene por tanto asociado un conjunto difuso A (el valor lingüístico asignado, “mediana” en este caso) y su correspondiente función de pertenencia  $\mu_A$  definida sobre los elementos del universo de discurso  $u \in U$ .

Una *proposición difusa compuesta* es aquella que se obtiene mediante la agrupación de dos o más proposiciones difusas simples, que pueden haber sido modificadas o no antes de la agrupación. Para agrupar proposiciones difusas simples podemos utilizar las conectivas Y y O, y para modificar una proposición difusa simple podemos utilizar el NO. Así por ejemplo podemos construir proposiciones difusas del tipo:

“la velocidad es *normal*” Y “el objeto está *cerca*”  
“la velocidad es *alta*” O “el objeto está *muy cerca*”  
“la velocidad NO es *alta*”

Los *operadores lógicos difusos* pueden definirse de forma análoga a como se definieron las operaciones entre conjuntos: sean p y q dos proposiciones difusas, A y B los conjuntos difusos que intervienen en ellas, con funciones de pertenencia  $\mu_A$  y  $\mu_B$  definidas respectivamente sobre universos de discurso U y V. Entonces, los operadores lógicos pueden definirse mediante:

- NO ( $\neg p$ ) vendrá definida por una función de pertenencia tipo complemento de A, por ejemplo  $\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u)$
- Y ( $p \wedge q$ ) vendrá definida por una función de pertenencia tipo intersección, por ejemplo  $\mu_{A \wedge B}(u, v) = \min(\mu_A(u), \mu_B(v))$
- O ( $p \vee q$ ) vendrá definida por una función de pertenencia tipo unión, por ejemplo  $\mu_{A \vee B}(u, v) = \max(\mu_A(u), \mu_B(v))$

Ahora tenemos que definir lo que significa una implicación, es decir, tenemos que asignar una función de pertenencia a una agrupación antecedente consecuente del tipo  $p \rightarrow q$ . Definir el significado de la implicación nos permitirá razonar con reglas del tipo:

SI “la velocidad es *normal*”  
ENTONCES “la fuerza de frenado debe ser *moderada*”

Esta función de pertenencia será del tipo:  $\mu_{p \rightarrow q}: U \times V \rightarrow [0, 1]$

$$(u,v) \rightarrow \mu_{p \rightarrow q}(u,v)$$

Al definir la relación de implicación surge una cuestión importante ¿qué se quiere representar mediante la relación de implicación? La cuestión es fundamental porque las relaciones de implicación son la base del razonamiento basado en reglas. Existen en principio dos posibilidades diferenciadas:

- a) Dar a la implicación el mismo significado que en la lógica clásica. Por ejemplo, en lógica clásica tenemos la equivalencia  $p \rightarrow q \equiv \neg p \vee q$ . De este modo, la función de pertenencia asociada a la regla “Si A entonces B”, donde A y B son conjuntos difusos sería:

$$\mu_{p \rightarrow q}(u,v) = \max(1 - \mu_A(u), \mu_B(v))$$

En lógica clásica también tenemos la equivalencia  $p \rightarrow q \equiv \sim(p \wedge (\sim q))$ , que conduciría a la siguiente definición:

$$\mu_{p \rightarrow q}(u,v) = 1 - \min[\mu_A(u), 1 - \mu_B(v)]$$

Ambas funciones son equivalentes.

- b) Dar a la implicación el significado de relaciones causa-efecto normalmente utilizada son los sistemas basados en conocimiento.

El primer caso se corresponde con la implicación lógica, al segundo podemos darle el nombre de “implicación causa-efecto”. Aunque la implicación lógica difusa es interesante desde el punto de vista teórico, conduce a una formulación inadecuada para muchas aplicaciones de sistemas basados en conocimiento, que representan las relaciones causa-efecto de un modo no consistente plenamente con la lógica. Queda entonces abierta la cuestión de cómo formalizar el significado de las relaciones de implicación causa-efecto. La más utilizada actualmente fue propuesta por Mamdani:

$$\text{IMPLICACIÓN DE MAMDANI: } p \rightarrow q \equiv p \wedge q \Rightarrow \mu_{p \rightarrow q}(u,v) = \min(\mu_A(u), \mu_B(v))$$

Para Mamdani, el grado de verdad de  $p \rightarrow q$  es idéntico al de la proposición A y B. Podríamos justificar esto diciendo que, para Mamdani, una condición tan sólo resulta cierta cuando el antecedente es cierto y el consecuente también.

#### 4.2.4.1. Inferencia difusa

Con la formalización anterior pueden representarse hechos y reglas difusas, y pueden realizarse inferencias aplicando reglas de inferencia. Veremos dos casos: antecedentes nítidos y antecedentes difusos.

##### Inferencia difusa con antecedentes difusos.

Vamos a suponer que tenemos una regla difusa del tipo: Si p ENTONCES q y un valor de entrada difuso  $p^*$ .

La conclusión será un hecho difuso  $q^*$ , del cual queremos saber su función de pertenencia.

### Ejemplo

Sean: la regla difusa  $p \rightarrow q \equiv$  “SI la velocidad es *normal*, ENTONCES la fuerza de frenado es *moderada*” el hecho difuso  $p^*$

El resultado de la inferencia será una proposición difusa  $q^*$  con su correspondiente conjunto difuso  $B^*$  asociado, que vendrá dado por la función de pertenencia  $\mu_{B^*}(v)$ . Supongamos que el hecho del que disponemos es  $p^* =$  “la velocidad es *alta*”. Vamos a ver dos tipos diferentes de inferencia:

- a) inferencia tipo max-min (implicación de Mamdani):  $\mu_{B^*}(v) = \min(z, \mu_B(u))$  donde  $z = \max(\min(\mu_{A^*}(u), \mu_A(u)),)$

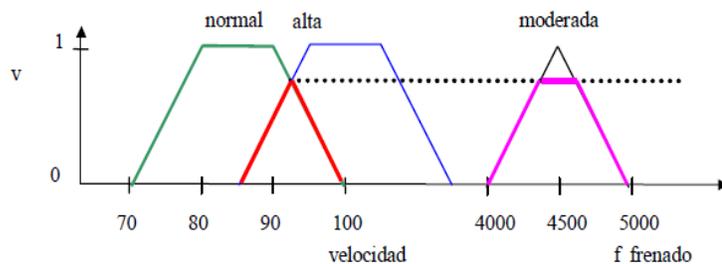


Figura 4.18. Función inferencia tipo max-min

Con este tipo de inferencia estamos considerando la implicación como una implicación de Mamdani.

- b) inferencia tipo max-prod:  $\mu_{B^*}(v) = \text{prod}(z, \mu_B(v))$  donde  $z = \max(\min(\mu_{A^*}(u), \mu_A(u)))$

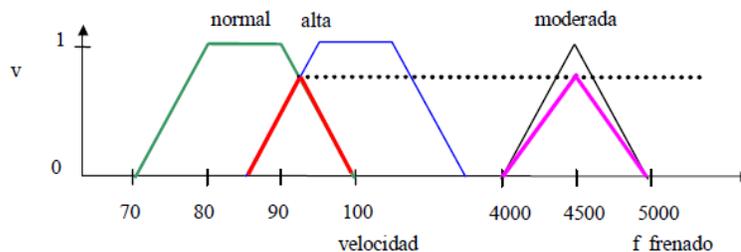
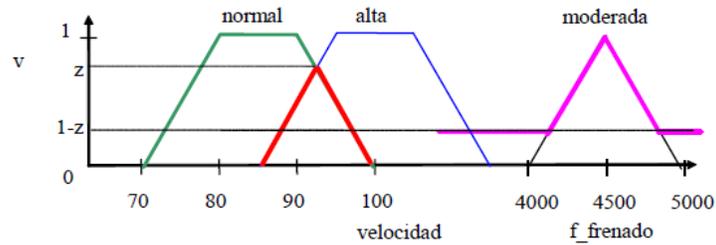


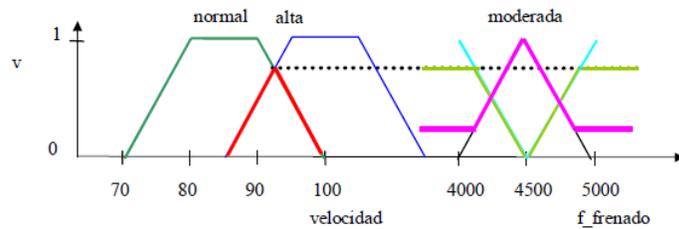
Figura 4.19. Función inferencia tipo max-pro

Se puede hacer otro tipo de inferencia interpretando la implicación como una implicación de la lógica en lugar de como una implicación de Mamdani. Para ello, las funciones utilizadas serían:  $\mu_{B^*}(v) = \max(1-z, \mu_B(v))$  cuyo resultado es:



**Figura 4.20. Función con implicación de la lógica (max)**

$$\text{Ó } \mu_B^*(v) = 1 - \min(z, 1 - \mu_B(v))$$



**Figura 4.21. Función con implicación de la lógica (min)**

### Inferencia difusa con antecedentes nítidos.

Vamos a suponer que tenemos una regla difusa del tipo: Si p ENTONCES q y un valor de entrada nítido  $p^*$ .

La conclusión será un hecho difuso  $q^*$ , del cual queremos saber su función de pertenencia.

#### Ejemplo:

Sean: la regla difusa  $p \rightarrow q \equiv$  “SI la velocidad es normal, ENTONCES la fuerza de frenado es moderada” el hecho nítido  $p^* \equiv$  “la velocidad es 75 km/h”

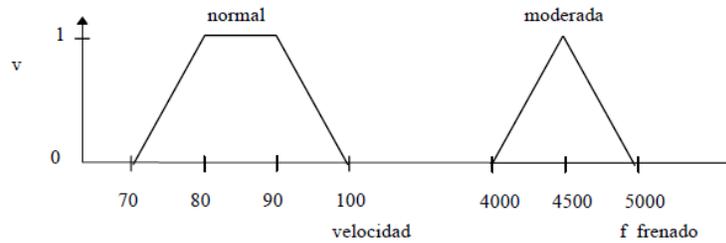
El hecho  $p^*$  puede utilizarse para disparar la regla y obtener así un valor difuso para la fuerza de frenado que debe aplicarse:

Velocidad = 75

SI velocidad = normal ENTONCES fuerza\_frenado = moderada

fuerza\_frenado =  $q^*$

Supongamos que las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos  $A = normal$  y  $B = moderada$  son los que se dan en la siguiente figura:



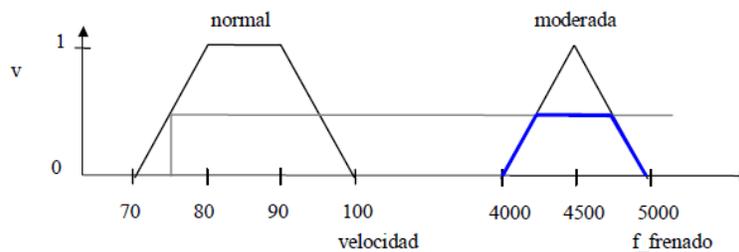
**Figura 4.22. Función de pertenencia de los conjuntos difusos**

Vemos que el valor de la función de pertenencia para el hecho nítido  $p$  es  $\mu_A^*(75) = 0.5$ . La función de pertenencia asociada a la regla es  $\mu_{p \rightarrow q}(x,y) = \min(\mu_A(u), \mu_B(v))$ . El resultado de la inferencia será una proposición difusa  $q^*$  con su correspondiente conjunto difuso  $B^*$  asociado, que vendrá dado por la función de pertenencia  $\mu_{B^*}(y)$ .

La única diferencia con el caso difuso es la forma de escoger el valor  $z$ , que en este caso se calcula simplemente como  $z = \mu_A(x)$ , donde  $x$  es el valor nítido del que dispongamos, en nuestro ejemplo 75. La inferencia se hace entonces con cualquiera de las alternativas vistas en el apartado anterior, por ejemplo:

- Inferencia tipo max-min (implicación de Mamdani):  $\mu_{B^*}(y) = \min(\mu_B(75), \mu_B(y))$

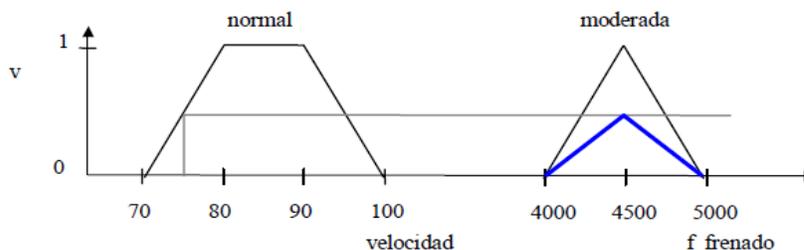
Es decir, que el resultado de la inferencia sería “velocidad es moderada\*”, donde la función de pertenencia del conjunto difuso moderada\* es la representada en negrita en la siguiente figura:



**Figura 4.23. Función inferencia tipo max-min (implicación de Mamdani)**

- Inferencia tipo max-prod:  $\mu_{B^*}(y) = \text{prod}(\mu_A(75), \mu_B(y))$ .

Cuyo resultado es el representado en la siguiente figura:



**Figura 4.24. Función inferencia tipo max-prod (implicación de Mamdani)**

Igual se haría en el caso de que la implicación se interprete como una implicación lógica.

#### 4.2.4.2. Decodificación (transformación de un conjunto difuso en un valor nítido)

La principal aplicación de los sistemas de razonamiento difuso es el control de dispositivos, que normalmente precisan de una salida nítida (acción de control). Así por ejemplo en el ejercicio anterior podemos querer saber qué fuerza de frenado que debemos aplicar si la velocidad es *alta*. Existen diversas alternativas para transformar un valor difuso en nítido (proceso que en inglés se llama de fuzzificación y en español podríamos llamar decodificación), las más empleadas son:

- a) El valor máximo (es decir, el más posible). Si se producen empates puede seleccionarse el primer valor encontrado o la media (en cuyo caso el método se denomina media de máximos (MOM en FuzzyCLIPS)).

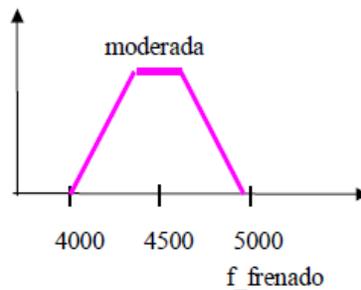


Figura 4.25. Función MOM en FuzzyCLIPS

En nuestro ejemplo, nos encontramos que la función de pertenencia tiene varios máximos: todos los valores entre 4250 y 4750. La estrategia MOM cogería el valor medio, esto es, 4500, y la estrategia del primer valor máximo cogería 4250.

- b) El centroide difuso (o centro de gravedad, COG en FuzzyCLIPS), definido como:

$$y_{\text{centroide}} = \frac{\sum_{x \in X} x \mu_A(x)}{\sum_{x \in X} \mu_A(x)}$$

En nuestro ejemplo sería:  $\frac{4000*0 + 4250*1 + 4750 + 5000*0}{1+1} = 4500$

Normalmente, si varias reglas tienen el mismo consecuente, lo que se suele hacer para acumular la evidencia es unir los dos conjuntos difusos resultantes y después decodificar el resultado.

## 4.3. Referencias

### 4.3.1. Figuras y Tablas

Figura 4.1. Función de pertenencia del conjunto difuso joven

Figura 4.2. Función de pertenencia de joven si U es continuo

Figura 4.3. Funciones escalón

Figura 4.4. Altura de los seres humanos

Figura 4.5. Función concentración

Figura 4.6. Función dilatación

Figura 4.8. Función difuminación

Figura 4.9.

Figura 4.10.

Figura 4.11.

Figura 4.12. Función t-norma del mínimo

Figura 4.13. Función t-norma del producto

Figura 4.14. Función del producto drástico

Figura 4.15. Función t-conorma del máximo

Figura 4.16. Función t-conorma de la suma

Figura 4.17. Función t-conorma de la suma drástica

Figura 4.18. Función inferencia tipo max-min

Figura 4.19. Función inferencia tipo max-pro

Figura 4.20. Función con implicación de la lógica (max)

Figura 4.21. Función con implicación de la lógica (min)

Figura 4.22. Función de pertenencia de los conjuntos difusos

Figura 4.23. Función inferencia tipo max-min (implicación de Mamdani)

Figura 4.24. Función inferencia tipo max-prod (implicación de Mamdani)

Figura 4.25. Función MOM en FuzzyCLIPS

Tabla 4.1. Conjunto difuso “joven”

Tabla 4.2. FuzzyCLIPS

### **4.3.2. Texto**

<http://www.lcc.uma.es/~eva/aic/apuntes/fuzzy.pdf>



# Capítulo 5. Método AHP Fuzzy.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

# CAPITULO 5: MÉTODO AHP DIFUSO

## 5.1. Introducción

El AHP difuso es una extensión de la metodología AHP mediante la combinación de la teoría de conjuntos difusos, teniendo en cuenta las operaciones matemáticas que se derivan de esta teoría del capítulo 4. Lógica Difusa. En nuestro caso utilizaremos esta extensión de la metodología AHP para la determinación del peso de los criterios en nuestro problema de evaluación de alternativas.

La decisión de invertir en un equipo de alta tecnología es siempre un proceso delicado y lleno de interrogantes y dificultades. Muchas de las decisiones que deben ser tomadas y argumentadas se basan en factores cualitativos, incompletos e imprecisos. De esta forma los métodos tradicionales para evaluar la factibilidad técnico económico de estos tipos de proyectos son reconocidamente inapropiados para tales decisiones. En los últimos años diversos métodos de decisiones multicriterios han sido incorporados a estos procesos de decisión, lamentablemente estos métodos aún fallan al tratar de utilizar informaciones precisas y totalmente cuantificable. La lógica difusa se está transformando en una técnica adecuada para aliada a las técnicas mencionadas poder potenciar las decisiones tomadas en ese ámbito. Este artículo sugiere la aplicación de una técnica de análisis jerárquico combinada con números fuzzy para acceder así a decisiones más acertadas a partir de información cualitativa e imprecisa. Se muestra la utilización de esta metodología a través de un estudio de caso. [29]

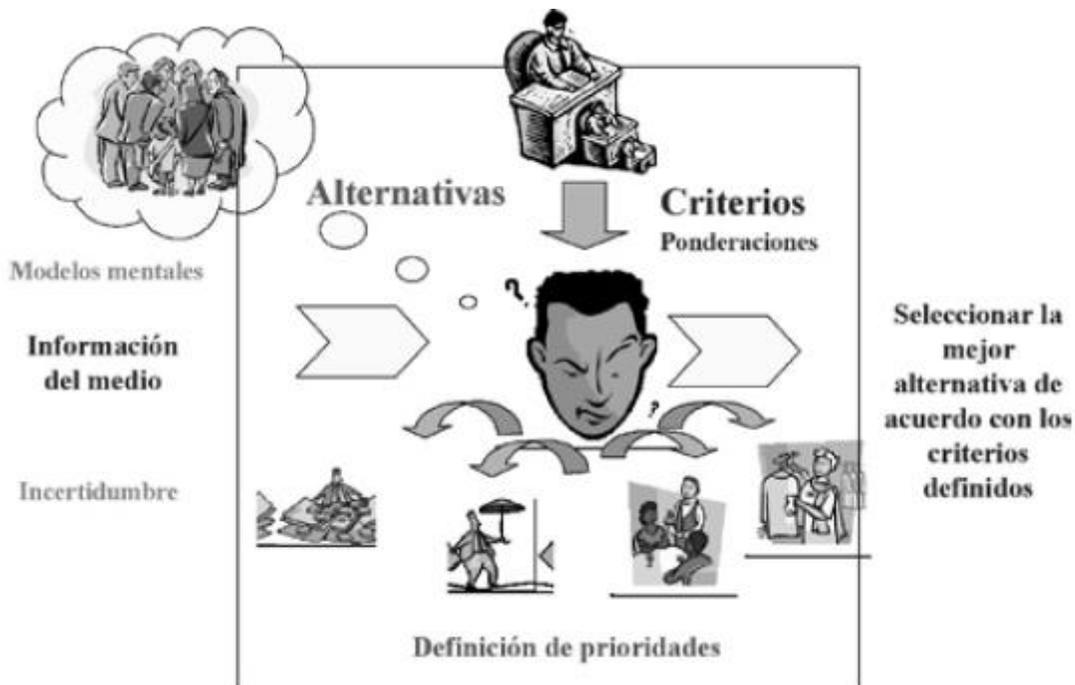


Figura 5.1. Elementos de complejidad en los procesos de decisión multicriterio [23]

## 5.2. Integración de AHP con los Conjuntos Difusos

### 5.2.1. Metodología AHP Fuzzy

La metodología propuesta considera incorporar los números difusos o triangulares a la metodología AHP. Inicialmente se utilizan los números difusos para indicar el nivel de intensidad o importancia relativa que un factor de la jerarquía tiene por sobre otro. A partir de estas comparaciones se construye la matriz de comparaciones con números triangulares. La mejor alternativa es obtenida consecuentemente a partir de un sistema de clasificación para números difusos que se presenta más adelante en esta sección. Sintetizando, la aplicación de la metodología propuesta considera las tres etapas siguientes:

1. Construcción de la estructura jerárquica para el problema a ser resuelto.
2. Obtención de la matriz fuzzy de comparaciones
3. Clasificar las alternativas y seleccionar la más adecuada

Recordando que el método AHP es un método que permite atribuir pesos donde valores numéricos no pueden ser obtenidos directamente. Este método trabaja a partir de una matriz donde se localizan las comparaciones entre pares, según la importancia o preponderancia relativa que un elemento de la jerarquía tenga sobre otro. Se propone aquí modificar la escala de Saaty utilizando ahora números triangulares o fuzzy.

Un número difuso del tipo triangular ( $\tilde{A}$ ) es usualmente representado como una tripleta  $(l, m, n)$  donde  $m$ ,  $n$  y  $l$  corresponden al valor medio, y a los límites superior e inferior respectivamente. Esta es la utilización que se empleará en el resto de este capítulo.

En general para los números triangulares difusos del tipo  $(l, m, n)$ , la función de pertenencia ( $\mu(x)$ ) está dada por la definición mostrada abajo y puede ser representada como en la figura 5.2.

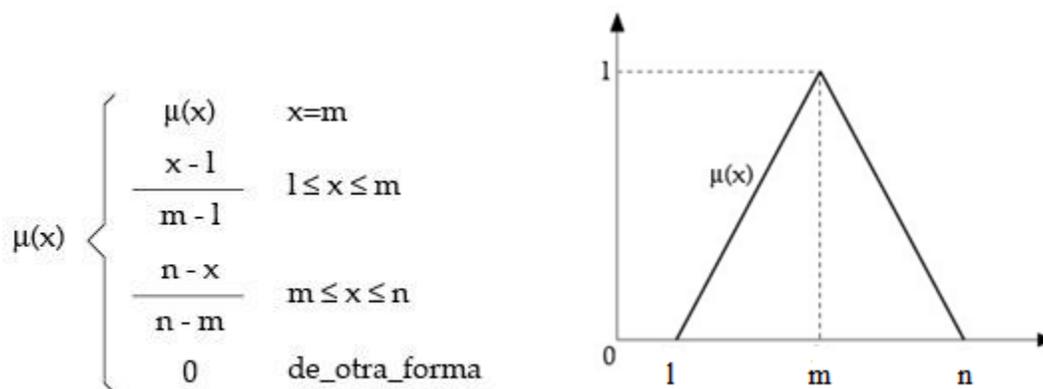


Figura 5.2. Función de pertenencia de un número difuso triangular

Número Difuso	Función de Membresía
$\tilde{1}$	(1, 1, 3)
$\tilde{x}$	(x-2, x, x+2) para x= 3, 5, 7 $\rightarrow$ (7, 9, 9)
$\tilde{0}$	

*Tabla 5.1. Definición de un número difuso triangular de forma analítica*

Explicamos a continuación la operatoria entre números triangulares (Chiu y Park, 1998). El producto entre dos o más números triangulares esta dado por

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$$

$$\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$$

$$\tilde{A} * \tilde{B} = (a_1 * b_1, a_2 * b_2, a_3 * b_3)$$

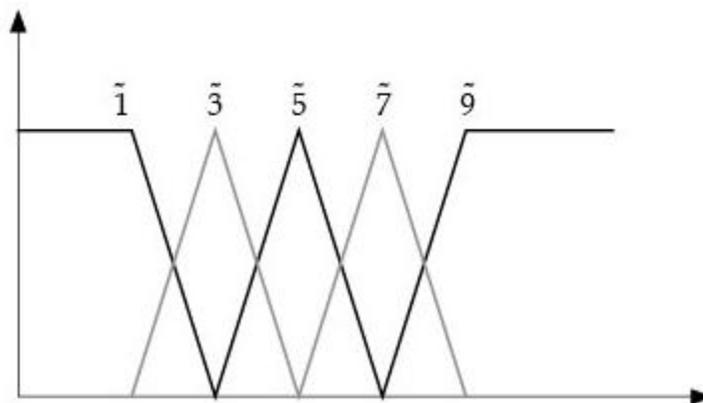
Por otro lado, la división entre dos números triangulares o difusos está expresado por:

$$\tilde{A}/\tilde{B} = (a_1/b_3, a_2/b_2, a_3/b_1)$$

Mientras que el valor recíproco de un número triangular (a, b, c) es (1/a, 1/b, 1/c). De la misma forma la potencia de un número triangular está dada por

$$(a_1, a_2, a_3)^n = (a_1^n, a_2^n, a_3^n)$$

De la figura 5.3 se puede apreciar que la importancia relativa entre dos elementos es gradual y no abrupta



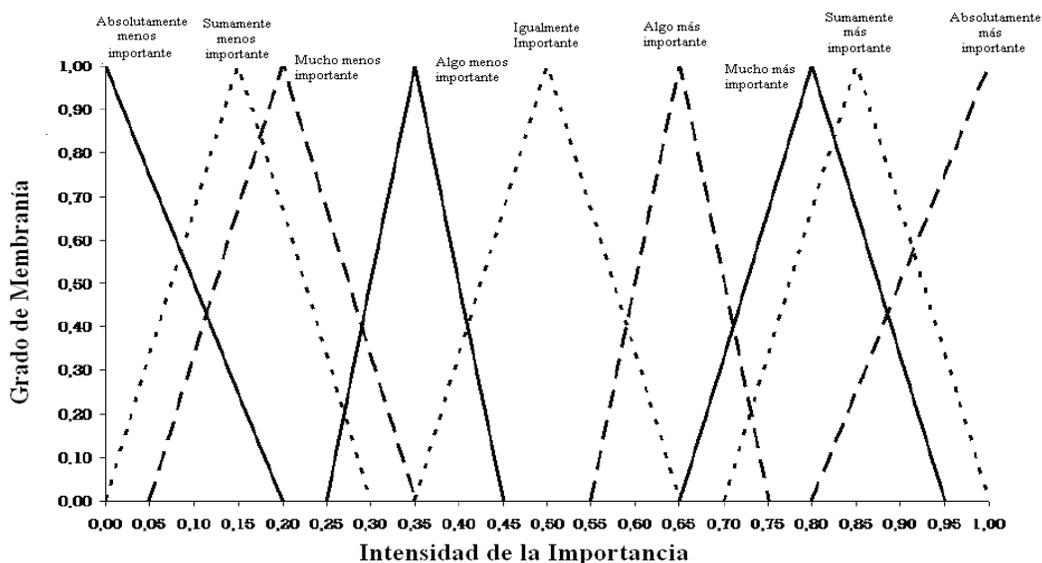
*Figura 5.3. Escala de Saaty expresada como conjuntos difusos*

Importancia Relativa	Definición
$\tilde{1}$	Igual Importancia
$\tilde{3}$	Importancia Débil
$\tilde{5}$	Fuerte Importancia
$\tilde{7}$	Importancia demostrada sobre la otra
$\tilde{9}$	Absoluta Importancia

*Tabla 5.2. Escala de Saaty usando números difusos*

**NOTA:** La escala de Saaty, dependiendo de los autores, para el uso de los conjuntos difusos, hay quién usa 5 conjuntos difusos, como ocurre en la figura 5.3 para el autor Chiu y Park, 1998. Pero también los hay de 9 conjuntos difusos, como se muestra en la figura 5.4 para el autor Bezdek et. al., 1978, que es el que utilizaremos en nuestro caso práctico. Estas son dos formas distintas de plantear los conjuntos difusos, y ambos en forma triangular, donde hay una gran variedad de autores que plantean otros conjuntos difusos y con otras formas, que no son triangulares.

En la Figura 5.4, se distinguen un total de nueve (9) conjuntos difusos de forma triangular. La variable que se muestra en el eje x, hace referencia a la intensidad de la importancia que asigna quien juzga a la comparación entre el par de atributos que está evaluando. Se puede notar el sesgo hacia los extremos, mediante el solapamiento de las variables que refleja que es mucho más difícil distinguir entre “Mucho más (menos) importante” y “Sumamente más (menos) importante”, e incluso entre esas opciones y “Absolutamente importante”. La opción igualmente importante no se solapa con ninguna de las evaluaciones próximas a los extremos y lo hace moderadamente con el juicio “Algo más (menos) importante”.



*Figura 5.4. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP*

Intensidad de la Importancia	Definición Lingüística	Explicación
1	Igual Importancia	Los dos factores contribuyen equitativamente
3	Algo más importante	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un factor
5	Mucho más importante	La experiencia y el juicio favorecen claramente a un factor
7	Sumamente más importante	La experiencia y el juicio favorecen muy ampliamente a un factor. Dicha importancia es demostrada en la práctica.
9	Absolutamente más importante	Existe evidencia de validez comprobada favoreciendo a uno de los factores.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se usa como compromiso entre evaluadores con juicios diferentes

*Tabla 5.3. Escala de Comparación de Saaty usando números difuso*

Como se comentó previamente AHP se construye sobre la base de matrices recíprocas, por lo tanto se hace necesario abordar las particularidades de las relaciones recíprocas en el contexto difuso (Bezdek et. al., 1978). Este es un ejemplo de que se pueden tomar varios conjuntos difusos, dependiendo del autor de referencia.

En nuestro caso practico de ejemplo; sean  $w_1 =$  pesos expresados como números triangulares donde  $n = 1, 2, \dots$ , número de atributos los elementos de la matriz de comparación  $a_{ij}$  serán una estimativa de la relación  $w_i/w_j$ . Tenemos entonces la matriz:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{w}_1/\tilde{w}_1 & \tilde{w}_1/\tilde{w}_2 & \dots & \tilde{w}_1/\tilde{w}_n \\ \tilde{w}_2/\tilde{w}_1 & \tilde{w}_2/\tilde{w}_2 & \dots & \tilde{w}_2/\tilde{w}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{w}_n/\tilde{w}_1 & \tilde{w}_n/\tilde{w}_2 & \dots & \tilde{w}_n/\tilde{w}_n \end{pmatrix}$$

Los juicios u opiniones según la escala de Saaty se representan por números difusos triangulares 1, 3, 5, 7, 9 donde la definición de estos números está dada en la tabla 5.2 y sus funciones de membresía en la tabla 5.1.

Sabemos que la matriz A tiene todas sus entradas valores reales y positivos. También se debe cumplir que  $\tilde{a}_{ij} = 1 / \tilde{a}_{ji}$ . Por lo tanto A es una matriz recíproca positiva.

Seguidamente se procede a calcular el autovector, el autovalor y el índice RC, considerando ahora que los elementos  $a_{ij}$  son números difusos o triangulares.

Para estimar el autovector V de la matriz A se utiliza la siguiente ecuación

$$V_1 = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Tenemos así

$$V_1 = (\widetilde{a}_{11} * \widetilde{a}_{12} * \widetilde{a}_{13} * \dots * \widetilde{a}_{1n})^{\frac{1}{n}}$$

hasta

$$V_n = (\widetilde{a}_{n1} * \widetilde{a}_{n2} * \widetilde{a}_{n3} * \dots * \widetilde{a}_{nn})^{\frac{1}{n}}$$

De esta forma se puede obtener el autovector  $V_i$  formado por  $n$  números triangulares que tiene la forma:

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_n)$$

Donde  $V_i$  es un número triangular de la forma  $(V_l, V_m, V_u)$

De la misma forma que en el AHP tradicional el autovector debe ser normalizado y posteriormente pasar por otro proceso de normalización para que la sumatoria de sus elementos sea igual a 1; para realizar esto basta con calcular la proporción de cada elemento del autovector normalizado en relación a la sumatoria de los elementos del autovector.

$$T = \left( \frac{w_1}{\sum w_i} \quad \frac{w_2}{\sum w_i} \quad \frac{w_3}{\sum w_i} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{w_n}{\sum w_i} \right)$$

Donde  $T$  es el autovector normalizado y es utilizado para cuantificar y ponderar la importancia de las características o atributos en análisis.

Un paso o etapa importante del método AHP es la prueba de consistencia de la respuesta dada por los especialistas, o sea si los datos están o no lógicamente relacionados. El método es semejante al utilizado cuando se utilizan los números crisp.

Se estima inicialmente el autovector  $(\lambda_{max})$ , donde la estimativa está dada por

$$\lambda_{max} = T * w$$

donde  $w$  es el número triangular que representa la sumatoria de las columnas de la matriz de comparaciones. Posteriormente se calcula el Índice de Consistencia (IC) a través de la

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

Como, según la operatoria para obtener el  $(\lambda_{max})$ , este también será representado por un número triangular, debemos transformarlo a un número crisp para viabilizar el cálculo del IC. De esta manera proponemos usar aquí el valor central de número triangular que representa (por su simetría) la posición del centroide del triángulo que corresponde al número triangular max. [24]

### 5.2.2. Caso práctico del método AHP difuso; Evaluación de tres alternativas de Máquina Herramienta Automatizadas

En esta sección, la metodología propuesta anteriormente es aplicada a través de un ejemplo numérico. Suponga que un grupo de analistas ha sido designado para evaluar tres alternativas de Máquinas Herramientas Automatizadas (Maq<sub>1</sub>, Maq<sub>2</sub>, Maq<sub>3</sub>). Este análisis será hecha considerando una serie de seis atributos cualitativos: Flexibilidad del Equipo, Facilidad de Operación, Confiabilidad, Calidad, Facilidad de Instalación y de Mantenimiento. Estos seis atributos serán referidos de aquí en adelante como AT<sub>1</sub>, AT<sub>2</sub>, AT<sub>3</sub>, AT<sub>4</sub>, AT<sub>5</sub> y AT<sub>6</sub> respectivamente. Una vez que los analistas han realizado las comparaciones paritarias se obtiene la siguiente matriz del tipo A. En esta matriz las relaciones de comparación entre criterios han sido hechas utilizando la escala de Saaty pero ahora con números triangulares. [24]

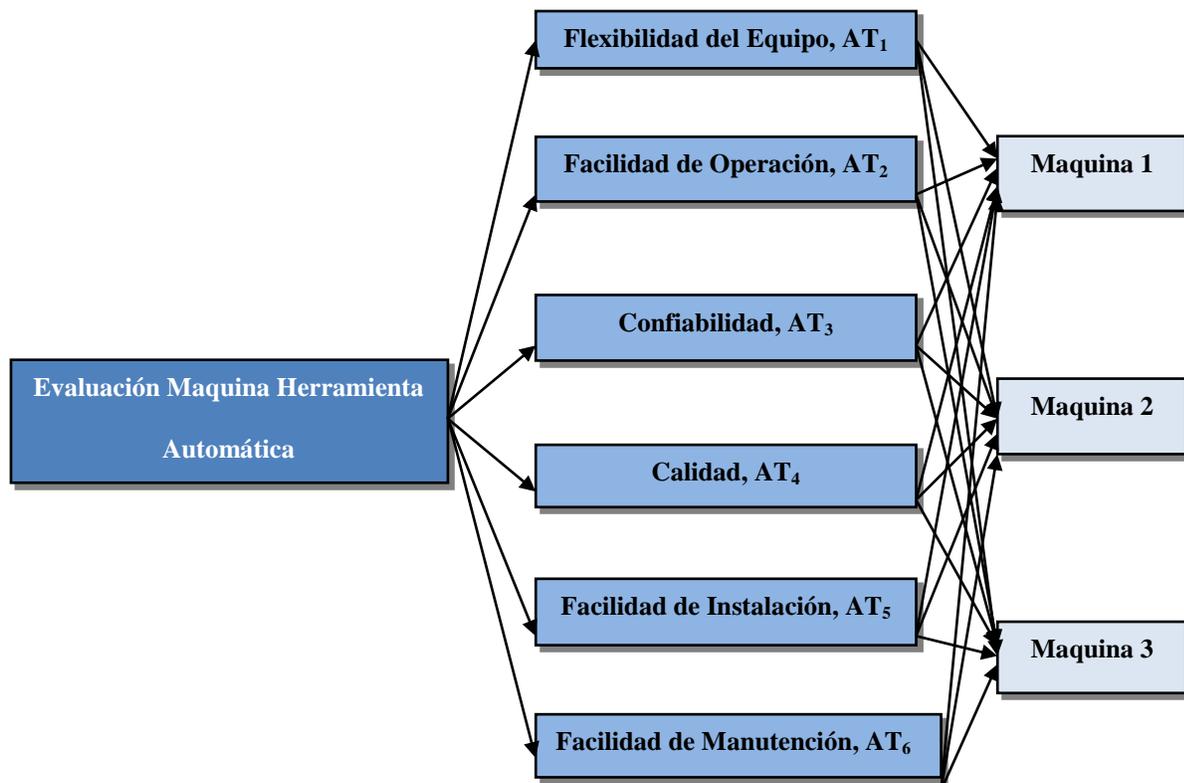


Figura 5.5. Jerarquía AHP para nuestro ejemplo, con conjuntos difusos

	AT <sub>1</sub>	AT <sub>2</sub>	AT <sub>3</sub>	AT <sub>4</sub>	AT <sub>5</sub>	AT <sub>6</sub>
AT <sub>1</sub>	(1,1,3)	(1/5,1,1/3)	(5,7,9)	(1,3,5)	(1,3,5)	(5,7,9)
AT <sub>2</sub>	(3,1,5)	(1,1,3)	(7,9,9)	(1,3,5)	(1,3,5)	(7,9,9)
AT <sub>3</sub>	(1/9,1/7,1/5)	(1/9,1/9,1/7)	(1,1,3)	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)	(1,3,5)
AT <sub>4</sub>	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(3,5,7)	(1,1,3)	(1/5,1,1/3)	(3,5,7)
AT <sub>5</sub>	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(3,5,7)	(3,1,5)	(1,1,3)	(3,5,7)
AT <sub>6</sub>	(1/9,1/7,1/5)	(1/9,1/9,1/7)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)	(1,1,3)

**Tabla 5.4. Matriz comparación entre criterios. Escala de Saaty con números triangulares**

Note que esta matriz representa cuanto importante es para un conjunto de decisores un determinado atributo sobre otro en particular.

A partir de esta matriz se debe calcular el autovector, el autovalor y el Índice RC. Ahora realizando las operaciones sobre los números triangulares y que fueron comentadas en el apartado anterior.

De esta forma se obtiene el siguiente autovector de números triangulares:

$$V = ((1,3 \ 2,3 \ 4,3) \ (1,9 \ 3,6 \ 5,6) \ (0, \ 3 \ 0,4 \ 0,6) \ (0,6 \ 0,98 \ 2,3) \ (0,8 \ 1,4 \ 3,0) \ (0,2 \ 0,2 \ 0,5))$$

Antes de proceder a realizar las normalizaciones es necesario considerar un alcance en relación con el ranqueo o comparación de valores difusos. El objetivo de este ranqueo es definir cuales valores son mayores y menores, estableciendo un ordenamiento lineal entre los valores. Existen diversas formas para realizar este ordenamiento, entre los que se destacan el método del ordinal representativo, que esta dado por la siguiente relación:

$$\tilde{A} = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$$

Donde  $A = (a_1, a_2, a_3)$  es un número triangular.  $\hat{A}$  será entonces el ordinal representativo de cada número triangular. El segundo criterio para ordenación lineal consiste apenas en considerar el elemento central de la tripleta, o sea  $a_2$ . El tercer método utilizado tradicionalmente para la ordenación lineal consiste en calcular la divergencia, o sea, la diferencia entre  $a_3$  y  $a_1$ . Será considerado mayor el número que para elementos  $a_2$  iguales tenga mayor divergencia.

En nuestro ejemplo, se ha ocupado el primer criterio comentado anteriormente. Con esto se considera el segundo elemento del autovector como el mayor de ellos. Observe que según el segundo criterio del valor central también este elemento es considerado como el mayor de los elementos del autovector. Recordemos que el mencionado segundo elemento de este autovector corresponde al AT<sub>2</sub> que representa a la facilidad de operación.

Después de las normalizaciones el autovector queda de la siguiente forma:

$$V = ((0,03 \ 0,26 \ 2,42) \ (0,04 \ 0,40 \ 3,17) \ (0,01 \ 0,04 \ 0,34) \ (0,01 \ 0,11 \ 1,30) \ (0,02 \ 0,16 \ 1,70))$$

(0,004 0,03 0,26))

Para probar la consistencia de la respuesta, o sea, verificar que los datos están lógicamente relacionados, Saaty propone la siguiente relación;  $\lambda_{max} = V * w$

Donde el elemento w es calculado por la sumatoria de las columnas de la matriz de preferencias, o sea:

$W = ((2,6 \ 5,0 \ 10,4) \ (1,8 \ 2,2 \ 6,3) \ (19,2 \ 27,3 \ 36,0) \ (4,3 \ 10,4 \ 18,7) \ (3,5 \ 7,7 \ 14,7) \ (20,0 \ 30,0 \ 40,0))$

Podemos estimar el max obteniendo el siguiente número triangular

$$\lambda_{max} = (4,13 \ 6,47 \ 12,73)$$

para la obtención del Índice de Consistencia (escalar), proponemos utilizar el valor central del número triangular max;  $IC = \frac{6,47-6}{5} = 0,09$

Conjuntamente se procede al cálculo de RC en función del índice randómico retirado de la tabla sugerida por Saaty para el número de atributos igual a seis.

De esta manera tenemos;  $RC = \frac{0,09}{1,24} = 0,07 < 0,10$

lo que indica la total consistencia de las evaluaciones o comparaciones expresadas en la matriz de comparaciones. De esta etapa se puede concluir que el vector de pesos o preferencias entre los atributos (autovector V) considerados en el análisis representa las importancias otorgadas por los especialistas a estos atributos en el siguiente orden: AT<sub>2</sub>, AT<sub>1</sub>, AT<sub>5</sub>, AT<sub>4</sub>, AT<sub>3</sub> y AT<sub>6</sub>. [25]

AT <sub>1</sub>			
	Maq <sub>1</sub>	Maq <sub>2</sub>	Maq <sub>3</sub>
Maq <sub>1</sub>	(1, 1, 3)	(0'2, 0'33, 1)	(0'2, 0'33, 1)
Maq <sub>2</sub>	(1, 3, 5)	(1, 1, 3)	(1, 3, 5)
Maq <sub>3</sub>	(1, 3, 5)	(0'2, 0'33, 1)	(1, 1, 3)
AT <sub>2</sub>			
	Maq <sub>1</sub>	Maq <sub>2</sub>	Maq <sub>3</sub>
Maq <sub>1</sub>	(1, 1, 3)	(0'33, 1, 1)	(0'33, 1, 1)
Maq <sub>2</sub>	(1, 1, 3)	(1, 1, 3)	(0'33, 1, 1)
Maq <sub>3</sub>	(1, 1, 3)	(1, 1, 3)	(1, 1, 3)
AT <sub>3</sub>			
	Maq <sub>1</sub>	Maq <sub>2</sub>	Maq <sub>3</sub>
Maq <sub>1</sub>	(1, 1, 3)	(3, 5, 7)	(1, 1, 3)
Maq <sub>2</sub>	(0'14, 0'20, 0'33)	(1, 1, 3)	(0'14, 0'20, 0'33)
Maq <sub>3</sub>	(0'33, 1, 1)	(3, 5, 7)	(1, 1, 3)

AT <sub>4</sub>			
	Maq <sub>1</sub>	Maq <sub>2</sub>	Maq <sub>3</sub>
Maq <sub>1</sub>	(1, 1, 3)	(7, 9, 9)	(5, 7, 9)
Maq <sub>2</sub>	(0'11, 0'11, 0'14)	(1, 1, 3)	(0'14, 0'20, 0'33)
Maq <sub>3</sub>	(0'11, 0'14, 0'2)	(3, 5, 7)	(1, 1, 3)
AT <sub>5</sub>			
	Maq <sub>1</sub>	Maq <sub>2</sub>	Maq <sub>3</sub>
Maq <sub>1</sub>	(1, 1, 3)	(0'2, 0'33, 1)	(0'33, 1, 1)
Maq <sub>2</sub>	(1, 3, 5)	(1, 1, 3)	(1, 3, 5)
Maq <sub>3</sub>	(1, 1, 3)	(0'2, 0'33, 1)	(1, 1, 3)
AT <sub>6</sub>			
	Maq <sub>1</sub>	Maq <sub>2</sub>	Maq <sub>3</sub>
Maq <sub>1</sub>	(1, 1, 3)	(4, 6, 8)	(2, 4, 6)
Maq <sub>2</sub>	(1, 3, 5)	(1, 1, 3)	(0'2, 0'3, 1)
Maq <sub>3</sub>	(0'17, 0'25, 0'5)	(1, 3, 5)	(1, 1, 3)

**Tabla 5.5. Matriz comparación con respecto a los atributos (alternativas)**

Autovector para comparaciones entre máquinas según los seis atributos considerados en el análisis:

$$V_{AT1} = ((0,1 \ 0,2 \ 1,0) \ (0,1 \ 0,5 \ 1,8) \ (0,1 \ 0,3 \ 1,4))$$

$$V_{AT2} = ((0,1 \ 0,3 \ 0,8) \ (0,1 \ 0,3 \ 1,0) \ (0,1 \ 0,3 \ 1,2))$$

$$V_{AT3} = ((0,2 \ 0,4 \ 1,2) \ (0,1 \ 0,2 \ 0,5) \ (0,1 \ 0,4 \ 1,0))$$

$$V_{AT4} = ((0,3 \ 0,6 \ 1,1) \ (0,10,2 \ 0,3) \ (0,1 \ 0,3 \ 0,6))$$

$$V_{AT5} = ((0,1 \ 0,3 \ 1,0) \ (0,1 \ 0,5 \ 1,8) \ (0,1 \ 0,3 \ 1,2))$$

$$V_{AT6} = ((0,2 \ 0,5 \ 1,3) \ (0,1 \ 0,3 \ 0,9) \ (0,1 \ 0,3 \ 0,8))$$

Para la obtención de la clasificación de las máquinas se multiplica el autovector relativo a las máquinas según cada uno de los atributos por el autovector de la importancia de los atributos bajo análisis (todos los elementos de estos autovectores son números triangulares) obteniéndose el vector final, que muestra la clasificación para cada una de las tres alternativas de máquinas bajo análisis, como se muestra abajo:

	AT <sub>1</sub>	AT <sub>2</sub>	AT <sub>3</sub>	AT <sub>4</sub>	AT <sub>5</sub>	AT <sub>6</sub>
Maq <sub>1</sub>	(0'06,0'22,1'05)	(0'09,0'33,0'82)	(0'16,0'41,1'22)	(0'29,0'57,1'1)	(0'07,0'27,1'03)	(0'17,0'47,1'27)
Maq <sub>2</sub>	(0'1,0'46,1'79)	(0'11,0'33,0'99)	(0'07,0'18,0'51)	(0'08,0'15,0'32)	(0'1,0'46,1'76)	(0'09,0'27,0'87)
Maq <sub>3</sub>	(0'08,0'32,1'37)	(0'13,0'33,1'19)	(0'13,0'41,1'01)	(0'13,0'27,0'56)	(0'08,0'27,1'23)	(0'09,0'26,0'78)

**Tabla 5.6. Obtención del vector final para la clasificación**

Realizada esta multiplicación se ha obtenido el siguiente vector;

<b>Maq<sub>1</sub></b>	(0'01, 0'33, 9'07)
<b>Maq<sub>2</sub></b>	(0'01, 0'36, 11'28)
<b>Maq<sub>3</sub></b>	(0'01, 0'31, 10'46)

*Tabla 5.7. Clasificación final*

Abajo se muestra el criterio de ordenamiento lineal que muestra que la máquina 2 es la más apropiada para la selección según los atributos considerados y su importancia relativa.

Maq 1 → 2,43  
Maq 2 → 3,00  
Maq 3 → 2,77

### 5.2.3. Conclusiones del método

Se propone un método de análisis de inversión y selección de equipos de manufactura avanzada utilizando la metodología AHP. Se ha incorporado a esta tecnología el concepto de números difusos de manera tal a mejorar la forma con que los especialistas puedan realizar las comparaciones entre pares de alternativas. La contribución de este trabajo radica en la facilidad con que se operan los números triangulares viabilizando así la resolución de análisis multicriterio de manera robusta y consistente. En el ejemplo mostrado en este artículo la técnica se ha aplicado a un caso dónde se debe seleccionar una máquina de comando numérico entre tres alternativas utilizando para esto un conjunto de seis atributos intangibles. Finalmente destacamos la utilidad de incorporar el pensamiento difuso a técnicas de decisión debido a la posibilidad de expresar de manera más natural factores intangibles e considerarlos entre las ventajas de adquirir determinada tecnología. Futuros trabajos apuntan a la elaboración de una herramienta computacional para el apoyo de este proceso y a aplicaciones en el campo de la industria. [26]

## 5.3. Comparación del AHP convencional con el AHP Fuzzy

Para tratar con la imprecisión o subjetividad del juicio humano y con los múltiples criterios, existe una teoría llamada Análisis Jerárquico de Procesos Difuso, la cual es una combinación del Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) con lógica difusa (Fuzzy Logic). Para la toma de decisiones, los juicios emitidos por los agentes decisores con respecto a las alternativas y criterios, pueden ser convertidos en números difusos (denominados números triangulares difusos por su representación gráfica, figura 5.2.) para calcular la importancia de los pesos usando el AHP; estos números son usados para construir la matriz de comparación por pares del AHP. [27]

En el AHP convencional, la comparación por pares es hecha usando una escala de

nueve puntos, la cual representa los juicios o preferencias de quienes toman decisiones entre diferentes opciones. Aunque esta escala discreta de uno a nueve, es simple y fácil de usar, no tiene en cuenta la incertidumbre asociada a los juicios humanos. Los términos lingüísticos que las personas usan para expresar sus sentimientos o juicios, son vagos, subjetivos, es por esto que se combina el AHP con la lógica difusa para representar los juicios lingüísticos, y se utiliza la teoría de los conjuntos difusos para trabajar con la ambigüedad en un sistema. En la Tabla 5.1 se presentan tanto la escala definida por Saaty [28], como la escala difusa propuesta. Aplicando AHP fuzzy, se puede obtener la importancia de los criterios de calificación y por ende la mejor alternativa.

## **5.4. Referencias**

### **5.4.1. Figuras**

Figura 5.1. Elementos de complejidad en los procesos de decisión multicriterio [23]

Figura 5.2. Función de membresía de un número difuso triangular

Figura 5.3. Escala de Saaty expresada como conjuntos difusos

Figura 5.4. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP

Figura 5.5. Jerarquía AHP para nuestro ejemplo, con conjuntos difusos

Tabla 5.1. Definición de un número difuso triangular de forma analítica

Tabla 5.2. Escala de Saaty usando números difusos

Tabla 5.3. Escala de Comparación de Saaty usando números difusos

Tabla 5.4. Matriz comparación entre criterios. Escala de Saaty con números triangulares

Tabla 5.5. Matriz comparación con respecto a los atributos

Tabla 5.6. Obtención del vector final para la clasificación

Tabla 5.7. Clasificación final

### **5.4.2. Texto**

[23] [www.icesi.edu.co/revistas/index.php/estudios\\_gerenciales/.../188](http://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/estudios_gerenciales/.../188)

[24] <http://www.revistaespacios.com/a06v27n01/06270142.html>

[25] <http://www.revistaespacios.com/a06v27n01/06270143.html>

[26] <http://www.revistaespacios.com/a06v27n01/06270144.html>

[27] Herrera Umaña, María Fernanda y Vinasco Mosquera, Milton Adrián. *Modelo para la implementación y administración del programa de aseguramiento de proveedores de Coomeva y sus empresas, aplicando AHP difuso*. Universidad del Valle. Trabajo de Grado. Ingeniería Industrial. 2005

[28] Saaty, Thomas. *How to make a decision: the analytic hierarchy process*. University of Pittsburgh. 1994.

[29] <http://www.revistaespacios.com/a06v27n01/06270141.html#inicio>

# Capítulo 6. Método Topsis Fuzzy.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

# CAPÍTULO 6: MÉTODO TOPSIS DIFUSO

## 6.1. Introducción

Es bien conocido que la mayoría de los modelos de toma de decisión no establecen su salida de resultados basados en la entrada de los mismos. En la mayor parte de los casos la salida de datos de los modelos es de tipo numérico. Un ejemplo podemos verlo en el método TOPSIS que evalúa las alternativas mediante un ranking. Este capítulo se basa en el método TOPSIS, pero ha sido adaptado de manera que la salida de datos sea lingüística así como lo es la entrada de los mismos. Finalmente, se ilustra el modelo propuesto mediante un ejemplo. [30]

La Toma de Decisión Multicriterio es un proceso que consiste en encontrar la mejor alternativa de entre un conjunto de alternativas factibles. Entre los diversos métodos compensatorios de la Toma de Decisión Multicriterio, es posible considerar un subgrupo que incluye aspectos de costes y beneficios. Uno de ellos es el método TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Idea Solution) Técnica para ordenar las preferencias mediante similitud a la solución ideal. Esta aproximación se utiliza por cuatro razones principales [11]:

- a. La lógica aplicada en TOPSIS es racional y comprensible
- b. Los procesos de computación son sencillos
- c. El concepto permite la búsqueda de las mejores alternativas para cada criterio mostrándose en una forma matemática simple.
- d. La importancia de los pesos se incorporan en los procesos de comparación

Pero existen también algunas desventajas como son:

- La existencia de orden inverso
- Y que se pueden utilizar etiquetas lingüísticas como entrada de datos, mientras que la salida es un número asociado con el índice de proximidad, por tanto numérico.

Con respecto a esto, intentamos hacer una modificación en el algoritmo del modelo TOPSIS difuso de manera que si la entrada de datos es lingüística entonces la salida de los mismos también lo sea.

## 6.2. Variables Lingüísticas y conjuntos difusos

### 6.2.1. Variable Lingüística

La mayor parte de las veces, el decisor no es capaz de definir la importancia de los criterios y/o la bondad de las alternativas con respecto a cada criterio en términos numéricos. En la mayoría de las situaciones, estas valoraciones son lingüísticas, dando lugar a medidas o cantidades que no son exactas sino aproximadas.

Desde que Zadeh [12] introdujera el concepto de conjunto difuso y el de variable lingüística la popularidad y el uso de la lógica difusa ha sido extraordinario. Estamos particularmente interesados en el papel de las variables lingüísticas como una escala ordinal así como en sus términos asociados, en este caso de decisión multicriterio.

Por *variable lingüística* [13, 14, 15] se entiende una variable cuyos valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural o artificial. Por ejemplo la *edad* es una variable lingüística si sus valores son lingüísticos en vez de numéricos, por ejemplo, joven, no joven, muy joven, bastante joven, viejo, no muy viejo, no muy joven ... etc, en lugar de números como 20, 21, 22, 23, ...,etc.

En general, las variables lingüísticas forman un conjunto ordenado

$$U = \{L_i / i = 1, 2, \dots, n\} \text{ siendo } L_i < L_j \Leftrightarrow i < j$$

**Definición 1:** Una *variable lingüística* se caracteriza por un quintuplo

$$\{X; T(X); U; G; M\} \quad (1)$$

Donde:

1.  $X$  es el nombre de la variable
2.  $T(X)$  es el término del conjunto de  $X$ , esto es, la colección de sus valores lingüísticos.
3.  $U$  es un universo de discusión de la variable
4.  $G$  es la regla sintáctica para la generación de los elementos de  $T(X)$  y
5.  $M$  es la regla semántica que asocia a cada elemento de  $T(X)$  su significado.

En general para el decisor es más fácil cuando el/ella evalúa sus juicios mediante términos lingüísticos que cuando lo hace con números. Siendo, en estos casos, el concepto de número difuso más adecuado que el de número real para su representación

### 6.2.2. Conjuntos Difusos

La teoría de conjuntos difusos, introducida por Zadeh [12] para tratar problemas vagos inciertos e imprecisos se ha utilizado como una herramienta de modelado para sistemas complejos que pueden ser controlados por los humanos pero que son difíciles de definir con precisión.

El fundamento teórico de los números triangulares difusos puede verse en Klir [9]

**Definición 2:** Si  $T_1$  y  $T_2$  son dos números triangulares difusos definidos por las triplas  $(a_1, b_1, c_1)$  y  $(a_2, b_2, c_2)$  respectivamente. Entonces, para este caso, las operaciones aritméticas necesarias con números difusos positivos son:

a) Adición

$$T_1 \oplus T_2 = [a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2]$$

b) Sustracción

$$T_1 \ominus T_2 = T_1 + (-T_2) \text{ donde el opuesto } -T_2 = (-c_2, -b_2, -a_2)$$

$$\text{Entonces } T_1 \ominus T_2 = [a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - a_2]$$

c) Multiplicación

$$T_1 \otimes T_2 = [a_1 \times a_2, b_1 \times b_2, c_1 \times c_2]$$

d) División

$$T_1 \oslash T_2 = [a_1, b_1, c_1] \cdot \left[ \frac{1}{c_2}, \frac{1}{b_2}, \frac{1}{a_2} \right], 0 \neq [a_2, b_2, c_2]$$

e) Raíz cuadrada.

$$T_1^{1/2} = [a_1^{1/2}, b_1^{1/2}, c_1^{1/2}]$$

### 6.3. Topsis difuso

El método TOPSIS es un modelo de decisión propuesto para ordenar preferencias por similitud a una solución ideal, es por tanto un método de ranking. Fue desarrollado por Hwang y Yoon [6] en 1981 y mejorada por los propios autores en 1987 y 1992, también trabajaron Zeleny [17], Lai et al [10], García-Cascales y Lamata [3] y muchos más.

TOPSIS es un método de decisión multicriterio de ordenación para identificar las soluciones de un conjunto finito de alternativas. El principio básico es que la alternativa elegida debe tener la menor distancia a la solución ideal positiva y la mayor distancia a la solución ideal negativa. Una solución ideal se define como una colección de puntuaciones o valores en todos los atributos considerados en la decisión, pudiendo suceder que tal solución sea inalcanzable. El vector compuesto por los mejores valores del j-ésimo atributo respecto de todas las alternativas posibles es quien recibe el nombre de “solución ideal positiva” (SIP); recíprocamente, la “solución ideal negativa” (SIN) será aquella cuyo vector contenga los peores valores en todos los atributos.

El concepto intuitivo de alternativa ideal es que sería aquella que, sin dudarlo, siempre elegiría el decisor. De igual modo, la alternativa anti-ideal sería aquella que, sin dudarlo, nunca elegiría el decisor. De este modo, puede suceder que una alternativa seleccionada desde el punto de vista de su “distancia” más corta respecto de la solución ideal positiva, Zeleny [17] deba competir con otra alternativa seleccionada como la más lejana de la solución ideal negativa. Por ello, y a fin de definir la solución ideal, el método TOPSIS

define un índice de similaridad que se construye combinando la proximidad al ideal positivo y la lejanía respecto al ideal negativo.

El procedimiento de TOPSIS puede expresarse en una serie de pasos que pueden verse en Chen y Hwang [2], y que nosotros reproducimos modificado para el problema que resolvemos a continuación. [30]

### 6.3.1. Método Algoritmo Propuesto

Proponemos un algoritmo para determinar la opción preferible entre todas las posibles alternativas: [30]

**Paso 1:** Identificación de los criterios de evaluación de forma que relacione las capacidades del sistema con los objetivos.

**Paso 2:** Generación de alternativas determinando el sistema finito de alternativas para lograr el objetivo.

**Paso 3:** Evaluación de las alternativas en función de los criterios.

**Paso 4:** Identificación del peso de los criterios. Es importante considerar que los criterios puedan tener distinta importancia.

**Paso 5:** Construcción de la matriz de decisión con números difusos.

**Paso 5bis:** Introducción de alternativas ficticias, donde al conjunto de alternativas le añadiremos las alternativas correspondientes a la valoración de todos los criterios por el valor correspondiente de cada una de las etiquetas utilizadas en el problema. Entenderemos estas variables como ficticias

**Paso 6:** La matriz de decisión normalizada asociada. Para ello los valores de cada criterio los dividimos por la norma con objeto de que la escala sea la misma para todos los criterios.

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij})^2}}, \quad j = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, m.$$

utilizando para los números difusos las operaciones definidas anteriormente, tenemos como resultado, otro número difuso  $\bar{n}_{ij} = (n_{ij}^a, n_{ij}^b, n_{ij}^c)$

**Paso 7:** Construcción de la matriz ponderada normalizada asociada.

$$\bar{v}_{ij} = w_j \cdot \bar{n}_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, m$$

Donde  $\overline{v_{ij}} = (v_{ij}^a, v_{ij}^b, v_{ij}^c)$  y operaremos utilizando la ecuación de la multiplicación indicada anteriormente.

**Paso 8:** Determinación de la solución ideal positiva y la solución ideal negativa, respectivamente.

$$\overline{A}^+ = \{\overline{v_1^+}, \dots, \overline{v_n^+}\} = \left\{ \begin{array}{l} (\max \overline{v_{ij}}, j \in J) \\ (\min \overline{v_{ij}}, j \in J') \end{array} \right\}$$

$$\overline{A}^- = \{\overline{v_1^-}, \dots, \overline{v_n^-}\} = \left\{ \begin{array}{l} (\min \overline{v_{ij}}, j \in J) \\ (\max \overline{v_{ij}}, j \in J') \end{array} \right\}$$

Donde J está asociado con aquellos criterios que indican ganancias o beneficios y J' está asociado con los criterios que indican pérdidas o costes.

Al haber introducido en la matriz las distintas variables lingüísticas, podemos observar que  $A^+ = L_n$  y  $A^- = L_1$

**Paso 9:** Cálculo de la separación de cada alternativa con respecto a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa respectivamente:

$$\overline{d_i^+} = \left\{ \sum_{j \in J} (\overline{v_{ij}} - \overline{v_j^+})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, m$$

$$\overline{d_i^-} = \left\{ \sum_{j \in J} (\overline{v_{ij}} - \overline{v_j^-})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, m$$

en este caso usamos la distancia euclídea, pero podríamos haber tenido en cuenta cualquier otra.

**Paso 10:** Cálculo de la proximidad relativa de cada alternativa a la solución ideal positiva y negativa mediante el índice de proximidad.

$$\overline{R_i} = \frac{\overline{d_i^-}}{\overline{d_i^+} + \overline{d_i^-}}, i = 1, \dots, m$$

- Si  $\overline{R_i} \cong 1 \rightarrow A_i = \overline{A}^+$
- Si  $\overline{R_i} \cong 0 \rightarrow A_i = \overline{A}^-$

**Paso 11:** Establecimiento del orden de preferencias de todas las alternativas de acuerdo al coeficiente de proximidad. Obviamente, una alternativa  $A_j$  está más próxima a la  $\overline{A}^+$  y más lejana de  $\overline{A}^-$  cuanto más se aproxima a 1 el índice  $\overline{R}_i$

**Paso 12:** Defuzzificación

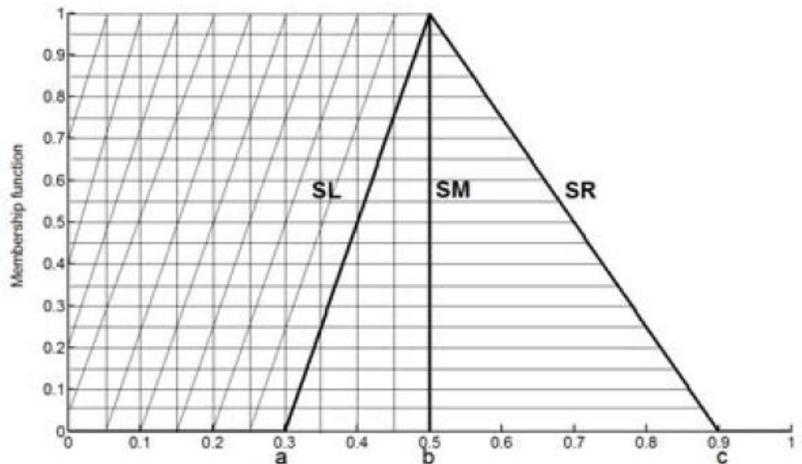
De entre los muchos métodos posibles existentes, utilizaremos la siguiente expresión;

$$I_{\beta,\lambda}(A_i) = \beta S_M(A_i) + (1 - \beta)\lambda S_R(A_i) + (1 - \beta)(1 - \lambda)S_L(A_i)$$

Donde;

- $S_L(A_i)$  es el valor inferior medio asociado con la función inversa  $g_A^L(x)$ .
- $S_R(A_i)$  es el área del corazón del número difuso
- $S_M(A_i)$  representa el valor superior medio del número difuso que está asociado con la función inversa  $f_A^R(x)$
- $\beta \in [0,1]$  es el índice de modalidad representando la importancia del valor central
- $\lambda \in [0,1]$  es el grado de optimismo del decisor.

Estas áreas están representadas en la figura 6.1.



**Figura 6.1.** Representación de  $S_L(A_i)$ ,  $S_M(A_i)$  y  $S_R(A_i)$

En este problema hemos considerado que las tres áreas tienen la misma importancia ó peso. Correspondiéndose con un decisor neutral donde  $\alpha = 1/2$  y  $\beta = 1/3$

**Paso 13.** Salida de valores lingüísticos.

Una vez obtenida la defuzzificación en el paso anterior, los valores obtenidos son reales y por lo tanto tenemos un orden definido entre ellos, así como la posibilidad de encontrar la

mínima distancia de cada una de las alternativas a las alternativas ficticias introducidas en el paso 5 bis.

## **6.4. Caso Práctico**

En esta sección, trabajamos con un caso real de decisión para ilustrar el método de decisión TOPSIS mediante el algoritmo propuesto.

El objetivo global del problema es decidir cual es el mejor sistema de lavado de las piezas para un motor diesel y su valoración final en los mismos términos que la entrada. El problema del que se parte García-Cascales y Lamata [5] es el siguiente; contamos con piezas que tienen diversos grados de suciedad, con geometría y peso muy diferente, y necesitamos un proceso de trabajo que exige rapidez y flexibilidad a la hora de limpiar piezas y donde se deben tener en cuenta criterios como el coste total de operación anual, la productividad del sistema empleado, la capacidad de carga del sistema, la eficiencia en la limpieza y la salubridad de los productos utilizados.

Al abordar el problema nos encontramos con unos criterios cuyos datos se podían cuantificar y otros que no, dadas sus características, la evaluación solo podía obtenerse mediante valores lingüísticos.

### **6.4.1. Estructuración del problema de decisión**

Establecer los criterios de decisión

- C1: Coste Total de operación anual.
- C2: Productividad volumétrica de la Pila
- C3: Capacidad de carga
- C4: Eficiencia en la limpieza
- C5: Salubridad

Determinar las alternativas

- A1: Lavadora convencional
- A2: Lavado químico
- A3: Lavado ultrasonidos

### **6.4.2. Análisis del problema de decisión**

Consiste en evaluar las alternativas en términos de los criterios mediante las siguientes etiquetas que modelizaremos a través de números difusos triangulares y que recogemos en la tabla 6.1.

	Pesos de los $C_j$	Pesos de los $C_j$
<b>Muy malo (Mm)</b>	[0, 0, 0'3]	
<b>Malo (m)</b>	[0, 0'3, 0'5]	
<b>Regular (R)</b>	[0'2, 0'5, 0'8]	
<b>Bueno (B)</b>	[0'5, 0'7, 1]	
<b>Muy bueno (MB)</b>	[0'7, 1, 1]	

*Tabla 6.1. Valores numéricos asociados a las etiquetas de bondad*

En este caso, se opta por números difusos no simétricos como es el caso de las etiquetas bueno y malo pero que si son simétricas respecto de la etiqueta central (regular), por estar más acordes con aquellos valores que expresó el decisor sobre la valoración de las etiquetas.

**Paso 4. Identificar el peso de los criterios.**

Las valoraciones para cada criterio fueron las siguientes:

- C1: Muy Importante [0.7, 1, 1]
- C2: Importante [0.2, 0.5, 0.8]
- C3: Poco importante [0, 0, 0.3]
- C4: Importante [0.2, 0.5, 0.8]
- C5: Moderadamente importante [0, 0.3, 0.5]

Datos que una vez normalizados están expresados en la tabla 6.2.

	Pesos de los $C_j$	Pesos de los $C_j$ normalizados
<b>MI</b>	[0'5, 0'7, 1]	[0'2, 0'43, 0,91]
<b>I</b>	[0'2, 0'5, 0'8]	[0'06, 0'22, 0'73]
<b>PI</b>	[0, 0, 0'3]	[0, 0, 0'27]
<b>I</b>	[0'2, 0'5, 0'8]	[0'06, 0'22, 0'73]
<b>MoI</b>	[0, 0'3, 0'5]	[0, 0'13, 0'45]

*Tabla 6.2. Pesos normalizados de la importancia de los criterios*

**Paso 5 y 5b: Construir la matriz de decisión** correspondiente junto con las cinco etiquetas de valoración (tabla 6.3).

	MI	I	PI	I	MoI
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>1</sub>	B	B	M	R	R
A <sub>2</sub>	R	M	MB	B	Mm
A <sub>3</sub>	M	MB	R	B	B
Mm	Mm	Mm	Mm	Mm	Mm
m	M	m	m	m	m
R	R	R	R	R	R
B	B	B	B	B	B
MB	MB	MB	MB	MB	MB

**Tabla 6.3. Información lingüística del problema de decisión**

**Paso 6:** *Matriz de decisión normalizada.* (Tabla 6.4 y Tabla 6.5)

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Pesos	0.2 0.43 0.91	0.06 0.22 0.73	0.0 0.0 0.27	0.06 0.22 0.73	0.0 0.13 0.45
A <sub>1</sub>	0.5 0.7 1.0	0.5 0.7 1.0	0.0 0.3 0.5	0.2 0.5 0.8	0.2 0.5 0.8
A <sub>2</sub>	0.2 0.5 0.8	0.0 0.3 0.5	0.7 1.0 1.0	0.5 0.7 1.0	0.0 0.0 0.3
A <sub>3</sub>	0.0 0.3 0.5	0.7 1.0 1.0	0.2 0.5 0.8	0.5 0.7 1.0	0.5 0.7 0.1
Mm	0.0 0.0 0.3	0.0 0.0 0.3	0.0 0.0 0.3	0.0 0.0 0.3	0.0 0.0 0.3
m	0.0 0.3 0.5	0.0 0.3 0.5	0.0 0.3 0.5	0.0 0.3 0.5	0.0 0.3 0.5
R	0.2 0.5 0.8	0.2 0.5 0.8	0.2 0.5 0.8	0.2 0.5 0.8	0.2 0.5 0.8
B	0.5 0.7 1.0	0.5 0.7 1.0	0.5 0.7 1.0	0.5 0.7 1.0	0.5 0.7 1.0
MB	0.7 1.0 1.0	0.7 1.0 1.0	0.7 1.0 1.0	0.7 1.0 1.0	0.7 1.0 1.0

**Tabla 6.4. Matriz de decisión**

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>1</sub>	0.2266 0.4292 0.9667	0.2186 0.3791 0.8111	0.0000 0.1685 0.4369	0.0844 0.2858 0.6963	0.0922 0.3119 0.7734
A <sub>2</sub>	0.0906 0.3066 0.7734	0.0000 0.1625 0.4056	0.3172 0.5617 0.8737	0.2109 0.4002 0.8704	0.0000 0.0000 0.2900
A <sub>3</sub>	0.000 0.1839 0.4834	0.3061 0.5415 0.8111	0.0906 0.2808 0.6990	0.2109 0.4002 0.8704	0.2304 0.4366 0.9667
Mm	0.000 0.0000 0.2900	0.0000 0.0000 0.2433	0.0000 0.0000 0.2621	0.0000 0.0000 0.2611	0.0000 0.0000 0.2900
m	0.000 0.1839 0.4834	0.0000 0.1625 0.4056	0.0000 0.1685 0.4369	0.0000 0.1715 0.4352	0.0000 0.1871 0.4834
R	0.0906 0.3066 0.7734	0.0875 0.2708 0.6489	0.0906 0.2808 0.6990	0.0844 0.2858 0.6963	0.0922 0.3119 0.7734
B	0.2266 0.4292 0.9667	0.2186 0.3791 0.8111	0.2266 0.3932 0.8737	0.2109 0.4002 0.8704	0.2304 0.4366 0.9667
MB	0.3172 0.6131 0.9667	0.3061 0.5415 0.8111	0.3172 0.5617 0.8737	0.2953 0.5717 0.8704	0.3225 0.6238 0.9667

**Tabla 6.5. Matriz Normalizada**

**Paso 7:** *Construir la matriz ponderada normalizada.* (Tabla 6.6), para ello operamos mediante la expresión de la multiplicación, que indicamos anteriormente.

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
V <sub>A1</sub>	0.0453 0.1846 0.8797	0.0131 0.0834 0.5921	0.0000 0.0000 0.1180	0.0051 0.0629 0.5083	0.0000 0.0405 0.3480
V <sub>A2</sub>	0.0181 0.1318 0.7038	0.0000 0.0357 0.2961	0.0000 0.0000 0.2359	0.0127 0.0880 0.6354	0.0000 0.0000 0.1305
V <sub>A3</sub>	0.0000 0.0791 0.4399	0.0184 0.1191 0.5921	0.0000 0.0000 0.1887	0.0127 0.0880 0.6354	0.0000 0.0568 0.4350
V <sub>Mm</sub>	0.0000 0.0000 0.2639	0.0000 0.0000 0.1776	0.0000 0.0000 0.0708	0.0000 0.0000 0.1906	0.0000 0.0000 0.1305
V <sub>m</sub>	0.0000 0.0791 0.4399	0.0000 0.0357 0.2961	0.0000 0.0000 0.1180	0.0000 0.0377 0.3177	0.0000 0.0243 0.2175
V <sub>R</sub>	0.0181 0.1318 0.7038	0.0052 0.0596 0.4737	0.0000 0.0000 0.1887	0.0051 0.0629 0.5083	0.0000 0.0405 0.3480
V <sub>B</sub>	0.0453 0.1846 0.8797	0.0131 0.0834 0.5921	0.0000 0.0000 0.2359	0.0127 0.0880 0.6354	0.0000 0.0568 0.4350
V <sub>MB</sub>	0.0634 0.2636 0.8797	0.0184 0.1191 0.5921	0.0000 0.0000 0.2359	0.0177 0.1258 0.6354	0.0000 0.0811 0.4350

Tabla 6.6. Matriz ponderada normalizada

**Paso 8:** Determinar la solución ideal positiva y la solución ideal negativa, que se exponen en la (tabla 6.7). Se puede comprobar que se corresponden con las etiquetas: Muy bueno y Muy malo, respectivamente.

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
A <sup>+</sup>	0.0634 0.2636 0.8797	0.0184 0.1191 0.5921	0.0000 0.0000 0.2359	0.0177 0.1258 0.6354	0.0000 0.0811 0.4350
A <sup>-</sup>	0.0000 0.0000 0.2639	0.0000 0.0000 0.1776	0.0000 0.0000 0.0708	0.0000 0.0000 0.1906	0.0000 0.0000 0.1305

Tabla 6.7. Solución ideal positiva y negativa

**Paso 9:** Calcular la distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa que reflejamos en la tabla 6.8.

d+A <sub>1</sub>	0.0227 0.1146 0.1940	d-A <sub>1</sub>	0.0474 0.2159 0.8375
d+A <sub>2</sub>	0.0492 0.1798 0.4597	d-A <sub>2</sub>	0.0221 0.1625 0.6577
d+A <sub>3</sub>	0.0636 0.1899 0.4424	d-A <sub>3</sub>	0.0223 0.1773 0.7122
d+Mm	0.0684 0.3257 0.9321	d-Mm	0.0000 0.0000 0.0000
d+m	0.0684 0.2280 0.6658	d-m	0.0000 0.0977 0.2663
d+R	0.0488 0.1629 0.2663	d-R	0.0195 0.1629 0.6658
d+B	0.0195 0.0977 0.0000	d-B	0.0488 0.2280 0.9321
d+MB	0.0000 0.0000 0.0000	d-MB	0.0684 0.3257 0.9321

Tabla 6.8. Valores de las distancias a las alternativas ideal y anti-ideal

**Paso 10:** Calcular el coeficiente de proximidad. (Tabla 6.9).

RA <sub>1</sub>	0.0460 0.6533 11.9366
RA <sub>2</sub>	0.0198 0.4747 9.2296
RA <sub>3</sub>	0.0193 0.4827 8.2866
RMm	0.0000 0.0000 0.0000
Rm	0.0000 0.3000 3.8947
RR	0.0210 0.5000 9.7367
RB	0.0524 0.7000 13.6314
RMB	0.0734 1.0000 13.6314

Tabla 6.9. Coeficientes de proximidad

**Pasos 11 y 12:** *Defuzzificación*, ordenación de las alternativas y salida lingüística de resultados.

	Salida defuzzificada	Orden	Salida lingüística
<b>IA<sub>1</sub></b>	2.4326	1	Regular-Bueno
<b>IA<sub>2</sub></b>	1.8580	2	Malo-Regular
<b>IA<sub>3</sub></b>	1.7061	3	Malo-Regular
<b>IMm</b>	0.0000		
<b>Im</b>	0.8491		
<b>IR</b>	1.9596		
<b>IB</b>	2.7473		
<b>IMB</b>	2.9508		

*Tabla 6.10. Alternativas y salidas lingüísticas*

## 6.5. Conclusiones

En la mayoría de los casos los sistemas de decisión dan las salidas de los datos en forma numérica. Parece más lógico que el decisor quiera que su resultado sea dado en los mismos términos que el input. Por ello, hemos incluido ciertas modificaciones al método TOPSIS de manera que la salida de los datos de esta metodología sea en los mismos términos que la entrada de datos, que en este caso se ha realizado mediante términos lingüísticos.

En este artículo, hemos estudiado un problema de decisión multicriterio difuso como ejemplo de aplicación de las modificaciones propuestas al método TOPSIS difuso, para así apreciar la bondad de las aportaciones al mismo.

**NOTA:** En este capítulo y en el anterior, se ha presentado una metodología híbrida para la evaluación de alternativas, por un lado el AHP para la obtención del peso de los criterios y por otro el método TOPSIS, donde hemos incluido modificaciones que lo mejoran frente a la versión clásica, para la evaluación de las alternativas. Esto nos permite trabajar con una metodología híbrida donde utilizamos las fortalezas de cada uno de los métodos clásicos utilizados.

## 6.6. Referencias

### 6.6.1. Figuras

Figura 6.1. Representación de  $S_L(A_i)$ ,  $S_M(A_i)$  y  $S_R(A_i)$

Tabla 6.1. Valores numéricos asociados a las etiquetas de bondad

Tabla 6.2. Pesos normalizados de la importancia de los criterios

Tabla 6.3. Información lingüística del problema de decisión

Tabla 6.4. Matriz de decisión

Tabla 6.5. Matriz Normalizada

Tabla 6.6. Matriz ponderada normalizada

Tabla 6.8. Solución ideal positiva y negativa

Tabla 6.8. Valores de las distancias a las alternativas ideal y anti-ideal

Tabla 6.10. Alternativas y salidas lingüísticas

Tabla 6.9. Coeficientes de proximidad

### **6.6.2. Texto**

[30] Método Topsis Difuso con etiquetadas lingüísticas

<http://www.uhu.es/estylf2010/trabajos/SS11-01.pdf>



# Capítulo 7. Aspectos Medioambientales y Sociales.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

# CAPÍTULO 7: ASPECTOS SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES

## 7.1. Introducción

La primera ventaja de una cierta cantidad de fuentes de energía renovables es que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones durante su funcionamiento, tampoco presentan ningún peligro suplementario, como por ejemplo el riesgo nuclear.

Otro aspecto muy positivo es que no generan habitualmente residuos, alno necesitar combustibles, incluso los aprovecha para generar energía eléctrica como es el caso de los residuos sólidos urbanos, y se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y combustión, lo que beneficia la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, etc.

La segunda piedra angular de las energías renovables son sus beneficios social es ya que es una fuente generadora de empleo, incide fuertemente en el aumento de ingresos de los municipios donde se instalan e invierte en zonas rurales y menos desarrolladas. No ocasionan peligros para la salud de los trabajadores, al no generar enfermedades profesionales, como es el caso de los mineros; al contribuir a disponer de una atmósfera más limpia mejora la calidad de vida de las personas. Al no necesitar combustible eliminan la amenaza futura de desabastecimiento energético debido al agotamiento de las reservas existentes, asimismo es posible alimentar de energía a aquéllas zonas alejadas de las infraestructuras necesarias al poderse constituir con estas tecnologías la generación distribuida [2] [3] [4].

Es cierto que no todas las energías renovables y del régimen especial son iguales, y algunas sí obtienen energías con procesos de combustión como la biomasa, que tienen varios inconvenientes y que existen detractores, pero se puede afirmar con rotundidad que la sociedad las quiere y que el planeta las necesita.

## 7.2. Objetivo de éste capítulo

Alternativas	Criterios	Subcriterios
Eólica (A <sub>1</sub> )	Medioambiente (C <sub>1</sub> )	¿Qué niveles de gases de efecto invernadero emite la planta? (C <sub>11</sub> )
Solar (A <sub>2</sub> )		¿Cuánto terreno hace falta para la instalación? (C <sub>12</sub> )
Micro-cogeneración (A <sub>3</sub> )	Sociedad (C <sub>2</sub> )	¿Hay prejuicios en contra de la tecnología? (C <sub>21</sub> )
Micro-trigeneración (A <sub>4</sub> )		¿Se generan ruidos molestos para los vecinos de la zona? (C <sub>22</sub> )
Biomasa (A <sub>5</sub> )		¿Cuánto empleo se crea en la localidad? (C <sub>23</sub> )
Hidráulica (A <sub>6</sub> )	Tecnología (C <sub>3</sub> )	¿La tecnología está madura? (C <sub>31</sub> )
		¿Hay proveedores de la tecnología cerca? (C <sub>32</sub> )
		¿Cuál es el rendimiento de la instalación? (C <sub>33</sub> )
		¿Cuál es la disponibilidad de los recursos? (C <sub>34</sub> )
	Economía (C <sub>4</sub> )	¿Cuál es la inversión inicial? (C <sub>41</sub> )

	¿Cuánto cuesta la materia prima? (C <sub>42</sub> )
	¿Cuál es el tiempo de Pay-back? (C <sub>43</sub> )
	¿Cuánto se ingresa? (C <sub>44</sub> )
	¿Cuáles son los costes? (C <sub>45</sub> )

El objetivo es darle respuesta a los criterios que se centra en este capítulo como son Medioambiente y Sociedad, para poder dar respuesta a los diferentes subcriterios que tienen relevancia en nuestro estudio;

- ¿Qué nivel de gases efecto invernadero emite la planta?
- ¿Cuánto terreno hace falta para la instalación?
- ¿Hay perjuicios en contra de la tecnología?
- ¿Se generan residuos molestos para los vecinos de la zona?
- ¿Cuánto empleo se crea en la localidad?

Para posteriormente valorar y obtener la clasificación de las diferentes alternativas que entran en juego en nuestro estudio, sacando al final las conclusiones oportunas.

Para llevar acabo lo indicado, nos hemos ayudado de la información recogida en proyectos anteriores realizados por los compañeros Mario Bastida Dólera y Carlos Baldasquín Cáceres, dirigido por Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Que al mismo tiempo hemos ido comprobando que los datos e información no haya cambiado a día de hoy, y en caso de ser así, hemos ido actualizando la información necesaria para dar respuesta de manera correcta y actual, a las cuestiones que se nos plantea.

### 7.3. Aspectos Medioambientales

#### 7.3.1. Impactos más relevantes de la generación eléctrica

**¿Qué entendemos por impacto de la generación de la energía eléctrica sobre el medio ambiente y la salud pública?** Sin duda, muchas cosas bastante diferentes. Puntualicemos algunas de ellas.

- Daños a los trabajadores del sector: Los detrimentos que pueden llegar a sufrir los trabajadores de las usinas y de las industrias o actividades relacionadas: minería, transporte, manufactura, construcción, etc..
- Daños al público: El daño causado el público en general, expresado por ejemplo en lesiones reales, enfermedades y accidentes mortales. La frecuencia de estos daños se puede deducir a partir de testimonios históricos o bien calcular mediante modelos probados.

- Daños al medio ambiente por emisiones: La clase y alcance de la contaminación ambiental debida a las emisiones de las plantas generadoras o máquinas, transporte, minería, construcción, etc. Las emisiones pueden ser gases de combustión, aerosoles, efluentes líquidos, radiaciones, etc.
- Daños al medio ambiente por desechos: La clase, cantidad y toxicidad de los desechos producidos en todo el ciclo, la forma de manipularlos y aislarlos del medio ambiente.
- La racionalidad del uso de los recursos naturales, es decir cuando un recurso puede tener varias aplicaciones, qué prioridades se dan a las mismas.
- La eventualidad de accidentes graves y sus consecuencias.

Todos estos factores deben ser tenidos en cuenta cuando se analiza el impacto potencial o real de la producción de energía eléctrica.

Otro aspecto a considerar es el económico: ¿cuánto cuesta finalmente el kWh generado por cada una de estas fuentes? En este caso, la respuesta depende del lugar: por ejemplo, para los países árabes nada es más económico que quemar petróleo, para los franceses lo más barato es la energía nuclear, para los islandeses, que viven en medio de erupciones, nada se compara con la geotermia. En otros países esto puede depender mucho del momento, si se puede tener un fácil y económico acceso al crédito y no hay urgencia en la ampliación del parque eléctrico será posible decidir por tal o cual alternativa con mucha más facilidad que si el país pasa por un momento económico desfavorable y la necesidad de aumentar la producción de electricidad es urgente. Este aspecto muchas veces condiciona fuertemente la adopción de soluciones más favorables al medio ambiente que otras.

El análisis de todos estos aspectos debe ser hecho científicamente, en un marco claramente multidisciplinario, ya que implica comparar y utilizar en conjunto datos surgidos de sectores muy diversos como son, entre otros la producción de energía eléctrica, la industria de las construcciones, la exploración y explotación de yacimientos mineros y fósiles, la salud pública, la salud ocupacional, la agricultura, la alimentación de la población, la economía, la meteorología y muchas otras.

Un ejemplo de este tipo de análisis lo muestran las Conclusiones del Congreso de Helsinki sobre Energía Eléctrica y Medio Ambiente, en el que participaron expertos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, la Agencia de Energía Nuclear, el Banco Mundial, la Comisión de Comunidades Europeas, la Comisión Económica para Europa, el Consejo de Ayuda Económica Mutua, el Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, el Organismo Internacional de Energía Atómica, la Organización Mundial de la Salud, la Organización Mundial de Meteorología, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entre varios otros organismos.

Los resultados más importantes de este congreso indican que los daños más graves para la salud y el medio ambiente provienen de las centrales a combustible fósil y que todas las otras formas de producir energía eléctrica tienen efectos comparables entre sí, pero mucho

menores que los causados por los combustibles fósiles. Por otro lado, a pesar de ello, no se espera que se pueda remplazar por varias décadas y en cantidades sustantivas el uso de combustible fósil para producir electricidad, a menos de generar una drástica merma en la calidad de vida de los habitantes de los países desarrollados y un estancamiento en el progreso de los países en vías de desarrollo.

Por otra parte, sólo la mitad del consumo mundial de energía se refiere a la energía eléctrica; esto nos indica que el impacto ambiental de otras formas de consumo de energía primaria tales como el quemado de hidrocarburos por los motores a explosión del transporte, la calefacción, cocina, procesos industriales (por ejemplo, siderurgia) debe también ser evaluado paralelamente [35].

A la hora de evaluar y de comparar las distintas fuentes energéticas que pueden ser utilizadas para la producción de electricidad, cada vez cobran mayor importancia las consideraciones referidas a su impacto ambiental. Estas consideraciones son tan importantes que están afectando decisivamente la configuración del futuro energético de muchos países. [31]

#### **7.3.1.1. Impacto locales**

Los daños ambientales derivados de la producción, transporte y consumo de las distintas fuentes de energía han sido asociados con los siguientes:

- **El agotamiento progresivo de los recursos no renovables.** La mayoría de las fuentes actuales de energía son recursos no renovables, con riesgo de agotamiento, con el consiguiente impacto en las generaciones futuras.
- **Las emisiones a la atmósfera.** La producción, transporte y consumo de energía es hoy fuente de emisiones atmosféricas: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, el metano, el monóxido de carbono, los metal pesados, las partículas en suspensión y los clorofluorocarbonos, son algunos de los contaminantes principales.
- **La contaminación del agua y de los suelos.** Se producen asimismo vertidos que contaminan el agua (eutrofización, por ejemplo) y los suelos con consecuencias para la salud humana y los ecosistemas.
- **La generación de residuos.** La producción y consumo de energía produce residuos sólidos, que a menudo son de difícil y costoso tratamiento para evitar impactos ambientales significativos. Los residuos radioactivos representan un problema particularmente importante.
- **La utilización del suelo.** La producción, transporte, almacenamiento y consumo de energía suponen una importante ocupación de suelos, y desplazan otros usos de la corteza terrestre.

- **La generación de ruidos.** La polución acústica es particularmente importante en el caso de algunas fuentes energéticas.
- **Los impactos visuales sobre el paisaje.** En ocasiones, las instalaciones energéticas dañan el paisaje y representan un impacto visual negativo.

### 7.3.1.2. Impacto globales

Por otra parte, cada vez preocupan más los impactos a nivel global o mundial:

- **El cambio climático,** como consecuencia de la acentuación del efecto invernadero. Con sus consecuencias, entre otras, de posible subida del nivel del mar, extensión de la aridización, y difusión de enfermedades.
- **La disminución de la capa de ozono estratosférico,** con posibles consecuencias para la salud humana (mayores cánceres de piel y enfermedades de visión, por ejemplo)
- **La lluvia ácida,** con consecuencias negativas para los ecosistemas y para las infraestructuras humanas.
- Los efectos negativos sobre la **biodiversidad.**

La disminución de la biodiversidad es un grave problema no sólo estético y cultural, sino también, y sobre todo, de disminución de la información genética que necesitamos para producir nuevos fármacos y nuevos materiales.

Por todas estas razones, se han empezado a comparar en profundidad los impactos ambientales de las principales fuentes energéticas de producción eléctrica. De ahí el estudio que comentamos aquí Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). *Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica: Análisis de Ciclo de Vida de ocho tecnologías de generación eléctrica.* Madrid, 1999.

### 7.3.2. Emisiones contaminantes en la generación eléctrica

Las tendencias actuales de calentamiento son bastante significativas porque, lo más seguro, es que son inducidos por el ser humano y sus actividades y, más preocupante, está sucediendo a un ritmo que no tiene precedentes en los últimos 1,300 años.



Figura 7.1. Fuente NOAA, gráfico original de [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

Hay ciertas evidencias y hechos que no pueden negarse ni disputarse en torno al calentamiento global del planeta:

- El dióxido de carbono y otros gases atrapan el calor, hecho demostrado en el siglo XIX. Sus capacidades para influir sobre la transferencia de la energía infrarroja en la atmósfera es la base científica misma de muchos instrumentos diseñados por la Jet Propulsión Laboratorio (JPL), tales como el AIRS. Un aumento en los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> debe resultar en un aumento de la temperatura de la Tierra.
- Núcleos de hielo extraídos en perforaciones de hielos permanentes de Groenlandia la Antártida y glaciares de montañas tropicales, muestran que el clima responde a los cambios de energía emitida por el Sol, las variaciones de la órbita terrestre y los niveles de gases invernadero en la atmósfera terrestre. Otro aspecto de estas evidencias es que muestran que cambios fuertes en el clima han sucedido en un periodo corto (desde el punto de vista geológico) en cosa de decenas de años, no millones ni miles de años [36].

El Inventario refleja que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del año 2008 se sitúan en 405.048 Kilo toneladas CO<sub>2</sub>-eq, lo que supone una reducción porcentual del 7,7 % con respecto las emisiones de 2007, situando las emisiones globales en un 39,8% por encima de las emisiones del año base.

El descenso de las emisiones se debe principalmente a una mejora de la intensidad energética y a un cambio en el mix de producción de energía, con un claro incremento de las renovables y una disminución del uso del carbón como consecuencia de los precios relativos de los combustibles fósiles y del precio de la tonelada de CO<sub>2</sub> en los mercados internacionales.

Se observa también una disminución de las emisiones a causa de un menor uso de combustibles en el sector transporte y en determinadas actividades industriales como la fabricación de cemento. También se han producido mejoras metodológicas en el cálculo de

factores de emisión del sector transporte, motores estacionarios y uso de colas en el cálculo de emisiones. [42]

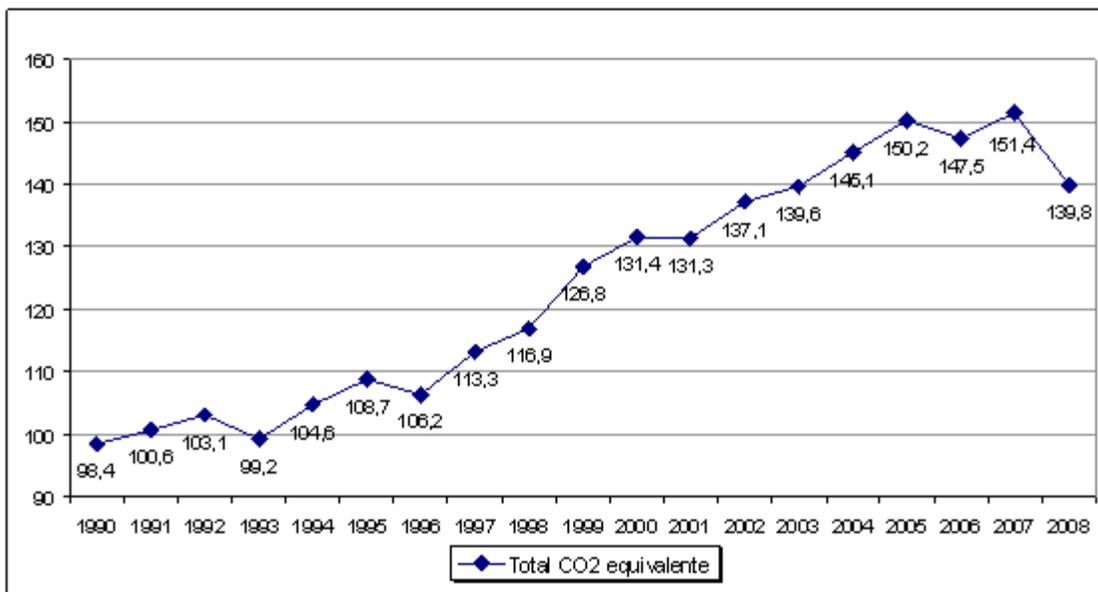


Figura 7.2. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq edición 1990-2008

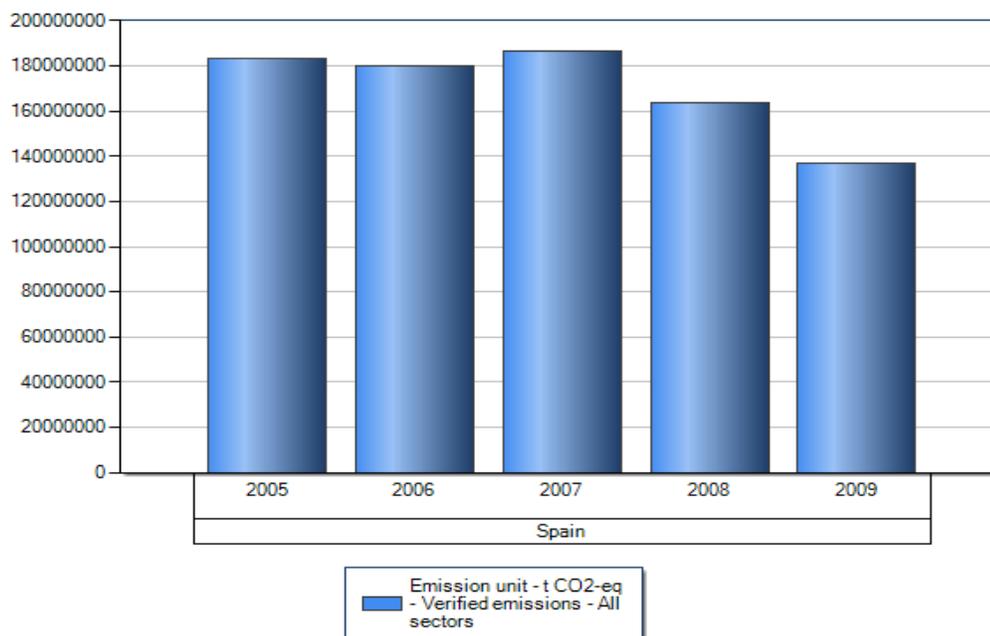


Figura 7.3. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en España (2005-2009)[43]

### EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES

Millones de toneladas de CO<sub>2</sub>

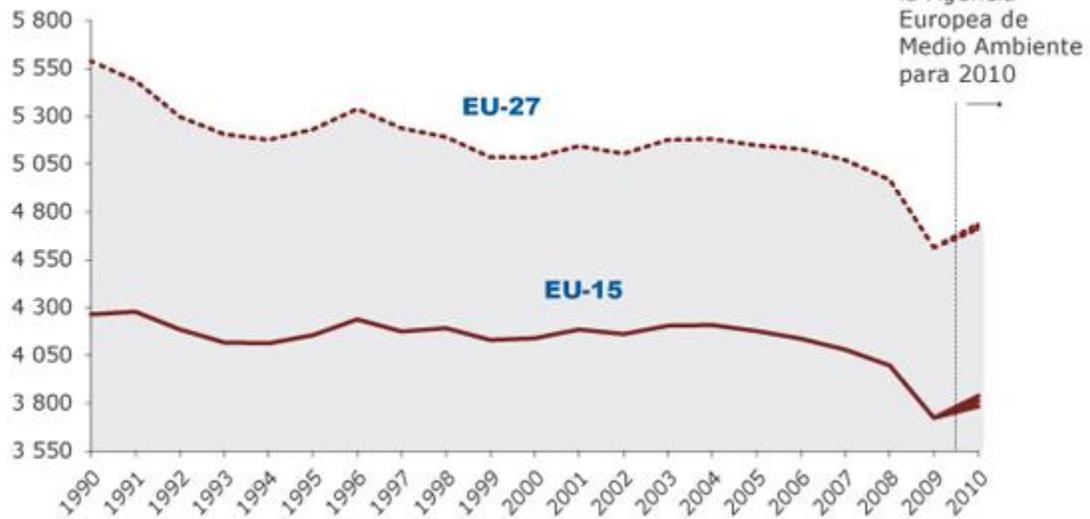


Figura 7.4. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE [46]

### VARIACIÓN 2009-2010

En porcentaje, %

<b>España</b>	<b>-2,9</b>	
<b>Irlanda</b>	<b>-2,9</b>	
<b>Grecia</b>	<b>-1,8</b>	
<b>Rumanía</b>	<b>-0,9</b>	
<b>Portugal</b>		0,3
<b>Italia</b>		0,6
<b>Eslovaquia</b>		1,4
<b>Francia</b>		1,4
<b>R. Checa</b>		2,0
<b>Eu-15</b>		2,3
<b>EU-27</b>		2,4
<b>Reino Unido</b>		3,0
<b>Polonia</b>		3,8
<b>Alemania</b>		3,8

Tabla 7.1. Variación 2009-2010 en porcentaje %

Las emisiones de CO<sub>2</sub> fósil durante el 2000 han aumentado en un 7,6% respecto a las del 1990, año de referencia del Protocolo de Kioto, según un estudio elaborado por Ecologistas en Acción. Los países desarrollados son causantes del 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles.

Ecologistas en Acción ha evaluado el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>, por países, derivadas del uso de combustible fósiles durante el año 2000 con los datos de consumo de carbón,

petróleo y gas publicados por la empresa British Petroleum, con el fin de tener un retrato reciente de la situación mundial en emisiones de CO<sub>2</sub>. Durante el año 2000 se vertieron a la atmósfera 24.511 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> derivadas del uso de combustibles fósiles, y desde el año 1990, año de referencia del Protocolo de Kioto, hasta el año 2000, el nivel global de emisiones de CO<sub>2</sub> fósiles ha crecido un 7,6%.

Este valor promedio esconde enormes variaciones regionales y nacionales: la media de emisiones per cápita se sitúa en el año 2000 en 3,94 toneladas CO<sub>2</sub>/habitante, pero su dispersión se extiende desde 22 toneladas CO<sub>2</sub>/habitante en EE UU a 0,07 en Bangladesh. Estados Unidos continuó siendo el mayor emisor de CO<sub>2</sub> del mundo, con el 26%, seguido del conjunto de 15 países de la Unión Europea. Entre ambos dan cuenta del 40% de los vertidos de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante el pasado año.

En general, se encuentra que, las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el consumo de combustibles fósiles han aumentado en prácticamente todos los países con muy concretas excepciones: Alemania, Reino Unido, Luxemburgo, Suecia y Suiza, por una parte, y todos los países del antiguo bloque del Este por otra. Es especialmente destacable el camino emprendido por Alemania y Reino Unido ya que se trata de economías desarrolladas y altamente industrializadas. Alemania además está en camino de cerrar sus centrales nucleares. Los países en que han crecido más rápido las emisiones de CO<sub>2</sub> fósil son los países en vías de desarrollo, con un consumo de energía por habitante bajo o muy bajo, aunque muy poblados.

Son los países a los que EE UU, Australia y otros presentan como los “futuros causantes” del cambio climático, olvidando que el cambio climático ya ha comenzado y no debido precisamente a esos países, por cierto, la gran mayoría de los habitantes del planeta, sino a las naciones ricas o desarrolladas, cuyas emisiones continúan en incremento y ni siquiera se estabilizan. España resulta ser uno de los países de Europa cuyas emisiones han crecido más en los últimos diez años. Según Ecologistas en Acción desde 1990 las emisiones de CO<sub>2</sub> fósil aumentaron en un 42%, convirtiéndonos en el quinto emisor de la Unión Europea, con el 9,5% y 8,30 toneladas CO<sub>2</sub>/habitante.

La Agencia Europea de Medio Ambiente acaba de hacer público su informe de seguimiento de las emisiones de los seis gases de efecto invernadero contemplados por el Protocolo de Kioto, y España figura como el país de la Unión Europea cuyas emisiones ha crecido más en el periodo 1990-1999, y también es el país que se encuentra a mayor distancia de su objetivo de Kioto. [37]

Además de que la energía nuclear ha sido la fuente que más electricidad ha producido y más horas ha operado a lo largo del pasado año (7.409 h), su producción ha representado el 40,05% de la electricidad libre de emisiones generada en España. [38]

El Observatorio de WWF de febrero de 2012 destaca el record histórico de la energía eólica que este mes ha cubierto el 19,3% de la demanda del mix eléctrico peninsular. Se sitúa como la tercera tecnología del sistema, aunque todavía por detrás de la nuclear y del carbón. En relación a las emisiones de CO<sub>2</sub>, WWF constata que febrero cierra con un

incremento de casi el 40% respecto al mismo mes de 2011, como consecuencia del Real Decreto Ley que apoya la quema de carbón nacional. [39]

Según Raquel García Monzón, Técnico de Energía del Programa de Cambio Climático de WWF España: “El aumento de la producción de electricidad con fuentes renovables, como el record histórico de la eólica en febrero de 2012, es una clara señal de que este tipo de tecnologías son capaces de cubrir la demanda eléctrica del sistema. Además, aportan beneficios como la lucha contra el cambio climático, ya que evitan toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyen al ahorro en importaciones de combustibles fósiles y mantienen el precio medio de la electricidad por debajo de la media europea”. Y añade: “Es una buena noticia para el sector renovable, sobre todo ahora que los precios del barril de petróleo de Brent están en máximos históricos”.

Contribución de las emisiones contaminantes;

- Los valores de las emisiones específicas de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno registrados en febrero de 2012 han sido: 0,583 gramos y 0,413 gramos por kWh producido, respectivamente. Esto significa un gran aumento con relación a las cifras alcanzadas en febrero de 2011 (0,330 gr SO<sub>2</sub> y 0,262 gr NO<sub>x</sub>).
- Las emisiones medias de CO<sub>2</sub> en febrero de 2012 fueron de 273 kg de CO<sub>2</sub> por MWh generado. Estas emisiones son muy superiores al valor medio registrado en el mismo mes de 2011 (190 kg/MWh).

En febrero de 2012 se ha producido un aumento de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> respecto a las de febrero de 2011. Mientras que en febrero de 2011 las emisiones totales eran de 4.281.094 ton de CO<sub>2</sub>, en el mismo mes de 2012 han llegado hasta los 6.9136.4980 ton CO<sub>2</sub>. Son un 38,28% superior a las del mismo mes de 2011. [39]

### **7.3.2.1. Indicadores de Calidad Ambiental**

El sistema eléctrico peninsular cierra el mes de febrero de 2012 con un aumento del 38,28% de sus emisiones totales de CO<sub>2</sub> respecto a febrero de 2011. Esto es consecuencia de un aumento de la producción de electricidad con carbón que, a raíz del Real Decreto de Ayudas al Carbón aprobado por el Gobierno en 2011, obliga a las compañías eléctricas a quemar un porcentaje de carbón nacional, que es de peor calidad y más contaminante. El resultado es un empeoramiento del indicador de calidad ambiental para las emisiones de CO<sub>2</sub>. [39]

### **7.3.2.2. Aumento de emisiones CO<sub>2</sub> en el Sector Eléctrico por la quema de Carbón Nacional**

El Observatorio de WWF de enero destaca que el carbón continúa siendo la primera fuente de generación de electricidad del mix. La consecuencia es un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> de más del 42% respecto a las registradas en enero de 2011. La organización alerta de que España puede alejarse del cumplimiento de sus compromisos de

reducción de emisiones para 2020 y de la lucha contra el Cambio Climático, si continúa generando electricidad con fuentes contaminantes.

WWF ha analizado la situación del balance energético del mes de enero de 2012 y subraya que España no puede ir a contracorriente de Europa. La Comisión Europea recientemente ha instado a los Estados Miembro a contribuir con una economía baja en carbono y trabajar para conseguir objetivos más ambiciosos en reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>: un 30% para 2020. La organización afirma que estas metas son alcanzables a través de la inversión en tecnologías limpias y sostenibles, como las energías renovables, la eficiencia y el ahorro energético.

Según Raquel García Monzón, Técnico de Energía del Programa de Cambio Climático de WWF España: “Los cambios normativos, como la aprobación del Real Decreto Ley 1/2012, que suspende de forma temporal los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, cogeneración y residuos, generan desconfianza para los inversores en este tipo de tecnologías sostenibles, limpias y autóctonas”.

La solución debe contemplar una visión a largo plazo de la política energética. Además, el problema del déficit de tarifa no se resuelve con el RDL aprobado por el Gobierno sino con una reforma integral del sector eléctrico. Esto implica modificar el sistema de cálculo de la tarifa eléctrica, la estructura de precios y el modelo retributivo, que contemple los objetivos ambientales, estratégicos y económicos.

WWF considera que si nuestro país continúa quemando carbón nacional seguirán aumentando las emisiones de CO<sub>2</sub>, además de otros gases contaminantes, como el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno. Además, si España persiste en apostar por las fuentes de energía sucias, seguirá aumentando su deuda exterior y su dependencia energética porque tendrá que comprar petróleo y gas de otros países a precios cada vez más caros. Esta tendencia puede invertirse si se apuesta por generar la electricidad con fuentes sostenibles y limpias, como son las energías renovables, con recursos autóctonos como el sol, el viento, el agua, la energía del mar y la biomasa. WWF concluye que el fomento de las energías renovables es el mejor camino para conseguir un desarrollo sostenible y la creación de empleo de calidad.[40]

### **7.3.2.3. Energía Eólica en lugar del Carbón**

Cada Kwh. de electricidad generada por energía eólica en lugar de carbón, evita.

- 0,60 Kg. de CO<sub>2</sub>, dióxido de carbono.
- 1,33 g. de SO<sub>2</sub>, dióxido de azufre.
- 1,67 g. de NO<sub>x</sub>, óxido de nitrógeno.

La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente miles de litros de petróleo y miles de kilogramos de lignito negro en las centrales térmicas. Ese mismo generador produce idéntica cantidad de energía que la obtenida por quemar

diariamente 1.000 Kg. de petróleo. Al no quemarse esos Kg. de carbón, se evita la emisión de 4.109 Kg. de CO<sub>2</sub>, lográndose un efecto similar al producido por 200 árboles. Se impide la emisión de 66 Kg. de dióxido de azufre -SO<sub>2</sub>- y de 10 Kg. de óxido de nitrógeno -NO<sub>x</sub>- principales causantes de la lluvia ácida.

La energía eólica es independiente de cualquier política o relación comercial, se obtiene en forma mecánica y por tanto es directamente utilizable.

WWF ha analizado la situación del balance energético de febrero de 2012 y destaca el repunte de la producción eólica, generando 4.884 GWh. Esto equivale a 1,8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> ahorradas en febrero 2012. Además, evita la importación de combustibles fósiles, y por tanto la transferencia de renta al extranjero por un valor de 260 millones de euros. Esta energía limpia también genera puestos de trabajo, ya que solo la eólica da empleo a 30.000 personas. [39]

Al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas. [49]

#### **7.3.2.4. Los Gases de Efecto Invernadero**

Se llama efecto invernadero al fenómeno por el cual determinados gases de la atmósfera planetaria retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. Afecta a todos los cuerpos planetarios dotados de atmósfera. Es un proceso normal que evita que la energía del Sol recibida constantemente por la Tierra, vuelva inmediatamente al espacio, produciendo a escala planetaria un efecto similar al observado en un invernadero.

Aunque la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera es muy pequeña, son los causantes de la diferencia de temperatura entre los -6° que habría en su ausencia y los 15° reales.

- Vapor de Agua, su cantidad en la atmósfera no está influida directamente por la acción del hombre. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera depende fundamentalmente de la temperatura de la superficie del océano. La mayor parte se origina como resultado de la evaporación natural, en la que no interviene la acción del hombre.
- CO<sub>2</sub>, supone el 70% de los gases de Efecto Invernadero. La concentración en la atmósfera es debido al uso de combustibles fósiles para procesos industriales y medios de transporte.
- Metano (CH<sub>4</sub>), contribuye en un 24% al efecto invernadero. Se genera a partir del tratamiento de aguas residuales, al aumento masivo de crianza de rumiantes como alimento, fertilizantes agrícolas, incineradoras de residuos, etc.
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) contribuye en un 6%, también utilizado en aerosoles.

- Hidrocarburos (HFC) por el uso de los PFC.[41]

La actual Concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> excede de forma exponencial la variación natural de los gases a lo largo de los últimos 650.000 años. Su aumento se debe a la acción industrial del hombre y a la destrucción de áreas verdes:

- Quema de combustibles fósiles
- Producción de cemento
- Cambios en el uso de la tierra, especialmente por quema de bosques y deforestación

### **7.3.2.5. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en la Región de Murcia**

Las emisiones medias de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de los coches matriculados en enero de este año en la Región de Murcia se sitúan en 133 gramos por kilómetro recorrido, por debajo de la media nacional (134). Asimismo, las emisiones de la Región se encuentran entre las más bajas de todas las comunidades autónomas, solo superiores a Baleares con 129 gramos por kilómetro recorrido, Galicia y Cantabria con 130 gramos; Extremadura y Comunidad de Madrid (132 gramos). Según datos de la Agencia Tributaria, a los que ha tenido acceso Europa Press, las mayores emisiones se registran en enero en las ciudades autónomas de Melilla y Ceuta (169 y 148 g/Km respectivamente), y entre las comunidades autónomas destacan Canarias (141); La Rioja (139) y Cataluña (138). También superan la media española Aragón (137); Castilla y León (136); y Castilla-La Mancha y Comunidad Valenciana (ambas con 135 gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido). [44]

La Consejería de Universidades, Empresa e Investigación, a través de la Dirección General de Industria, Energía y Minas, es la encargada de analizar el consumo y la producción energética de la Región. De este balance se desprende que las emisiones de gases contaminantes de la Región son un 26 por ciento inferiores a la media nacional.

De este modo, el mix energético regional, compuesto por todas las tecnologías energéticas que satisfacen la demanda, tiene una capacidad para producir 26.600 giga vatios horas (GWh) de energía eléctrica, cantidad con la que se pueden abastecer más de 3,5 millones de hogares.

El consejero José Ballesta explicó que “este mix energético no solo asegura la demanda regional, sino que podría abastecer a cuatro regiones como la nuestra”, según han informado fuentes del Gobierno regional en un comunicado.

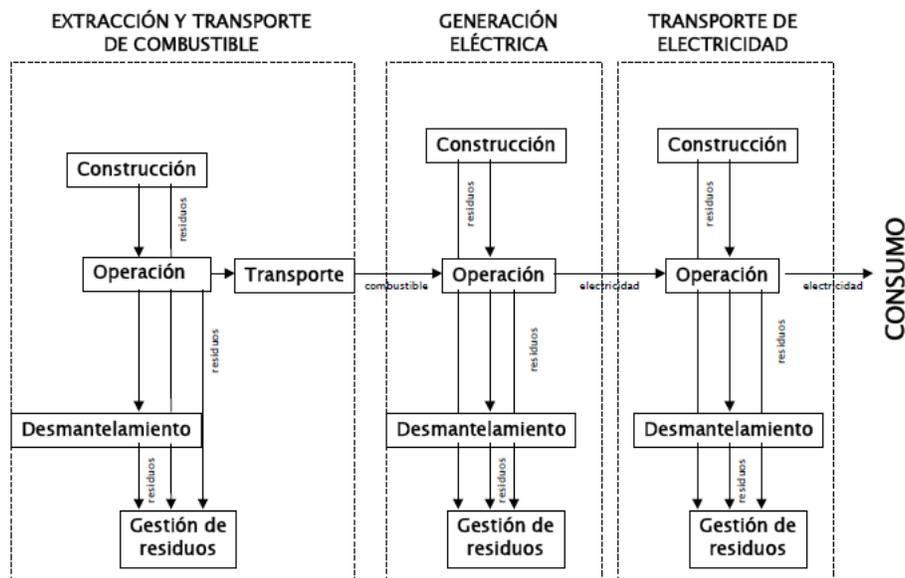
Por lo tanto, explicó el consejero, “pese a que producimos energía que consumen otras comunidades autónomas, las emisiones de CO<sub>2</sub> por habitante en la Región de Murcia son bastante inferiores a la media nacional”.

Así, cada murciano emite al año dos toneladas menos de gases contaminantes que el resto de los habitantes de España. “Esta reducción de la contaminación es fruto de las políticas energéticas llevadas a cabo por el Gobierno regional y del trabajo conjunto del sector energético, constituido por empresas dinámicas y emprendedoras, que sitúan a la

región como una potencia generadora de energía limpia”, apuntó Ballesta. [45]

### 7.3.3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El estudio cuyos resultados acabamos de presentar ha sido realizado según la metodología de Análisis de Ciclo de Vida. (ACV).



*Figura 7.5.a. Ciclo de Vida de la Generación Eléctrica*

Es una herramienta de gestión ambiental reconocida internacionalmente ya que existen diferentes normas sobre la definición y cálculo del ACV sobre todo de la huella de CO<sub>2</sub> que, en definitiva, será el dato que utilizemos para implementar los MDMC.

Entre ellas están:

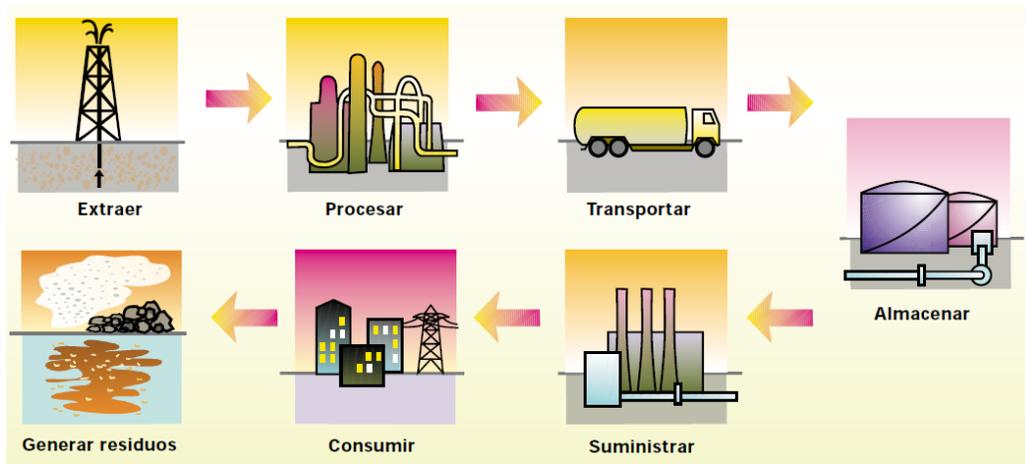
- UNE-ISO14064-1: Especificaciones con orientación, a nivel de organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de GEI.
- UNE-EN ISO 14040: ACV. Principios y marco de referencia.
- UNE-EN ISO 14044: ACV. Requisitos y directrices.
- The Greenhouse Gas Protocol: “A Corporate Accounting and Reporting Standard” (Revised Edition) (GHG Protocol).
- PAS 2050:2008: “Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services” [50].

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta de gestión ambiental que se basa en la recopilación y evaluación, conforme a un conjunto sistemático de procedimientos de las

entradas y salidas de:

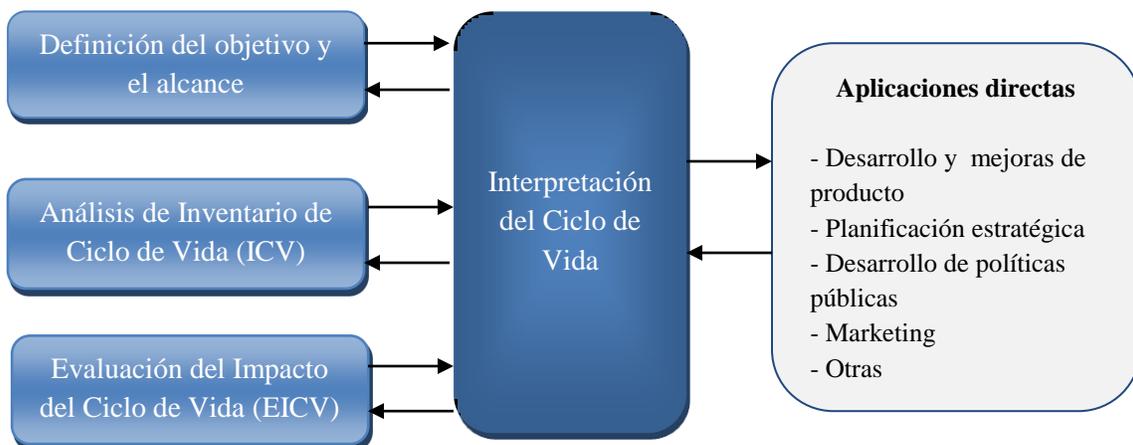
- 1 materias primas**
- 2 energías**
- 3 emisiones residuales**

de modo que permitan identificar los impactos ambientales atribuibles al proceso o producto analizado, a lo largo de todo su ciclo de vida. Es decir, “desde la cuna a la tumba”.



*Figura 7.5.b. Metodología del ACV*

La estructura metodológica del ACV es la mostrada en la figura 7.6. Se ilustran las conexiones entre estos cuatro pasos y se puede reconocer que se trata de un proceso iterativo, el cual permite incrementar el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.



*Figura 7.6. Fases de un análisis de ciclo de vida*

La metodología de un Análisis de Ciclo de Vida tiene cuatro etapas interrelacionadas;

1. Definición de objetivos y alcance

En este caso se ha pretendido efectuar un ACV de la generación eléctrica de un kilovatio hora y la determinación y valoración de las externalidades asociadas, para ocho tecnologías distintas y considerando 12 categorías de impacto. El ACV considera el ciclo que va desde la “cuna” (minería, por ejemplo) hasta la “tumba” (la generación de un kWh), pasando por la extracción y pre-tratamiento de combustibles, la construcción de centrales, la explotación de éstas y la gestión de los flujos residuales.

## 2. Análisis de inventario

En esta fase se identifican las cargas ambientales asociadas. Se establece un balance completo de las entradas de materia y de energía en el sistema y de las salidas de corrientes residuales, necesarias para la producción de un kilovatio-hora de electricidad

## 3. Evaluación de impactos

Es decir, la interpretación y evaluación de los inventarios realizados, asignando a cada flujo de entrada o salida su contribución relativa a cada una de las 12 categorías de impactos ambientales

## 4. Interpretación de resultados

Consideración de toda la información obtenida en las etapas anteriores, para la cuantificación final de los daños ambientales causados por cada tecnología en torno a cada categoría de impacto, y su traducción en eco puntos negativos.

### **7.3.4. Comparación de los Impactos Ambientales de Ocho Tecnologías de Generación Eléctrica.**

Las diferentes fuentes y tecnologías energéticas utilizadas para la generación eléctrica tienen impactos ambientales muy distintos.

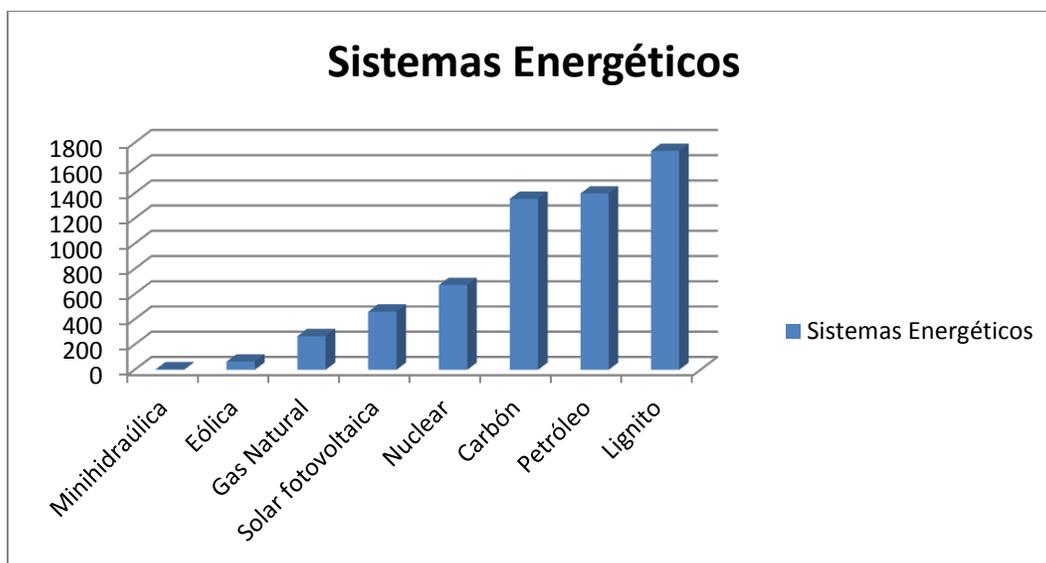
El Análisis de Ciclo de Vida de la generación eléctrica tiene por objetivo principal la evaluación de las externalidades ambientales asociadas a la generación de un kilovatio hora, partiendo de la evaluación física de los impactos, su clasificación y comparación. Posteriormente, se reducen todos los valores obtenidos a unos supra-valores finales que determinarán lo que se denomina eco-puntos. Cuanto mejor es (desde el punto de vista ambiental) la fuente energética, menos eco puntos debe tener.

El estudio del IDAE establece un sistema de comparación de tecnologías de generación eléctrica en función de su contribución más o menos negativa a doce problemas ambientales concretos. El resultado es el siguiente:

Sistemas energéticos	Lignito	Petróleo	Carbón	Nuclear	Solar Fotovoltaica	Gas Natural	Eólica	Mini-hidráulica
<b>Impactos ambientales</b>								
<b>Calentamiento Global</b>	135,00	97,00	109,00	2,05	15,40	95,80	2,85	0,41
<b>Disminución Capa de Ozono</b>	0,32	53,10	1,95	4,12	3,66	0,86	1,61	0,05
<b>Acidificación</b>	920,00	261,00	265,00	3,33	97,00	30,50	3,49	0,46
<b>Eutrofización</b>	9,83	9,76	11,60	0,28	1,97	6,97	0,27	0,06
<b>Metales pesados</b>	62,90	244,00	728,00	25,00	167,00	46,60	40,70	2,58
<b>Sustancias Cancerígenas</b>	25,70	540,00	84,30	2,05	75,70	22,10	9,99	0,76
<b>Niebla de Invierno</b>	519,00	135,00	124,00	1,50	53,30	3,08	1,48	0,15
<b>Niebla Fotoquímica</b>	0,49	36,90	3,05	0,32	3,03	3,47	1,25	0,06
<b>Radiaciones Ionizantes</b>	0,02	0,02	0,05	2,19	0,12	0,00	0,01	0,00
<b>Residuos</b>	50,90	0,62	12,90	0,28	1,84	0,58	0,29	0,52
<b>Residuos Radiactivos</b>	5,28	7,11	10,60	565,00	34,90	1,34	1,83	0,32
<b>Recursos Energéticos</b>	5,71	13,60	5,47	65,70	7,06	55,80	0,91	0,07
<b>TOTAL</b>	<b>1735,16</b>	<b>1398,11</b>	<b>1355,92</b>	<b>671,82</b>	<b>460,98</b>	<b>267,11</b>	<b>64,67</b>	<b>5,43</b>

*Tabla 7.2.a. Ecopuntos asignados a diversas tecnologías de generación eléctrica*

En resumen, pues, ordenándolos de mayor a menor impacto los resultados son los siguientes:



*Tabla 7.2.b. Eco puntos asignados a diversas tecnologías de generación eléctrica*

Como podemos observar en el gráfico precedente, las tecnologías basadas en el gas natural quedan bien posicionadas, detrás de la mini-hidráulica y la eólica, y bastante por delante de la solar fotovoltaica. Las diferencias con el carbón y con el petróleo son muy significativas. [48]

## **7.4. Aspectos Sociales**

### **7.4.1. Motivación y objetivo del estudio**

La Directiva Europea 2009/28/CE relativa al fomento de las energías procedentes de fuentes renovables, marca tres objetivos obligatorios para todos los estados miembros, y por tanto para España, para el año 2020: la disminución en un 20% de la emisión de gases de efecto invernadero, la disminución de un 20% del consumo de energía primaria mediante la eficiencia energética y alcanzar una cuota global del 20% de energías renovables en el consumo final bruto de energía y un objetivo del 10% para las energías renovables en el transporte. [51]

A partir de 2011, la futura ley de energías renovables y el nuevo Plan de Energías Renovables 2011-2020 establecerán un nuevo marco jurídico e institucional para dichas energías. Marco que modificará sustantivamente la relación entre iniciativa privada y ayudas públicas, y que deberá establecer la regulación del sector con el criterio de que el futuro del mismo no esté sujeto a vaivenes coyunturales ni a ayudas estatales o autonómicas.

La crisis actual, las restricciones financieras y lo arriba enunciado han afectado de forma importante al empleo en el sector de las energías renovables en relación con el existente en 2007. El sector más afectado es, por supuesto, el fotovoltaico.

Todo ello implica que disponer de un conocimiento de su actual realidad y de una hipótesis sobre sus potencialidades inmediatas son elementos muy importantes para la sociedad y las administraciones. Como lo es también -en el actual contexto de crisis social y económica determinar el empleo generado por estas nuevas fuentes de energía. Propósitos ambos que adquieren especial relevancia ante el reto que supone cambiar el actual modelo insostenible por un nuevo modelo productivo y energético y una economía bajas en carbono. [51]

### **7.4.2. Estudio Energías Renovables; generación de empleo en España, presente y futuro.**

Con la participación de el Director General del IDAE, Alfonso Beltrán y el Secretario Confederal de Medio Ambiente de CC.OO, Lorenc Serrano, se ha presentado el Estudio sobre Empleo Asociado al Impulso de las Energías Renovables en España, un estudio realizado por ISTAS para el IDAE con el objetivo de informar y ayudar a identificar medidas para el nuevo Plan de Energías Renovables 2011-2020 que elabora actualmente el Instituto.

### 7.4.2.1. Resumen del estudio del IDAE

El estudio presentado contiene información sobre la situación del sector de las energías renovables en 2010 centrándose en aquellos aspectos más relacionados con la cantidad y calidad del empleo generado. Se estima la cantidad de empleos directos e indirectos existentes en el sector, así como sus características según tecnología, tipo de actividad, modalidad de contratación, género y nivel de cualificación. También se incluyen previsiones de empleo para 2015 y 2020.

La principal fuente de los datos que se sintetizan en este resumen son las encuestas que fueron respondidas por 925 empresas. Estos datos se complementan con la información a la que se accedió a través de reuniones con informantes clave. La encuesta fue respondida por 925 empresas, lo que supone una muestra altamente representativa del sector. Los datos se refieren a comienzos de 2010.

- Situación empresarial del sector

La mayor parte de las empresas encuadradas en el sector de energías renovables se adscriben a cuatro campos de actuación:

Solar Fotovoltaico: 54,6%.

Solar Térmico: 41,8%.

Eólico: 24,4%.

Biomasa: 22,1%.

Las empresas de mayor tamaño se ubican principalmente en los subsectores Eólico y Solar Fotovoltaico; también, en menor medida, en Biomasa. Más de  $\frac{3}{4}$  partes de las empresas son totalmente independientes. Pero las mayores en término de empleo son multinacionales de diverso tipo.

Respecto a 2007, el grueso de las actividades de mayor peso se mantiene constantes. Las que experimentan mayor crecimiento son:

- Desarrollo de proyectos
- Construcción
- I+D+i (se triplica el número de empresas que declaran realizar investigación).

Como respuesta defensiva frente a la incertidumbre asociada a la crisis económica, los cambios en las normas y el desconocimiento respecto a las medidas de política energética que se adoptarán a partir de 2011, el 64,4%, de las empresas manifiestan que no tienen prevista ninguna inversión. Esta situación contrasta con las cifras de 2007 en las que cerca de un 60% de las empresas expresaban su intención de realizar inversiones.

En el 94% de las empresas observadas la plantilla no supera los/as 50 trabajadores/as. El 1,5% de las empresas tienen más de 250 trabajadores y, sin embargo, representan un

importantísimo porcentaje del volumen total de empleo.

- El empleo en las energías renovables en 2010

**Número de empleos:** el volumen de trabajadores/as dedicados/as a Energías Renovables en España se estima en torno a 70.152 (empleo directo). El empleo indirecto se estima en 45.570. Por tanto el total de empleos directos e indirectos asociados a las energías renovables es de 115.722 en 2010.

**Empleo existente en cada una de las energías analizadas:**

	<b>Empleos totales</b>	<b>%</b>
<b>Eólica</b>	30.651	43,6
<b>Solar Fotovoltaica</b>	19.552	27,9
<b>Solar Térmico</b>	6.757	9,6
<b>Actividades comunes a todos los subsectores</b>	4.263	6,1
<b>Biomasa</b>	3.191	4,5
<b>Incineración de Residuos</b>	1.415	2
<b>Hidráulica &amp; Mini Hidráulica</b>	1.078	1,5
<b>Biocarburantes</b>	964	1,4
<b>Biogás</b>	664	0,9
<b>Solar Termoeléctrico</b>	511	0,7
<b>Geotermia</b>	415	0,6
<b>Otros</b>	268	0,4
<b>Aerotermia (Bomba de calor)</b>	184	0,3
<b>Mini Eólica</b>	165	0,2
<b>Mareomotriz</b>	74	0,1
<b>TOTAL</b>	<b>70.152</b>	<b>100</b>

*Tabla 7.3. Distribución de empleados directos por subsectores de actividad*

	<b>Empleos totales</b>	<b>Empleo indirecto</b>	<b>Empleo total</b>
<b>Eólica</b>	30.651	24.521	55.172
<b>Solar Fotovoltaica</b>	19.552	8.798	28.350
<b>Solar Térmico</b>	6.757	3.041	9.798
<b>Actividades comunes a todos los subsectores</b>	4.263	2.718	6.981
<b>Biomasa</b>	3.191	2.808	5.999
<b>Incineración de Residuos</b>	1.415	637	2.052
<b>Hidráulica &amp; Mini Hidráulica</b>	1.078	485	1.563
<b>Biocarburantes</b>	964	988	1.952
<b>Biogás</b>	664	681	1.345
<b>Solar Termoeléctrico</b>	511	307	818
<b>Geotermia</b>	415	162	577
<b>Otros</b>	268	171	439
<b>Aerotermia (Bomba de calor)</b>	184	83	267
<b>Mini Eólica</b>	165	132	297
<b>Mareomotriz</b>	74	38	112
<b>TOTAL</b>	<b>70.152</b>	<b>45.570</b>	<b>115.722</b>

*Tabla 7.4. Distribución del empleo indirecto generado por subsectores de actividad*

	<b>Empleos totales</b>	<b>%</b>
<b>Fabricación de equipos</b>	26.387	37,6
<b>Construcción e Instalación</b>	11.840	16,9
<b>Desarrollo de proyectos y servicios</b>	12.834	18,3
<b>Comercialización, venta de equipos</b>	7.228	10,3
<b>I + D + i</b>	3.185	4,5
<b>Operación y Mantenimiento</b>	8.395	12,0
<b>Formación</b>	283	0,4
<b>TOTAL</b>	<b>70.152</b>	<b>100</b>

*Tabla 7.5. Distribución de los empleados directos por actividades*

- Previsiones de empleo 2015 y 2020

Según el escenario planteado por el gobierno (22,7% de cobertura de la demanda final mediante fuentes renovables) en 2015 el sector generaría aproximadamente a 82.589

empleos directos, y 128.373 en 2020. El desglose de las previsiones de empleo por tecnologías es el siguiente:

	Potencia instalada	Potencia acumulada	Empleo Fab. e Inst.	Empleo Op. Y Mant.	Empleo Total
<b>Eólica (MW)</b>	1.531	27.997	18.048	3.386	21.434
<b>Hidráulica (MW)</b>	50	16.349	4.016	118	4.134
<b>Solar Térmica (miles m<sup>2</sup>)</b>	658	4.902	12.259	1.727	13.986
<b>Solar Termoeléctrico (MW)</b>	301	3.048	913	370	1.283
<b>Solar Fotovoltaico (MW)</b>	365	5.918	30.255	3.362	33.617
<b>Biomasa (MW)</b>	42	620	732	1.574	2.306
<b>Biocarburantes (ktep)</b>	190	2.470	294	822	1.116
<b>Biogás (MW)</b>	15	220	909	59	968
<b>Geotermia (ktep)</b>	1	5	616	25	641
<b>Incineración de Residuos (MW)</b>	12	125	1.214	1.890	3.104
	<b>EMPLEO TOTAL</b>		<b>69.257</b>	<b>13.333</b>	<b>82.589</b>

*Tabla 7.6. Previsiones de empleo directo por tecnologías: 2015*

	Empleo directo	Empleo indirecto	Empleo total
<b>Eólica (MW)</b>	21.434	17.147	38.581
<b>Hidráulica (MW)</b>	4.134	1.860	5.994
<b>Solar Térmica (miles m<sup>2</sup>)</b>	13.986	6.294	20.280
<b>Solar Termoeléctrico (MW)</b>	1.283	770	2.053
<b>Solar Fotovoltaico (MW)</b>	33.617	15.128	48.745
<b>Biomasa (MW)</b>	2.306	2.029	4.335
<b>Biocarburantes (ktep)</b>	1.116	1.144	2.260
<b>Biogás (MW)</b>	968	992	1.960
<b>Geotermia (ktep)</b>	641	250	891
<b>Incineración de Residuos (MW)</b>	3.104	1.397	4.501
<b>TOTAL</b>	<b>82.589</b>	<b>47.011</b>	<b>129.600</b>

*Tabla 7.7. Previsiones de empleo indirecto por tecnologías: 2015*

	Potencia instalada	Potencia acumulada	Empleo Fab. e Inst.	Empleo Op. Y Mant.	Empleo Total
Eólica (MW)	2.181	38.000	25.713	4.596	30.309
Hidráulica (MW)	73	16.662	5.863	120	5.983
Solar Térmica (miles m <sup>2</sup> )	1.322	10.000	24.657	3.523	28.180
Solar Termoeléctrico (MW)	487	5.079	1.476	617	2.093
Solar Fotovoltaico (MW)	587	8.367	40.873	6.654	47.527
Biomasa (MW)	101	1.000	1.767	2.537	4.304
Biocarburantes (ktep)	225	3.500	348	1.164	1.513
Biogás (MW)	63	400	3.819	108	3.927
Geotermia (ktep)	1	9	385	45	430
Incineración de Residuos (MW)	13	187	1.285	2.823	4.108
<b>EMPLEO TOTAL</b>			<b>106.186</b>	<b>22.188</b>	<b>128.373</b>

*Tabla 7.8. Previsiones de empleo directo por tecnologías: 2020*

	Empleo directo	Empleo indirecto	Empleo total
Eólica (MW)	30.309	24.247	54.556
Hidráulica (MW)	5.983	2.692	8.675
Solar Térmica (miles m <sup>2</sup> )	28.180	12.692	40.861
Solar Termoeléctrico (MW)	2.093	1.25	3.349
Solar Fotovoltaico (MW)	47.527	21.387	68.914
Biomasa (MW)	4.304	3.788	8.092
Biocarburantes (ktep)	1.512	1.550	3.062
Biogás (MW)	3.927	4.025	7.952
Geotermia (ktep)	430	168	598
Incineración de Residuos (MW)	4.108	1.849	5.957
<b>TOTAL</b>	<b>128.373</b>	<b>73.642</b>	<b>202.015</b>

*Tabla 7.9. Previsiones de empleo indirecto por tecnologías: 2020*

Según estas estimaciones, en 2015 las energías renovables crearían un total de 82.589 empleos directos aproximadamente, 12.437 empleos más que los existentes al comienzo de 2010. Esto representa un 17,7% más en términos de empleo. El sector que más empleo tiene es el sector fotovoltaico, seguido del eólico y el solar térmico, por lo que el sector

fotovoltaico superaría al eólico en número de empleos invirtiendo el orden actual. En 2020 el sector de las energías renovables generaría 128.373 empleos directos, que representa un crecimiento respecto al empleo en 2010 del 83%. [52]

### **7.4.3. La Región de Murcia hacia el Autoabastecimiento**

En los últimos años, según las estadísticas elaboradas por la Consejería de Universidades Empresa e Investigación, la Región ha ido reduciendo paulatinamente su dependencia de los combustibles fósiles más contaminantes, como son los productos petrolíferos, en un 16 por ciento, para dar paso a las energías renovables, que en los últimos tres años han aumentado un 14 por ciento su contribución a la energía final consumida.

Asimismo, los distintos sectores han reducido su dependencia de las fuentes convencionales, para incorporar a su consumo diario las energías alternativas. Para ello, desde el Ejecutivo autonómico se han puesto a disposición de las empresas, familias e instituciones públicas varias líneas de incentivos encaminadas a la incorporación de las energías renovables.

Y es que, el sector de transporte es el que más emisiones de gases contaminantes produce, debido a su dependencia del petróleo, seguido de la industria y del sector primario.

“Para que estos parámetros sean cada vez menores, se incentivan las energías de carácter autóctono, inagotable y respetuosas con el medio ambiente, como son la fotovoltaica, eólica, geotérmica y biocombustible, a la vez que se contribuye con ello a la reducción de las emisiones de efecto invernadero y se fortalece un tejido empresarial tecnológicamente avanzado e innovador”, explicó el consejero.

La política energética del Gobierno regional está encaminada a lograr el denominado objetivo '20-20-20' para 2016, cuatro años antes de lo que marca Europa, gracias a las medidas del Programa Integral de Ahorro y Eficiencia Energética de la Región. “Es prioritario reducir nuestra dependencia energética, tender al autoabastecimiento y mejora de la competitividad de la Región”, concluyó. [45]

### **7.4.4. Moratoria Renovable en el sector de la Bioenergía**

El pasado 27 de enero de 2012, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, hizo público el Real Decreto-ley 1/2012, *por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de pre-asignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.*

Con el nuevo Plan de Energías Renovables 2011-2020 aun en caliente, la mencionada Ley 1/2012 viene a resultar una MORATORIA contra todas aquellas tecnologías incluidas en el régimen especial de producción de energía eléctrica, que observan como una vez más,

los intereses de las grandes eléctricas ponderan sobre los datos objetivos y el sentido común de un sector que no deja de aportar cifras positivas al ya debilitado sistema económico nacional.

Multitud de patronales, plataformas y empresas del sector privado se han pronunciado sobre las repercusiones negativas que supondrá la aplicación de la legislación en el desarrollo de las energías renovables, a corto y medio plazo.

Todo sea dicho, que la moratoria para el cobro de las primas es de carácter temporal, y no afecta a aquellas instalaciones inscritas en el registro de pre-asignación antes de la entrada en vigor del Real Decreto, ni a aquellos proyectos que se encuentren en situación de silencio administrativo, es decir, que aun habiendo solicitado la autorización en plazo, no han recibido contestación por demora atribuible al ministerio.

Al resto de proyectos en promoción, les serán devueltos los avales que depositaron en las Cajas de Depósitos correspondientes de cada comunidad.

Habrà que esperar para saber de cuanto es la temporalidad a la que se hace alusión en la normativa, y si esta podría afectar de forma retroactiva o no a los proyectos que no han llegado a ser incluidos en el registro de pre-asignación. [47]

#### **7.4.4.1. Déficit de Tarifa**

La finalidad del Real Decreto-ley contempla reducir, según el ministro José Manuel Soria, el injusto y cada vez más impopular “Déficit de Tarifa” (no confundir con Déficit público, al que se hace alusión desde el gobierno central y que puede llegar a equívocos, tal y como le ocurrió al mencionado ministro). Esta deuda contraída por los usuarios con las empresas eléctricas, se genera por la diferencia entre el coste de venta la energía eléctrica que consumimos y su coste de producción, y que actualmente se cifra en más de 24.000 M€.

Aunque argumentar que el déficit de tarifa se debe en gran parte a las primas adjudicadas al régimen especial, tal y como se ha querido hacer ver desde el lobby eléctrico, y que además, su reducción pasa por una moratoria renovable, es mucho decir.

Para poder avalar la viabilidad de las renovables, podríamos citar una inmensidad de beneficios inherentes a su uso, que actualmente no son internalizados y que permitirían una reducción considerable de sus costes de producción, evitando así la necesidad de percibir primas. Por citar algunos de los más relevantes:

- Disminuyen la dependencia energética exterior, actualmente cifrada en más del 85% y basada en la importación de combustibles de origen fósil, cuyo mercado posee una serie de problemas ligados a la volatilidad de sus precios y a la inestabilidad política de los países de procedencia.
- Reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

- Las renovables son una fuente de energía autóctona, inagotable, sostenible y de beneficios nacionales, tanto a nivel socio-económico como ambiental.
- Generan por megavatio entre 8 y 60 veces más puestos de trabajo que las fuentes de energía fósiles, teniendo además en cuenta que es un sector donde la investigación y la innovación tecnológica tienen un peso muy importante. Según el nuevo PER 2011-2020, se estima que para 2.020 la cifra de puestos de trabajo podrían rondar los 300.000.
- Es un sector que actualmente aporta más al PIB que sectores de gran importancia histórica como la pesca o el textil.

A todas estas razones, habría que sumarle una de gran importancia, y es que España ha de cumplir de forma vinculante con los objetivos marcados por la Unión Europea incluidos en la Directiva 2009/28/CE, en la que se establece que el 20% de la energía producida debe ser de origen renovable en el año 2.020. Esta normativa europea también plantea medidas concretas que fomenten el desarrollo de las renovables y que pretendan eliminar la inestabilidad regulatoria, las trabas administrativas y los obstáculos para su conexión a red.

A todas luces se puede observar que la Moratoria aprobada por el ministerio, poco o nada tiene de positivo para la concreción de dichos objetivos europeos a 2.020. [47]

#### **7.4.4.2. Margen de Maniobra**

Los objetivos de potencia para el año 2020, recogidos en el recientemente aprobado Plan de Energías Renovables, permiten al Gobierno disponer de un holgado margen de maniobra en la fijación de la senda de implantación de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables desde el momento actual.

Este hecho, unido a que la capacidad de generación instalada actual es suficiente para asegurar la cobertura de la demanda prevista, hacen que esta medida no afecte a la seguridad de suministro ni a los compromisos de España para con la Unión Europea en materia de producción renovable de cara a 2020. [47]

#### **Apuesta firme por las Energías Renovables**

El Gobierno mantiene su apuesta firme por las energías renovables como parte indispensable del “mix” energético de nuestro país. En 2011, un 93 por 100 de la potencia instalada fue de origen renovable y estas instalaciones cubrieron un 33 por 100 de la demanda eléctrica, lo que convierte a España en uno de los países más avanzados en este sentido. Sin embargo, mantener el actual sistema de retribución no es compatible con la situación actual de crisis económica y de descenso de la demanda por lo que, mientras se reforma el sistema y se avanza hacia un marco retributivo renovable que promueva una asignación eficiente de recursos, se procede a paralizar temporalmente el sistema

retributivo. [47]

#### **7.4.4.3. Pronunciamiento de la Comisión Nacional de la Energía**

En paralelo, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo ha remitido a la Comisión Nacional de la Energía dos cartas en las que se le solicita que se pronuncie sobre todos los aspectos relevantes para abordar el problema del déficit tarifario tanto en el sector eléctrico, como en el del gas. [47]

#### **7.4.4.4. Instalaciones Afectadas**

La medida afectará a aquellas instalaciones que todavía no han sido inscritas en el registro de pre-asignación de régimen especial en la fecha de entrada en vigor del Real Decreto Ley, así como a las instalaciones de régimen ordinario que a la fecha de entrada en vigor de la norma no tuvieran autorización administrativa otorgada por la Dirección General de Política Energética y Minas.

La suspensión afectará a las tecnologías acogidas al régimen especial, esto es, la eólica, solar fotovoltaica, termo-solar, cogeneración, biomasa, biogás, mini-hidráulica y de residuos, al igual que a las instalaciones de régimen ordinario de tecnologías asimilables a las incluidas en el régimen especial.

La norma no tiene carácter retroactivo, es decir, no afectará a las instalaciones ya en marcha, a las primas ya autorizadas ni tampoco a las instalaciones ya inscritas en los registros de pre-asignación.

Asimismo, aquellas instalaciones en trámite que no estuvieran inscritas en el pre-registro en el momento de entrada en vigor de la norma tienen la posibilidad de desistir de su solicitud de inscripción en el registro de pre-asignación, en cuyo caso se les devolverán íntegramente los avales depositados. Además, también se devolverán los avales a aquellas instalaciones inscritas en los pre-registros que, en el plazo de dos meses desde la entrada en vigor de la norma, opten por no llevar a cabo la ejecución de la instalación. [47]

#### **7.4.5. Plan de Implantación 2015**

El “Plan de Implementación a 2015” publicado por BIOPLAT recientemente, viene a definir las diez cadenas de valor en el área de la bioenergía, que podrían tener un efecto positivo en la consecución de los objetivos de fomento de las energías renovables, tan a nivel nacional (PER 2011-2020), como europeo. Dichos objetivos pretenden conseguir un aumento en la diversificación de las fuentes de energía y una disminución de la elevada dependencia energética externa, así como de las emisiones de gases de efecto invernadero

En el Plan se identifican y recomiendan las acciones en I+D+i esenciales para conducir a las tecnologías biomásicas hacia una fase comercial más avanzada, para que la I+D+i se transfiera al mercado nacional de manera que la bioenergía continúe avanzando en su curva

de aprendizaje y sea cada vez una energía renovable más competitiva.

Las cadenas de valor, así como otros puntos de interés del documento son los siguientes:

I. CADENA DE VALOR: Utilización de biocombustibles sólidos mediante combustión directa

II. CADENA DE VALOR: Producción y utilización de biocombustibles sólidos para gasificación

III. CADENA DE VALOR: Producción y uso del biogás

IV. CADENA DE VALOR: Conversión de azúcares y almidón en bioetanol

V. CADENA DE VALOR: Conversión de biomasa lignocelulósica por procesos bioquímicos en alcoholes

VI. CADENA DE VALOR: Gasificación de biomasa y conversión catalítica o bioquímica en biocombustibles

VII. CADENA DE VALOR: Digestión de biomasa para generación de biogás

VIII. CADENA DE VALOR: Conversión pirolítica térmica y catalítica de biomasa lignocelulósica y upgrading

IX. CADENA DE VALOR: Conversión catalítica de azúcares en combustibles y químicos

X. CADENA DE VALOR: Plataforma aceites (conversión convencional + hidrotratamiento + pirolisis + tratamiento en otras unidades de refinería solo o conjuntamente con el combustible fósil)

VECTORES BIOENERGÉTICOS INTERMEDIOS [47]

## **7.5. Referencias**

### **7.5.1. Figuras y Tablas**

Figura 7.1. Fuente NOAA, gráfico original de [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

Figura 7.2. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> -eq edición 1990-2008

Figura 7.3. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en España (2005-2009)

Figura 7.4. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE

Figura 7.5.a. Ciclo de Vida de la Generación Eléctrica

Figura 7.5.b. Metodología del ACV

Figura 7.6. Fases de un análisis de ciclo de vida

Tabla 7.1. Variación 2009-2010 en porcentaje %

Tabla 7.2.a. Ecopuntos asignados a diversas tecnologías de generación eléctrica

Tabla 7.2.b. Ecopuntos asignados a diversas tecnologías de generación eléctrica

Tabla 7.3. Distribución de empleados directos por subsectores de actividad

Tabla 7.4. Distribución del empleo indirecto generado por subsectores de actividad

Tabla 7.5. Distribución de los empleados directos por actividades

Tabla 7.6. Previsiones de empleo directo por tecnologías: 2015

Tabla 7.7. Previsiones de empleo indirecto por tecnologías: 2015

Tabla 7.8. Previsiones de empleo directo por tecnologías: 2020

Tabla 7.9. Previsiones de empleo indirecto por tecnologías: 2020

### **7.5.2. Textos**

[31] [http://www.aytojaen.es/portal/RecursosWeb/DOCUMENTOS/1/0\\_1150\\_1.pdf](http://www.aytojaen.es/portal/RecursosWeb/DOCUMENTOS/1/0_1150_1.pdf)

[32] “Jornadas sobre sostenibilidad y energías renovables en Andalucía”. Mariano Barroso Flores. [http://www.iniec.com/jornadas\\_iniec/ponencia4\\_marianobarroso.ppt](http://www.iniec.com/jornadas_iniec/ponencia4_marianobarroso.ppt)

[33] “Energía renovable”. Wikipedia. La enciclopedia libre. [http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_renovable](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable)

[34] “Ventajas de la energía eólica son: no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático”. ebm. <http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=409>

[35] Impacto Ambiental y Generación

Eléctrica [http://cab.cnea.gov.ar/divulgacion/consumo/m\\_consumo\\_f12.html](http://cab.cnea.gov.ar/divulgacion/consumo/m_consumo_f12.html)

[36] Evidencias del Cambio Climático <http://cambioclimaticoglobal.com/evidencias-cambio-climatico.html>

[37] España quinto emisor de CO2 de la Unión Europea <http://www.mundoenergia.com/noticias/medioambiente/espana-quinto-emisor-co2-union-europea-2001111924/>

[38] La Energía Nuclear es la Tecnología que más electricidad ha aportado en 2011 <http://www.mundoenergia.com/noticias/convencionales/la-energia-nuclear-es-la-tecnologia-que-mas-electricidad-ha-aportado-en-2011-201201114389/>

[39] WWF denuncia el aumento de las emisiones a pesar del record histórico de la eólica <http://www.mundoenergia.com/noticias/medioambiente/wwf-denuncia-el-aumento-de-las-emisiones-a-pegar-del-record-historico-de-la-eolica-201203074526/>

[40] WWF denuncia el aumento de emisiones CO2 por la quema de carbón nacional <http://www.mundoenergia.com/noticias/medioambiente/wwf-denuncia-el-aumento-de-emisiones-de-co2-del-sector-electrico-por-la-quema-de-carbon-nacional-201203024514/>

[41] Gases efecto invernadero <http://www.inspiration.org/cambio-climatico/efecto-invernadero/gases-de-efecto-invernadero?gclid=CPK8mb7FrK8CFcwTfAodhSKvmQ>

[42] [http://www.lamoncloa.gob.es/ServiciosdePrensa/NotasPrensa/MAPYA/\\_2010/ntpr20100203\\_EmissionGases.htm](http://www.lamoncloa.gob.es/ServiciosdePrensa/NotasPrensa/MAPYA/_2010/ntpr20100203_EmissionGases.htm)

[43] Evolución de las emisiones de CO2 en España <http://es.paperblog.com/evolucion-de-las-emisiones-de-co2-en-espana-2005-2009-156853/>

[44] Emisiones de CO2 en la Región de Murcia <http://www.laopiniondemurcia.es/comunidad/2012/03/02/emisiones-co2-debajo-media/389335.html>

[45] <http://energuia.com/2012/01/la-emision-de-co2-de-la-region-es-un-26-menor-a-la-media-nacional-pese-a/>

[46] <http://blog.troposfera.org/2011/10/evolucion-de-las-emisiones-de-co2-de.html>

[47] Moratoria Renovable en el sector de la Bioenergía [http://www.madrimasd.org/blogs/renovables\\_medioambiente/](http://www.madrimasd.org/blogs/renovables_medioambiente/)

[48] “Impactos ambientales de la producción de electricidad. Estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica”. IDAE. Asociación de Productores de Energías Renovables. [http://www.appa.es/descargas/Resumen\\_Estudio\\_ACV.pdf](http://www.appa.es/descargas/Resumen_Estudio_ACV.pdf)

[49] <http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=409>

[50] “Definición y cálculo de la huella CO<sub>2</sub> de Endesa. Especificaciones del proyecto, herramienta de cálculo y avance de resultados”. David Corregidor Sanz. Endesa S.A. <http://www.ecotech.cat/Endesa.pdf>

[51] <http://www.ccoo.es/comunes/temp/recursos/1/doc31342.pdf>

[52] “Resumen del Plan de Energías Renovables 2011-2020”. MITyC, IDAE. [http://www.ahorraterenovables.es/pdfs/PER\\_11-20.pdf](http://www.ahorraterenovables.es/pdfs/PER_11-20.pdf)

# Capítulo 8. Aspectos Económicos y Tecnológicos.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## CAPÍTULO 8: ASPECTOS ECONÓMICOS Y TECNOLÓGICOS

### 8.1. Introducción

Si los aspectos sociales y medioambientales eran la punta de lanza de las energías del régimen especial, los aspectos económicos y tecnológicos son sus mayores defectos. La capacidad técnica y tecnológica de dichas fuentes energéticas aún no está plenamente desarrollada. Por lo general no llegan a los niveles de eficiencia que pueden alcanzar las grandes centrales térmicas convencionales, lo que no les permite competir en un mercado libre, además tienen un coste de fabricación elevado y, por tanto, una fuerte inversión inicial, mientras que muchas centrales existentes están ya amortizadas desde hace mucho tiempo. Además la fiabilidad y continuidad en el suministro eléctrico dista aun profundamente comparado, por ejemplo, con la nuclear.

La Comisión valora positivamente el planteamiento del autoconsumo que podría desarrollarse con la nueva modalidad de suministro-producción con balance neto, porque desarrolla la producción distribuida y permite el cumplimiento eficiente de los objetivos energéticos y medioambientales comprometidos. No obstante, en relación con el proyecto de Real Decreto la CNE considera que existe un elevado número de cuestiones pendientes de concretar. [53]

### 8.2. Objetivos de este capítulo

Alternativas	Criterios	Subcriterios
Eólica (A <sub>1</sub> )	Medioambiente (C <sub>1</sub> )	¿Qué niveles de gases de efecto invernadero emite la planta? (C <sub>11</sub> )
Solar (A <sub>2</sub> )		¿Cuánto terreno hace falta para la instalación? (C <sub>12</sub> )
Micro-cogeneración (A <sub>3</sub> )	Sociedad (C <sub>2</sub> )	¿Hay prejuicios en contra de la tecnología? (C <sub>21</sub> )
Micro-trigeneración (A <sub>4</sub> )		¿Se generan ruidos molestos para los vecinos de la zona? (C <sub>22</sub> )
Biomasa (A <sub>5</sub> )		¿Cuánto empleo se crea en la localidad? (C <sub>23</sub> )
Hidráulica (A <sub>6</sub> )	Tecnología (C <sub>3</sub> )	¿La tecnología está madura? (C <sub>31</sub> )
		¿Hay proveedores de la tecnología cerca? (C <sub>32</sub> )
		¿Cuál es el rendimiento de la instalación? (C <sub>33</sub> )
		¿Cuál es la disponibilidad de los recursos? (C <sub>34</sub> )
	Economía (C <sub>4</sub> )	¿Cuál es la inversión inicial? (C <sub>41</sub> )
		¿Cuánto cuesta la materia prima? (C <sub>42</sub> )
		¿Cuál es el tiempo de Pay-back? (C <sub>43</sub> )
		¿Cuánto se ingresa? (C <sub>44</sub> )
		¿Cuáles son los costes? (C <sub>45</sub> )

El objetivo es darle respuesta a los criterios que se centra en este capítulo, los temas Económicos y Tecnológicos, para poder dar respuesta a los diferentes subcriterios que

tienen relevancia en nuestro estudio;

- ¿La tecnología está madura?
- ¿Hay proveedores de la tecnología cerca?
- ¿Cuál es el rendimiento de la instalación?
- ¿Cuál es la disponibilidad de los recursos?
- ¿Cuál es la inversión inicial?
- ¿Cuánto cuesta la materia prima?
- ¿Cuál es el tiempo de Pay-back?
- ¿Cuánto se ingresa?
- ¿Cuáles son los costes?

Para posteriormente valorar y obtener la clasificación de las diferentes alternativas que entran en juego en nuestro estudio, sacando al final las conclusiones oportunas.

Para llevar a cabo lo indicado, nos hemos ayudado de la información recogida en proyectos anteriores realizados por los compañeros Mario Bastida Dólera y Carlos Baldasquín Cáceres, dirigido por Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Que al mismo tiempo hemos ido comprobando que los datos e información no haya cambiado a día de hoy, y en caso de ser así, hemos ido actualizando la información necesaria para dar respuesta de manera correcta y actual, a las cuestiones que se nos plantea.

### **8.3. Aspectos Económicos**

#### **8.3.1. Situación actual en España en la generación de electricidad**

Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de pre-asignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.

En los últimos años, el crecimiento que las tecnologías incluidas en el régimen especial ha permitido superar con creces en 2010 los objetivos de potencia instalada previstos en el Plan de Energías Renovables 2005-2010 para la tecnología eólica y en particular para las tecnologías solar termoeléctrica y solar fotovoltaica.

Este elevado desarrollo no está exento, sin embargo, de crítica. La superación de los objetivos, ha puesto de manifiesto un desequilibrio entre los costes de producción y el valor de las primas, suponiendo un incremento del sobrecoste para el sistema en concepto de primas para las tecnologías solares de más de 2000 millones en 2010, cifra que se incrementará en 2000 millones de euros anuales a partir de 2014.

El Real Decreto-ley 6/2009 de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social, estableció límites para acotar el

incremento del déficit tarifario, esto es, la diferencia entre los ingresos procedentes de los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica y los costes de las actividades reguladas del sector eléctrico que deben cubrir. De este modo el citado real decreto-ley establece, a partir de 2013, el principio de suficiencia de los peajes de acceso para satisfacer la totalidad de los costes de las actividades reguladas de modo que, a partir de dicho momento, no pueda aparecer déficit tarifario. [54]

Posteriormente, y como consecuencia de la aparición de una serie de circunstancias sobrevenidas, entre otras, la caída significativa de la demanda durante 2010 y el incremento en la producción eléctrica a partir de fuentes renovables por las favorables condiciones climatológicas, que tuvieron una importante incidencia sobre los parámetros de previsión de déficit tarifario del sistema eléctrico, se adoptaron nuevas medidas con carácter de urgencia, en el Real Decreto-ley 14/2010 para abordar al corrección del referido déficit tarifario del sistema eléctrico.

Sin embargo, las medidas adoptadas hasta la fecha no resultan suficientes, poniendo en riesgo el objetivo final de supresión del déficit tarifario a partir de 2013.

El déficit tarifario constituye en sí mismo una barrera para el adecuado desarrollo del sector en su conjunto y en particular para la continuación de las políticas de fomento a la producción eléctrica a partir de fuentes de energía renovable y alta eficiencia.

Por otro lado, los objetivos de potencia para el año 2020 recogidos en el recientemente aprobado Plan de Energías Renovables permiten al Gobierno disponer de un holgado margen de maniobra en la fijación de la senda de implantación de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables desde el momento actual.

A ello hay que añadir que la capacidad de generación instalada en este momento es suficiente para asegurar la cobertura de la demanda prevista para los próximos años.

Así, no resulta imprescindible en este momento continuar con las tasas anuales de implantación de estas tecnologías para lograr al final de la década los objetivos previstos.

La compleja situación económica y financiera aconseja la supresión de los incentivos para la construcción de estas instalaciones, con carácter temporal, al menos hasta la solución del principal problema que amenaza la sostenibilidad económica del sistema eléctrico: El déficit tarifario del sistema eléctrico.

Estas medidas son coherentes con las medidas de ajuste que se están llevando a cabo con objeto de retomar la senda de crecimiento de nuestra economía.

Por otra parte, el modelo de generación distribuida, con el acercamiento del coste de producción de estas tecnologías al coste de consumo para los segmentos de menor escala, cobra cada vez mayor importancia. Así, el procedimiento para permitir el denominado balance neto de electricidad cuya regulación está en curso, constituye una alternativa real para el desarrollo de instalaciones de pequeño tamaño a través del fomento del

autoconsumo de energía eléctrica. [54]

Resulta necesario diseñar un nuevo modelo retributivo para este tipo de tecnologías que tenga en cuenta el nuevo escenario económico, promoviendo la asignación eficiente de los recursos a través de mecanismos de mercado. De este modo, se trata de articular a futuro un sistema que favorezca la competitividad del mercado a través de mecanismos similares a los utilizados en otros países de la Unión Europea y que garanticen la viabilidad futura del Sistema.

Asimismo, los nuevos marcos deberán incentivar la reducción de costes aprovechando la pendiente de la curva de aprendizaje y propiciando la captura de la maduración de la tecnología de manera que reviertan éstos en los consumidores.

De acuerdo con lo expuesto se ha considerado oportuna la supresión de los regímenes económicos incentivadores para ciertas instalaciones de régimen especial y para ciertas instalaciones de régimen ordinario de las mismas tecnologías, así como la suspensión del procedimiento de pre-asignación de retribución para las mismas, de forma que pueda acometerse la resolución del problema del elevado déficit tarifario del sistema eléctrico en un entorno más favorable. En la adopción de dicha medida, el Gobierno ha optado por limitar su alcance a las instalaciones de régimen especial que no hayan obtenido aún la inscripción en el Registro de pre-asignación de retribución, con excepción de aquellos supuestos en que dicha circunstancia sea consecuencia del incumplimiento del correspondiente plazo de resolución por la Administración. En similar sentido, en lo que concierne a las instalaciones de régimen ordinario, no sometidas al mecanismo de pre-asignación, se ha decidido limitar el alcance de la medida en términos que excluyan su incidencia sobre inversiones ya ejecutadas.

Esta medida debe adoptarse además con carácter de urgencia. En este momento se encuentran pendientes de resolución las cuatro convocatorias de pre-asignación fotovoltaica correspondientes al año 2012, por una potencia cercana a los 550 MW. En efecto, la inevitable dilación en el tiempo de la adopción de esta medida que supondría su tramitación por el cauce normativo ordinario determinaría, inevitablemente, la entrada en el sistema de 550 MW fotovoltaicos adicionales y el riesgo de un efecto llamada para aquellas tecnologías cuyos objetivos no han sido cubiertos: Cogeneración, biomasa, biogás, hidráulica y residuos. [54]

### **8.3.2. Informe CNE de la situación actual sobre al Real Decreto**

Las consideraciones generales que se presentan en este informe son las siguientes:

1. Se considera imprescindible definir con mayor nitidez en una norma con rango de Ley las características de la nueva figura legal sujeto de esta modalidad de suministro-producción con balance neto, y especificar pormenorizadamente cuáles son sus derechos y obligaciones.

2. Una vez establecida esta figura con rango de ley, cabría remitir el ámbito de

aplicación del proyecto de Real Decreto al del Real Decreto 1699/2011, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia, en lo que se refiere al régimen especial, para situar la instalación de producción dentro de este régimen, con sus derechos y obligaciones, excepto en lo que atañe a la percepción de su régimen económico.

3. En tal caso, podría recurrirse a la inscripción en el registro administrativo de productores en régimen especial, en la subsección denominada 'Registro de régimen especial sin retribución primada' creada por la Disposición adicional segunda del Real Decreto 1003/2010, de 5 de agosto.

4. Se comparte el contenido de la propuesta de Real Decreto en cuanto a aplicar el pago de las tarifas de acceso por toda la energía horaria neta consumida. Esto es, toda la energía consumida procedente de la red de distribución, incluyendo en ella la derivada de los derechos de consumo diferido.

Además, debe quedar claro en la norma que corresponde también el pago de peajes en calidad de generador, en los lapsos de tiempo con energía excedentaria, dado que también en esos momentos se utiliza la red.

5. No obstante lo anterior, se considera conveniente revisar la actual estructura de tarifas de acceso, y sus términos fijos y variables, para no distorsionar la matriz de ingresos y costes del sistema, originando así una potencial insuficiencia de ingresos regulados.

Por otra parte, las consideraciones particulares del informe son las siguientes:

El consumidor debería contar con *dos* equipos de medida sincronizados instalados en paralelo, para la medida de toda la producción y todo el consumo. Una alternativa a lo anterior podría ser disponer, aparte del equipo de medida bidireccional instalado en el cuarto de contadores para el registro del saldo neto importador o exportador, de un equipo de medida sincronizado con el anterior, para la medida de la generación bruta. El primer esquema de medida se encuentra regulado en el Real Decreto 1699/2011, y precisa que el distribuidor determine los saldos de energía importada/exportada a efectos de facturación de las tarifas de acceso/peaje "G", respectivamente. Por el contrario, en el segundo esquema no se precisan cálculos por parte del distribuidor a estos mismos efectos. Con ambas configuraciones de medida se podría contabilizar la aportación de energía renovable a efectos de la consecución de los compromisos internacionales. En ambos casos, los equipos de medida deberían poder realizar y registrar lecturas con resolución al menos horaria. Debe tenerse presente que corresponde en todo caso al distribuidor, en tanto que encargado de la lectura, realizar la medida y control de la energía consumida y producida. Además, se debe establecer como obligación de dicho distribuidor, remitir anualmente al MINETUR y a la CNE la cantidad de energía producida, a efectos estadísticos.

Se considera que el establecimiento de un precio máximo al comercializador por parte del Ministerio de Industria, Energía y Turismo para la prestación del servicio de balance neto no se ajusta a la regulación vigente, en tanto la comercialización es una actividad libre.

Tampoco corresponde a la Administración determinar si la adquisición de energía por el consumidor con cargo a los derechos por consumo diferido tiene coste o no. La Comisión considera que todos estos aspectos deberían ser pactados libremente entre el consumidor y el comercializador.

El mecanismo de balance neto no debería estar basado únicamente en los intercambios de energía (cesión y adquisición) entre un consumidor y la red, como se incluye en la propuesta de Real Decreto, sino que debería completarse con el valor económico de esa energía, cuyo valor unitario depende del momento en que se produzca el intercambio, con lo que el balance neto tendría una base más económica, y por lo tanto, más eficiente. En este sentido, la energía excedentaria, al igual que la neta consumida, debe ser valorada en términos económicos según acuerdo contractual libremente pactado entre las partes. Por lo tanto, no sería necesario definir en el real decreto el concepto de “derechos de consumo diferido”. No obstante, de mantenerse este concepto en el texto final de la norma, se debería establecer que el método de valoración económica ha de constar explícitamente en el contrato firmado entre las partes. Además, en uno y en otro caso, el comercializador debe llevar la contabilidad de la energía excedentaria y de la energía neta consumida.

En relación con los procedimientos de cambio de comercializador, esta Comisión considera necesario que los contratos entre consumidores y comercializadores incluyan el método de liquidación aplicable en tales casos. La ausencia de liquidación podría constituir una barrera para hacer efectivo el cambio. A estos efectos, a los consumidores acogidos al balance neto se les debería asignar un código diferenciado, a incluir por los distribuidores en el sistema de información de puntos de suministro.

A efectos de promover un desarrollo ordenado de la producción neta de energía en términos anuales, esta Comisión considera que la potencia instalada (como generador) debe ser siempre menor o igual a la potencia contratada (como consumidor). La alternativa planteada en la propuesta de real decreto (cancelación de los excedentes hiperanuales) se considera administrativamente más compleja y menos transparente. [53]

### **8.3.3. Objetivos del Real Decreto-ley 1/2012**

Constituye el objeto de este real decreto-ley:

a) La supresión de los incentivos económicos para las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial y para aquellas de régimen ordinario de tecnologías asimilables a las incluidas en el citado régimen especial que se detallan en el artículo 2.1.

b) La suspensión del procedimiento de pre-asignación de retribución para el otorgamiento del régimen económico primado. [55]

### **8.3.4. Ámbito de aplicación del Real Decreto-ley 1/2012**

El presente real decreto-ley será de aplicación a las siguientes instalaciones:

a) Aquellas instalaciones de régimen especial que a la fecha de entrada en vigor del presente real decreto-ley no hubieran resultado inscritas en el Registro de per-asignación de retribución previsto en el artículo 4.1 del Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social.

b) Aquellas instalaciones de régimen especial de tecnología fotovoltaica que a la fecha de entrada en vigor del presente real decreto-ley no hubieran resultado inscritas en el Registro de pre-asignación de retribución previsto en el artículo 4.1 del Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica para instalaciones posteriores a la fecha límite de mantenimiento de la retribución del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para dicha tecnología.

c) Aquellas instalaciones de régimen ordinario que a la fecha de entrada en vigor de este real decreto-ley no dispusieran de autorización administrativa otorgada por la Dirección General de Política Energética y Minas.

El presente real decreto-ley no será de aplicación a las instalaciones de régimen especial que hubieran presentado solicitud de inscripción en el Registro de pre-asignación de retribución, cuando el correspondiente plazo de resolución, en virtud de lo previsto en los apartados 2 y 3 del artículo 42 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, hubiera ya vencido a la fecha de su entrada en vigor. [55]

### **8.3.5. Supresión de los incentivos económicos para las nuevas instalaciones, Real Decreto-ley 1/2012**

1. Se suprimen los valores de las tarifas reguladas, primas y límites previstos en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, para todas las instalaciones que se encuentren en el ámbito de aplicación del presente real decreto-ley.

2. Se suprimen el complemento por eficiencia y el complemento por energía reactiva, regulados en los artículos 28 y 29, respectivamente, del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para todas las instalaciones que se encuentren en el ámbito de aplicación del presente real decreto-ley.

3. Sin perjuicio de lo previsto en los apartados 1 y 2 de este artículo, el Gobierno podrá establecer reglamentariamente regímenes económicos específicos para determinadas instalaciones de régimen especial, así como el derecho a la percepción de un régimen económico específico y, en su caso, determinadas obligaciones y derechos de los regulados en los apartados 1 y 2 del artículo 30 de la Ley 54/1997, de 23 de noviembre, del Sector Eléctrico, para aquellas instalaciones de producción de energía eléctrica de cogeneración o que utilicen como energía primaria, energías renovables no consumibles y no hidráulicas,

biomasa, biocarburantes o residuos agrícolas, ganaderos o de servicios, aun cuando las instalaciones de producción de energía eléctrica tengan una potencia instalada superior a 50 MW.

Para la determinación de los regímenes económicos específicos se podrá tener en cuenta la potencia instalada, el nivel de tensión de entrega de la energía a la red, la contribución efectiva a la mejora del medio ambiente, al ahorro de energía primaria y a la eficiencia energética, la producción de calor útil económicamente justificable y los costes de inversión y de operación, el tipo de energía primaria empleada, teniendo en cuenta unas tasas de rentabilidad razonables con referencia al coste del dinero en el mercado de capitales. [55]

### **8.3.6. Suspensión del procedimiento de pre-asignación de retribución, Real Decreto-ley 1/2012**

1. Queda suspendido el procedimiento de inscripción en el Registro de pre-asignación de retribución previsto en el artículo 4.1 del Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, para las instalaciones incluidas en el ámbito del presente real decreto-ley.

2. Queda suspendido el procedimiento de inscripción en el Registro de pre-asignación previsto en el artículo 4.1 del Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, de las solicitudes de instalaciones de tecnología fotovoltaica que hubieran sido presentadas a las convocatorias correspondientes a 2012.

Del mismo modo, queda sin efecto la celebración de las convocatorias de pre-asignación correspondientes al año 2012 y sucesivos.

3. Los titulares de las instalaciones de régimen especial incluidas en el ámbito de aplicación del presente real decreto-ley a las que, a su entrada en vigor, no les hubiera sido resuelta su solicitud de inscripción en el Registro de pre-asignación de retribución, podrán, dentro del plazo de dos meses a contar desde la fecha de dicha entrada en vigor, desistir de su solicitud de inscripción en el referido registro, y en su caso, desistir también de su solicitud de acceso a la red, interesando la devolución de los avales que hubieran depositado al amparo de lo previsto en de los artículos 59 bis y 66 bis del Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica, del artículo 9 del Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, así como del artículo 4.3.i del Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, sin que, haya lugar, en virtud de ese desistimiento, a la ejecución de las tales garantías.

4. Sin perjuicio de lo previsto en los apartados 1 y 2 de este artículo, el Gobierno podrá restablecer reglamentariamente la inscripción en el Registro de pre-asignación de retribución cuando el contexto energético así lo requiera.

**Disposición adicional única.** *Devolución de los avales depositados para las*

*instalaciones de régimen especial que hubieran sido inscritas en el Registro de pre-asignación de retribución y no fueran a ejecutarse.*

Los titulares de las instalaciones de régimen especial inscritas en el Registro de pre-asignación de retribución que opten por no llevar a cabo la ejecución de la instalación, en el plazo máximo de dos meses desde la entrada en vigor de este real decreto-ley, siempre que el plazo de inscripción definitiva y venta de energía no hubiera vencido, podrán renunciar a la inscripción en el citado Registro de pre-asignación de retribución, sin que esto les suponga la ejecución de los avales que hubieran depositado al amparo de los artículos 59 bis y 66 bis del Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, del artículo 9 del Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, así como del artículo 4.3.i del Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril.

**Disposición transitoria única.** *Instalaciones que hubieran obtenido autorización administrativa para una modificación sustancial con fecha anterior a la entrada en vigor del presente real decreto-ley.*

La derogación del apartado 4 del artículo 4 y del artículo 4.bis del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, prevista en la disposición derogatoria única, no será de aplicación a aquellas instalaciones que hubieran obtenido autorización administrativa para la modificación sustancial de la misma, en los términos regulados en el citado artículo 4 del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, con fecha anterior a la entrada en vigor del presente real decreto-ley.

**Disposición derogatoria única.** *Derogación normativa.*

Quedan derogados, el apartado 4 del artículo 4 y el artículo 4 bis del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, así como cuantas otras disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo establecido en este real decreto-ley.

**Disposición final primera.** *Título competencial.*

Lo dispuesto en el presente real decreto-ley tiene carácter básico al dictarse al amparo de las competencias que corresponden al Estado en el artículo 149.1.13ª y 25ª de la Constitución Española, que atribuye al Estado la competencia exclusiva para determinar las bases y coordinación de la planificación general de la actividad económica y las bases del régimen minero y energético, respectivamente.

**Disposición final segunda.** *Habilitación normativa y desarrollo reglamentario.*

Se autoriza al Gobierno para que, en el ámbito de sus competencias, dicte las disposiciones reglamentarias necesarias para el desarrollo y aplicación de este real decreto-ley.

**Disposición final tercera.** *Entrada en vigor.*

Este real decreto-ley entrará en vigor el mismo día de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado». [55]

### **8.3.6.1. Tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial**

De acuerdo con lo establecido en el artículo 44.1 y en la disposición transitoria segunda del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, en la Orden IET/3586/2011, de 30 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2012 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial, se procede a la actualización trimestral para el primer trimestre de 2012, de las tarifas y primas de las instalaciones de los subgrupos a.1.1 y a.1.2, del grupo c.2 y de las instalaciones acogidas a la disposición transitoria segunda.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 44.1 y en la disposición transitoria décima del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, actualización anual de las tarifas, primas y en su caso límites superior e inferior, para su aplicación a partir del 1 de enero de 2012, de las instalaciones de los subgrupos a.1.3 y a.1.4, del grupo a.2, de las instalaciones de la categoría b, de las instalaciones de la disposición transitoria décima y de las instalaciones de los grupos c.1, c.3 y c.4.

De acuerdo con lo establecido en el apartado 2 de la disposición adicional sexta del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, se procede a la actualización anual de la prima de las instalaciones de potencia instalada mayor de 50 MW y no superior a 100 MW acogidas al apartado 2 de la citada disposición adicional,

Igualmente, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3 de la disposición adicional sexta del citado Real Decreto, se efectúa la actualización anual de la prima de las instalaciones de potencia instalada mayor de 50 MW y no superior a 100 MW acogidas al apartado 3 de la citada disposición adicional.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 29.1 y en la disposición adicional séptima del citado Real Decreto se revisan los valores del complemento por energía reactiva y del complemento por continuidad de suministro frente a huecos de tensión, respectivamente.

Por último, de acuerdo con lo establecido en el artículo 12 del Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, se procede a la actualización anual de las tarifas para las instalaciones fotovoltaicas inscritas en el Registro de pre-asignación de retribución en las convocatorias correspondientes a los años 2009 y 2010, de igual forma que las instalaciones del subgrupo b.1.1 acogida al Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo. [56]

### **8.3.6.2. Costes considerados para 2012**

En la Orden IET/3586/2011, de 30 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2012 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial, se fijan los costes previstos para 2012 para la retribución de las actividades reguladas, transporte y distribución de las empresas sujetas al sistema de liquidación para 2012, así como los correspondientes a las empresas insulares y extra peninsulares y los de las empresas distribuidoras de menos de 100.000 clientes. Asimismo, según lo contemplado

en la disposición adicional vigésima primera de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico se prevén las cantidades previstas para satisfacer los derechos de cobro del sistema eléctrico, sin perjuicio de las anualidades que correspondan para satisfacer los derechos pendientes a la entrada en vigor de dicha Orden.

En la citada orden, y de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 325/2008, de 29 de febrero, y en el Real Decreto 2819/1998, de 23 de diciembre, se establece la previsión de la retribución de la actividad de transporte a partir de 1 de enero de 2012. Asimismo, se revisan los costes de distribución para 2010 y 2011 y se establece una previsión de los costes de distribución y gestión comercial para 2012. Se establecen asimismo los costes de diversificación y seguridad de abastecimiento (moratoria nuclear y 2ª parte del ciclo de combustible nuclear) y los costes permanentes (CNE, operador del sistema, déficit de ingresos en la liquidación de las actividades reguladas) establecidos todos ellos como un porcentaje de facturación de los peajes de acceso, salvo las cuantías destinadas al servicio de gestión de la demanda de interrumpibilidad y las compensaciones extra peninsulares. Asimismo, se fija la cuantía de la retribución del Operador del Mercado Ibérico de Energía, Polo Español, correspondiente al año 2012 que se financia a través de los precios que cobre a los agentes del mercado, tanto del régimen ordinario como del régimen especial que actúen en el ámbito del Mercado Ibérico de la Electricidad. La Comisión Nacional de Energía incluirá en las liquidaciones que corresponda la diferencia, que tendrán la consideración de ingreso o costes liquidable del sistema [57]

### **8.3.7. No a la moratoria al desarrollo de las Energías Renovables**

1. Las energías renovables constituyen una parte significativa de la riqueza de España. Por su empleo, su participación en el PIB, su I + D + i, su internacionalización, su contribución al ahorro de importaciones energéticas, de consumo de energía, del precio de la electricidad y de emisiones de CO<sub>2</sub>, han desarrollado una industria y una tecnología nacional en la que todo el mundo ha puesto su mirada. Esto, que es el fundamento de cualquier economía moderna, se pretende mantener en estado de permanente riesgo regulatorio e inseguridad normativa para las inversiones que garanticen el futuro de un sector que crece en todo el mundo y ahora se ha decidido que en España decrezca.

2. La moratoria de renovables se produce en un escenario geopolítico de incremento de precios del petróleo y del gas y de incremento de nuestra dependencia de los hidrocarburos que debemos importar en su totalidad y la respuesta más racional debería ser la de ahorrar en el consumo de las fuentes energéticas que contribuyen a agravar más la crisis económica y que incrementan de forma incontrolada el déficit comercial, la subida de precios generalizada y las emisiones contaminantes de CO<sub>2</sub>.

En este sentido, la decisión del Consejo de Ministros parece más una llamada a consumir más energía de aquellas fuentes que hoy día aportan los mayores costes de

nuestro sistema energético, como son las elevadas importaciones energéticas y la mayor intensidad energética de nuestra economía, frenando las inversiones en aquellas fuentes que hoy constituyen la primera riqueza energética del país: el ahorro de energía y las energías renovables. El RDL 1/2012 va en contra de las medidas que necesita España para impulsar una salida sostenible a la crisis económica, manteniendo un modelo energético basado en el mayor consumo de fuentes de energía con precios que nos vienen impuestos desde el exterior y con elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> y que poco aportan a la innovación y competitividad de nuestro aparato productivo, frente a la innovación tecnológica y la eficiencia que aportan las tecnologías renovables que permiten una mayor participación de los consumidores a través de la generación distribuida y el autoconsumo.

3. Es un error histórico aplicar una moratoria a un sector, como el de las renovables, que es de los muy pocos de nuestra industria nacional que han adquirido un liderazgo mundial como “Marca España”. El modelo de renovables que todos han venido a copiar ahora se paraliza para que otros lo desarrollen. Desde la política económica se necesita impulsar un nuevo modelo productivo basado en la industria y la tecnología propia y con este nuevo RDL lo que se hace es ahuyentar las inversiones en uno de los sectores que reúne todas las condiciones para apoyar ese cambio de modelo productivo. Frente al conocimiento y a las patentes nacionales en renovables se quiere optar por más importaciones energéticas. Es la diferencia entre perseguir una futura crisis energética o anticiparse a ella.

4. El RDL 1/2012 va contra las Directivas europeas 2009/28/CE de renovables y la 2010/31/CE de eficiencia energética de edificios. La directiva de renovables establece el 20% de consumo final de renovables en 2020 y la de edificios que en 2020 todos los edificios sean de consumo de energía casi nulo con renovables. Pero estas directivas establecen también medidas concretas para eliminar las barreras que impiden el desarrollo de las renovables para alcanzar dichos objetivos, como son la inestabilidad regulatoria, las trabas administrativas y los obstáculos para su conexión a la red. La norma aprobada por el Gobierno va contra estos tres criterios de la política energética de la Unión Europea porque mantiene, por su temporalidad, el riesgo regulatorio y la inseguridad jurídica para las nuevas inversiones e impide la tramitación administrativa y la conexión a la red de nuevos proyectos renovables.

5. Es una medida inútil ya que no va a contribuir a resolver los problemas que pretende solucionar. Después de este RDL la luz seguirá subiendo y el déficit de la tarifa también. Porque frente a la opinión interesada de hacer creer que ambos se incrementan por culpa de las renovables la realidad es más compleja. El coste de las renovables para el consumidor son 2,6 c€/kWh y las renovables constituyen hoy el 17% de los costes del sistema, con tendencia a la baja por su margen de innovación tecnológica. Por el contrario, las importaciones de gas, petróleo y uranio superan los 40.000 M€ y nuestra mayor intensidad

energética equivale a más del 1,5% de nuestro PIB. Frenar las renovables solo va a ser una cortina de humo que impida abordar nuestros verdaderos problemas energéticos. Sorprende leer en el acuerdo del Gobierno la existencia de un déficit en la tarifa del gas. No puede ser por culpa de las renovables y es un dato nuevo que obliga a una profunda reflexión sobre todo el sistema eléctrico.

6. El RDL 1/2012 va a continuar la política de destrucción de empleo en el sector de las renovables que ya inició el anterior gobierno frente a unos planes aprobados que han estimado la creación de 300.000 empleos en el sector de las renovables y cerca de un millón en el de los servicios energéticos para 2020. Pero la destrucción de empleo en el sector de las renovables conlleva la deslocalización industrial y la transferencia de tecnología a terceros países que nunca podremos recuperar. Resulta desconcertante y contradictorio con la realidad social que sufre nuestro país y con la de muchas Comunidades Autónomas que con mayor visión que el Estado vieron en las renovables un factor de desarrollo sostenible para sus territorios. [58]

### **8.3.8. ¿Qué es el déficit de tarifa y cómo combatirlo?**

El Gobierno es el encargado de aprobar las tarifas eléctricas en cada periodo marcado (anual hasta 2007, trimestral desde entonces). En 2000, sus responsables aprobaban unas tarifas que no incluían todos los costes que las compañías eléctricas aseguraban tener. Se creaba así el déficit de tarifa, una especie de deuda aplazada de los consumidores con las empresas eléctricas. Su objetivo: mantener bajos los precios de la electricidad y evitar efectos negativos en la inflación, la competitividad, así como desgaste político.

Los sucesivos gobiernos han mantenido esta decisión y el déficit de tarifa ha aumentado. El precio del petróleo ha pasado de los 30 euros (barril Brent) en 2000 a los 80 euros actuales.

La cantidad de este déficit tarifario no está muy clara. Según el ministro del MINETUR, José Manuel Soria, se han acumulado 24.000 millones de euros. Según sus palabras, "si no hacemos nada, crecerá a un ritmo de entre 3.000 y 4.000 millones anuales". Por su parte, la Comisión Nacional de la Energía (CNE) lo calcula en más de 28.500 millones. La cifra se acerca a los dividendos que Iberdrola, Endesa y Gas Natural-Fenosa han repartido desde 2005 entre sus accionistas: 28.123 millones.

La patronal eléctrica, Unesa, considera que la ley va "en buen sentido" para resolver este déficit. Tomás Díaz, portavoz de la Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF), recuerda que legalmente la solución debería darse en 2013. Díaz cree que las primas a las renovables "se han terminado para siempre" y recuerda estimaciones que señalan que el recibo de la luz deberá subir un 40%.

Desde Greenpeace proponen varias medidas, como dejar de subvencionar al carbón y las centrales térmicas insulares, eliminar los "grandes ingresos injustificados" que cobran

las centrales nucleares e hidráulicas, o reducir con medidas de eficiencia la quema de combustibles fósiles por cuyas emisiones se pagan derechos de emisión.

En opinión de Emilio Jarillo, la nueva ley va a lograr que el déficit de tarifa no sume más, pero, por si sola, no logrará su desaparición. Su solución, "como ha dicho de forma repetida el ministro, ha de venir del esfuerzo de todos, administración, compañías y consumidores." [59]

## 8.4. Aspectos Tecnológicos

### 8.4.1. Introducción del Sistema Eléctrico Español

En este avance se presentan datos estadísticos provisionales del comportamiento del sistema eléctrico español durante el 2011.

#### Sistema peninsular

- La **demanda anual** de energía eléctrica corregida ha registrado un descenso del 1,2% respecto al año anterior, un 2,1% sin corregir los efectos de la laboralidad y la temperatura. Esta caída del consumo eléctrico ha situado el volumen de demanda al finalizar el 2011 en 255.179 GWh, valor similar al alcanzado en el 2006.
- Los **máximos anuales de demanda** de potencia media horaria y de energía diaria se alcanzaron respectivamente el 24 y 25 de enero con 44.107 MW y 884 GWh, ambos inferiores en un 1,7% y un 2,5% respecto a los máximos históricos registrados en el 2007.
- La **potencia instalada** aumentó en 1.879 MW, situando la capacidad total de generación al finalizar el año en 100.576 MW (un 1,9% superior a la del año anterior). La gran mayoría de ese aumento de potencia (el 93 %) proviene de nuevas infraestructuras de origen renovable, principalmente eólicas (997 MW) y solares (674 MW).
- El **producible hidráulico** se situó en 22.954 GWh, un 18% inferior al valor medio histórico y un 37% menor que el registrado en el 2010 (año destacado por una elevada hidraulicidad). Las reservas hidroeléctricas del conjunto de los embalses finalizaron el año con un nivel de llenado del 54% de su capacidad total, frente al 66% del año anterior.
- En cuanto al **balance de producción**, la mayor parte de las tecnologías han registrado caídas de producción respecto al año anterior, con significativos descensos de la hidráulica (un 28 %) y de los ciclos combinados (un 22 %). Por el contrario, las centrales de carbón duplicaron su generación respecto al 2010 y las tecnologías fotovoltaica y termoeléctrica tuvieron un incremento del 26% y del 193% respectivamente.

- Respecto a la **cobertura de la demanda**, la nuclear se ha situado a la cabeza cubriendo el 21% de la demanda (un 22% en 2010), le siguen los ciclos combinados con una aportación del 19% (un 23% en 2010). En tercer lugar se han situado: la eólica que mantiene con un 16% la misma representación que el año anterior, el carbón que eleva su contribución al 15% (un 8% en 2010) y la hidráulica que desciende al 11% (un 16% en 2010). El resto de tecnologías han mantenido una contribución similar al año anterior.
- En conjunto, las **energías renovables** han cubierto el 33% de la demanda, tres puntos menos que el año anterior, debido principalmente al descenso de generación de energía hidráulica.
- Durante el 2011 la **eolicidad**, o viento disponible, ha sido notablemente menor que en el 2010, dentro de los relativamente estrechos márgenes de variabilidad de esta tecnología en términos de cómputo de la energía anual producida. Ello ha llevado a que durante el 2011 no se hayan superado los máximos de producción del año anterior. Sin embargo, el 6 de noviembre de 2011 a las 2.00 horas se registró un nuevo máximo de cobertura de la demanda con energía eólica (un 59,6% frente al máximo anterior del 54,0 %), al coincidir una importante producción eólica con una demanda baja y un notable saldo exportador.
- El aumento de generación con carbón por un lado, y la menor producción de otras fuentes de energía (hidráulica, eólica y nuclear) han dado lugar a un repunte de las **emisiones de CO<sub>2</sub>** del sector eléctrico que se han estimado para el 2011 en 73 millones de toneladas, un 25% más que en 2010.
- El saldo de **intercambios internacionales** ha sido exportador en 6.105 GWh, un 27% inferior al del 2010. Este descenso proviene principalmente de un cambio de signo en el saldo neto de intercambios a través de la interconexión con Francia que, tras ser exportador por primera vez en 2010, vuelve a ser importador por un valor de 1.189 GWh en 2011.
- Respecto a las **infraestructuras de transporte**, durante el 2011 se han puesto en servicio 1.705 km de circuito de los que 1.446 km corresponden al sistema peninsular. Este aumento eleva la red de transporte peninsular al finalizar el año a 37.395 km de circuito y la red nacional a 40.233 km. Entre las infraestructuras puestas en servicio, destaca el enlace eléctrico entre la Península y Baleares de 488 km. Este enlace es la primera interconexión submarina de transporte en corriente continua que existe en España. [60]

## Sistemas extra peninsulares

- La demanda anual de energía eléctrica en los sistemas extra peninsulares se ha mantenido en los niveles del año anterior, con un crecimiento conjunto de apenas un 0,1% (Canarias y Melilla registraron incrementos respectivos de un 1,0% y 0,5 %, mientras que Baleares y Ceuta tuvieron un descenso de un 1,1% y 5,9 %,

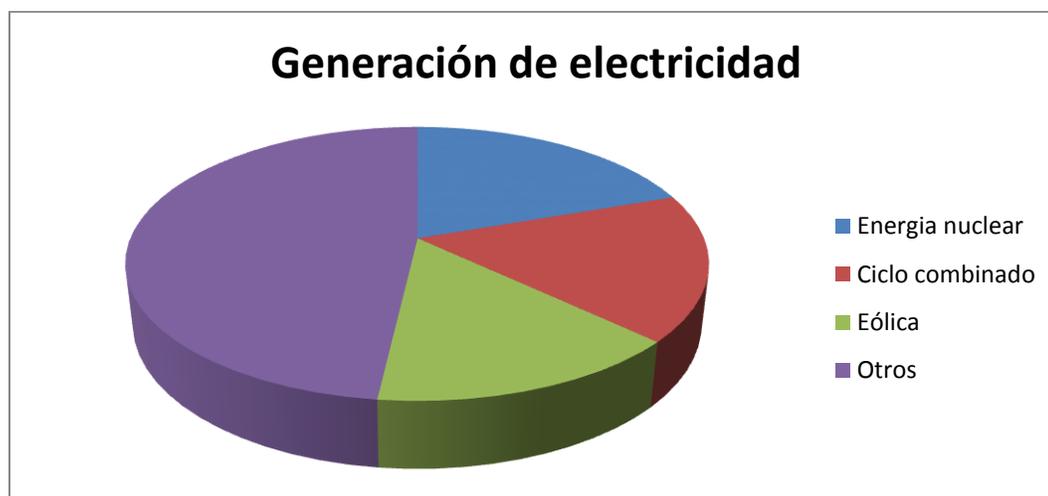
respectivamente). [60]

**Nota:** Datos provisionales: cierre de año con datos estimados. **Fecha de redacción:** 04 de enero del 2012.

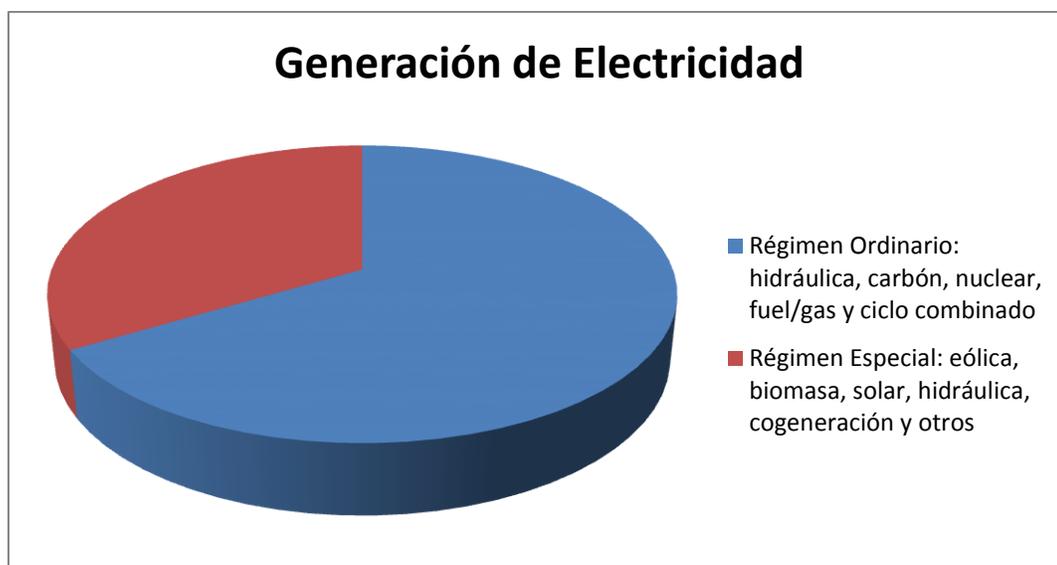
### 8.4.2. Datos de WWF de febrero de 2012 para las diferentes tecnologías

Los ocho reactores nucleares que operan en España han aportado en 2011 el 19,64% de la electricidad que consumimos. Es la tecnología que mayor producción ha generado al sistema eléctrico español.

La energía nuclear, en primer lugar, con una aportación del 19,64%, seguida del ciclo combinado (17,37%) y la eólica (14,82%) son las tres fuentes que mayor generación eléctrica han ofrecido al sistema eléctrico español a lo largo de 2011. El régimen ordinario (hidráulica, carbón, nuclear, fuel/gas y ciclo combinado) ha aportado el 66,48% de la electricidad y el régimen especial (eólica, biomasa, solar, hidráulica y cogeneración y otros) ha generado el 33,52%. [61]



*Figura 8.1.a. Generación de Electricidad en el Sist. Español en 2011*



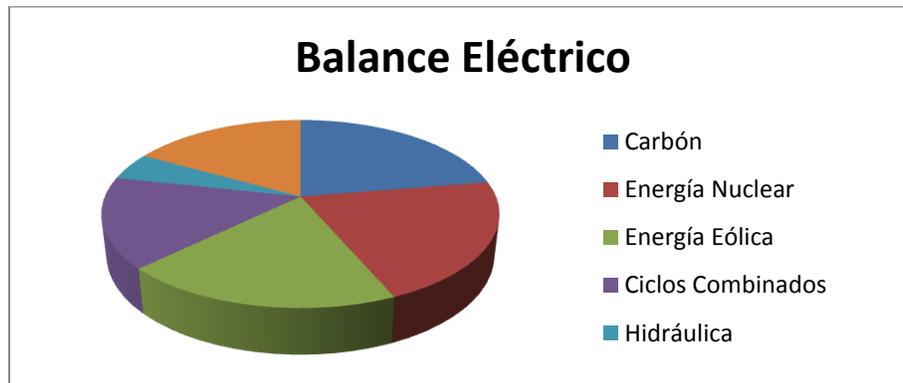
*Figura 8.1.b. Generación de Electricidad en el Sist. Español en 2011*

El Observatorio de WWF de febrero de 2012 destaca el record histórico de la energía eólica que este mes ha cubierto el 19,3% de la demanda del mix eléctrico peninsular. Se sitúa como la tercera tecnología del sistema, aunque todavía por detrás de la nuclear y del carbón. En relación a las emisiones de CO<sub>2</sub>, WWF constata que febrero cierra con un incremento de casi el 40% respecto al mismo mes de 2011, como consecuencia del Real Decreto Ley que apoya la quema de carbón nacional. [62]

Según el Observatorio de la Electricidad de WWF, febrero de 2012 cierra con un aumento de la generación de electricidad, así como de la demanda eléctrica total del Sistema Peninsular, en comparación con febrero de 2011. Si el mismo mes del año pasado la demanda alcanzó los 21.108 GWh, este mes ha aumentado un 6,14%, situándose en los 22.490 GWh. Lo mismo sucede con la producción total de electricidad, siendo en febrero de 2011 de 22.516 GWh, es decir, un 11,24% superior a la del presente mes, de 25.369 GWh.

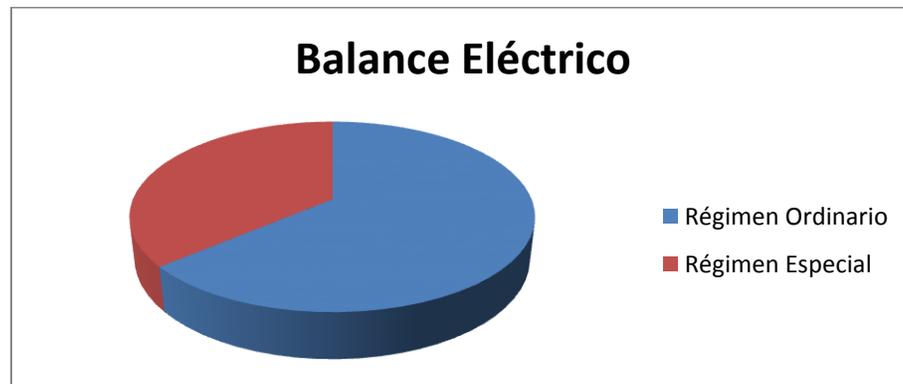
- La energía hidráulica aportó el 4,7% al sistema en febrero de 2012. Su producción se reduce considerablemente respecto a la del mismo mes de 2011 (12,3%). Esta energía se sitúa en el quinto puesto del mix eléctrico del Sistema Peninsular.
- La energía nuclear representó el 21,1% en febrero de 2012, situándola en el segundo puesto del mix eléctrico del Sistema Peninsular, por delante de la energía eólica y del gas natural. Este año ha aumentado su aportación respecto al mismo mes de 2011 (19,8%) y, con ello, la generación de residuos de alta actividad (RAA), así como los de baja y media actividad (RBMA).
- La generación eólica ocupa el tercer puesto dentro del mix de generación peninsular, con una aportación del 19,3% al sistema eléctrico. Su producción ha aumentado respecto al mismo mes de 2011 (16,7 %).

- La producción eléctrica de las centrales térmicas de carbón en febrero de 2012, con una aportación del 22,4%, es considerablemente superior a la registrada en febrero de 2011 (11,3%). Se posiciona, por tanto, como la primera fuente de electricidad del sistema, contribuyendo a un empeoramiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.
- Las centrales de ciclo combinado de gas natural representaron el 15,6% del mix peninsular, disminuyendo su producción de electricidad respecto a febrero de 2011 (21,2%). Ocupan, por tanto, el cuarto puesto en el desglose de fuentes de energía del Sistema Peninsular eléctrico.
- El 16,9% restante corresponde a “otros”: un conjunto de energías renovables (solar, biomasa, mini-hidráulica) y cogeneración.



*Figura 8.2.a. Balance Eléctrico Peninsular del mes de Febrero 2012*

Donde, en Régimen Ordinario se ha generado el 63,8% de electricidad y en Régimen Especial el 36,2% restante en España, registrado para en mes de Febrero de 2012.



*Figura 8.2.b. Balance Eléctrico Peninsular del mes de Febrero 2012*

El saldo de los intercambios internacionales ha sido negativo, lo cual indica que es exportador, supone el 5%. Es superior al registrado en febrero de 2011, de 206 GWh, mientras que en febrero de 2012 se registraron 1.386 GWh de saldo intercambios

internacionales.

Según los datos aportados por REE, se ha generado en febrero de 2012 con energías renovables un total de 7.251 GWh, de los cuales corresponde a energía eólica unos 4.884 GWh, 641 GWh solar fotovoltaica, 210 GWh solar térmica, 364 GWh térmica renovable, 316 GWh mini-hidráulica y 1.183 GWh hidráulica en régimen ordinario. No incluye generación por bombeo. [62]

### **8.4.3. Barreras Energéticas**

Las barreras de la energía fotovoltaica se ha clasificado en cuatro grandes grupos; económicas, tecnológicas, normativas y sociales, en las cuales nos centraremos en las económicas y tecnológicas, que son objeto de este capítulo.

#### **8.4.3.1. Barreras económicas**

- Rentabilidad insuficiente por lo que necesita una prima elevada → Con los precios y el rendimiento hasta ahora vigentes, las instalaciones se amortizan en extensos periodos de tiempo. Es por ello que la fotovoltaica se ha desarrollado asociada a líneas de ayudas, tanto por parte de las CCAA como con fondos estatales. Situación actual que no es sostenible, por la desaparición de las primas.
- Falta de incentivos fiscales → A través de la ley 24/2001 de 27 de diciembre (para grandes empresas que cumplan el artículo 122 del Impuesto de Sociedades), ampliada en su ámbito de aplicación (para toda tipología de empresas) mediante el Real Decreto Ley 2/2003, cualquier empresa que invierta en energía solar tiene la posibilidad de deducción del 10% de la inversión. Sin embargo, los particulares que realicen instalaciones aisladas no cuentan con deducciones en el IRPF.

#### **8.4.3.2. Barreras tecnológicas**

- Falta de iniciativas y de incentivos para el desarrollo de instalaciones innovadoras → La situación actual del mercado y las actuales líneas de apoyo no presentan suficientes incentivos para llevar a cabo proyectos novedosos desde el punto de vista técnico, con integración arquitectónica etc.
- Transitoriamente, falta de materia prima en el mercado internacional → Durante los últimos años, la industria fotovoltaica se ha estado abasteciendo de materias primas (silicio, grado solar) que son subproductos o proceden de procesos compartidos con la industria electrónica. El incremento de ambos sectores esta produciendo tensiones en los mercados, frente a las cuales la fotovoltaica puede verse perjudicada por su esquema económico de menor valor añadido. [63]

## 8.4.4. Tecnologías Energéticas de Estudio

### 8.4.4.1. Energía Eólica

El cálculo del potencial terrestre de Eólica en España es;

- Potencial  $\approx$  330 GW
- En términos de energía, aprox. 700 – 750 TWh

	Km <sup>2</sup>	%
Superficie terrestre total España	506.215	
Superficie con velocidad media anual superior a 6 m/s de altura	118.625	23,43
Superficie tras filtrado técnico y velocidad superior a 6 m/s	95.808	18,93
Superficie tras filtrado técnico, ENP y velocidad superior a 6 m/s	83.120	16,42

Tabla 8.1.

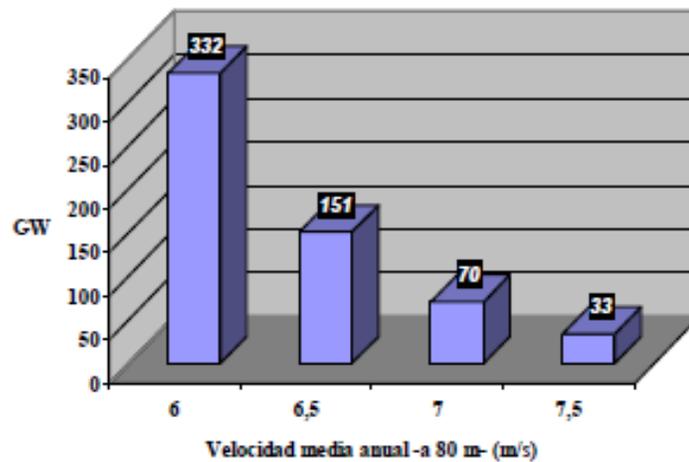


Figura 8.3.

El cálculo del potencial Eólico marítimo en España es;

- Potencial  $\approx$  8,5 GW
- En términos de energía, superior a los 22,5 TWh
- Superficie de estudio (franja 24 millas)  $\approx$  230.000 Km<sup>2</sup>
- Filtrado tecnológico; Cotas batimétricas técnicamente viables para parques

comerciales hasta 2020 ( $\approx 50$  m de profundidad). Superficie  $\approx 18.780$  Km<sup>2</sup>

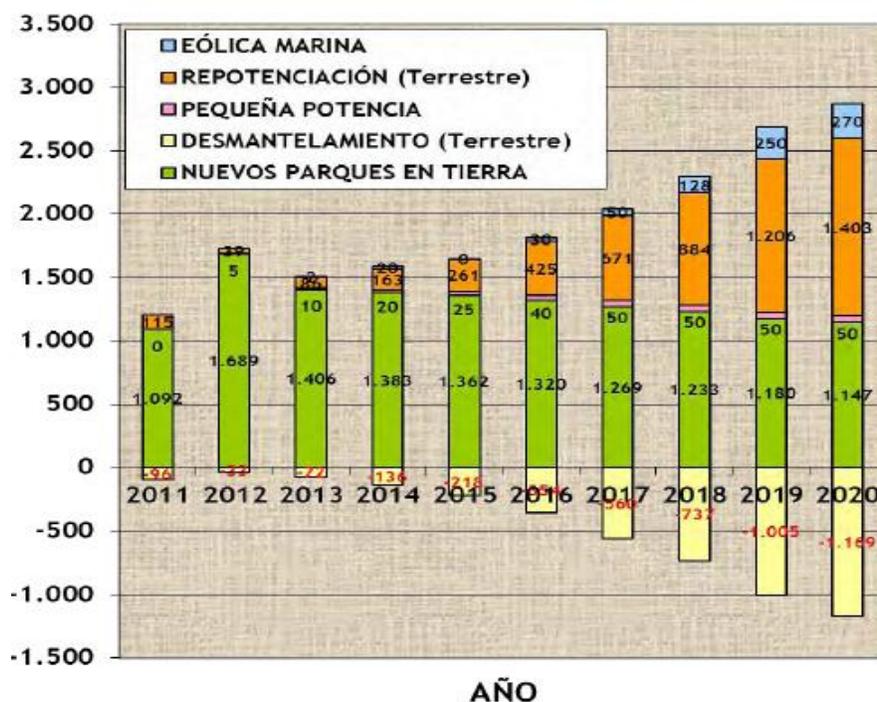
- Filtrado técnico-económico; Disponibilidad de recurso eólico suficiente ( $v \geq 7,5$  m/s, a 80 m de altura). Se reduce la superficie hasta  $\approx 3.500$  Km<sup>2</sup>
- Filtrado medioambiental; Evitando “Zonas de exclusión” del “Estudio Estratégico Ambiental del Litoral” (abril/2009). Desglose;

	Superficie restante (Km <sup>2</sup> )	S (%)
Zonas “Aptas”	31	0,9
Zonas “Aptas con condicionantes”	1.381	39,1
Zonas “de Exclusión”	2.116	60,0
<b>TOTAL – Litoral Español</b>	<b>230.313</b>	
Superficie “Apta” tras filtrados	1.412	
<b>% “Apta” resp. Superficie TOTAL:</b>	<b>0,61%</b>	

*Tabla 8.2. Estudio Estratégico Ambiental del Litoral (abril 2009)*

- Ratio de potencia por unidad de superficie: 6MW/Km<sup>2</sup>

Objetivos de la Energia Eolica, según los estudios del IDAE;

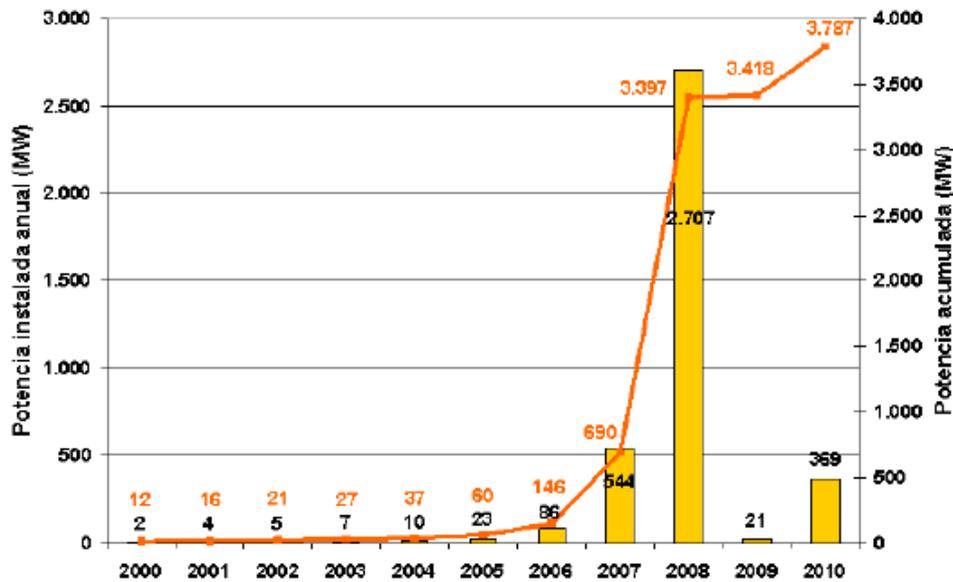


*Figura 8.4. Periodo 2011-2020. Previsiones de incremento anual*

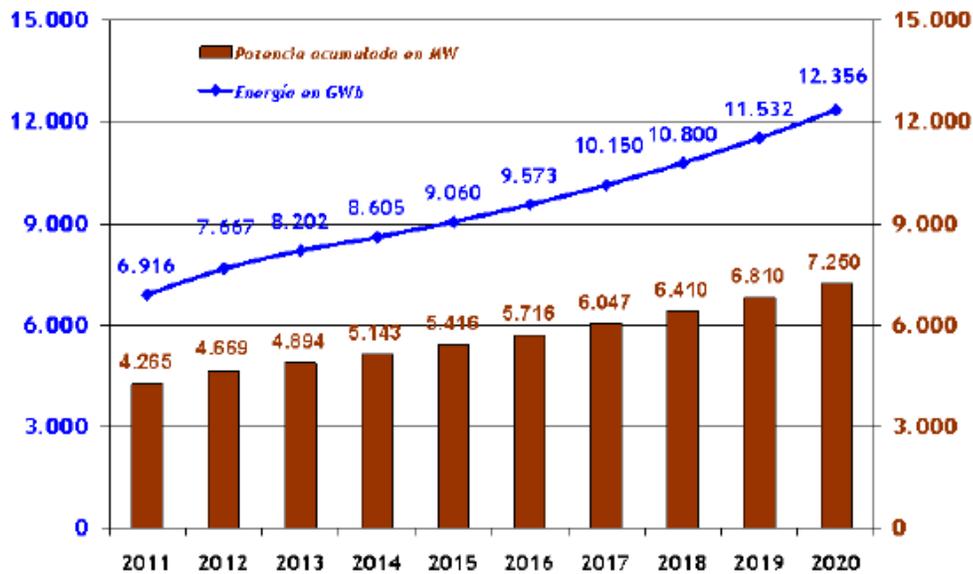
- Incremento de 15.000 MW durante el periodo 2011-2020;
  - Terrestre > 100 kW: 34.700 MW
  - E. Peq. Potencia: 300MW
  - E. Marina: 750 MW
- Contribución eólica en 2020;
  - 19,1 % s/ producción eléctrica bruta nacional
  - 50 % s/ generación eléctrica de origen renovable

#### 8.4.4.2. Energía Fotovoltaica

Los objetivos de la Energía Fotovoltaica, según el IDEA es;



*Figura 8.5. Situación en 2010*



*Figura 8.6. Evolución 2011-2020*

- En 2010 se alcanzan 3.787 MW y 6.407 GWh de generación fotovoltaica.
- En 2011-2020 incremento de 3.463 MW y 12.300 GWh de generación en 2020.
- Se prevé periodo de consolidación del sector, con bajada gradual de costes de generación.

Las propuestas de la Energía Solar Fotovoltaica son;

- Simplificación y homogeneización de los procedimientos administrativos, reduciendo barreras especialmente para proyectos demostrativos e innovadores.
- Fomento de nuevas tecnologías y modelos de negocio, mediante líneas de subvención y financiación.
- Penetración a gran escala en el sistema eléctrico, participando en el cambio progresivo del actual sistema de generación centralizada, hacia un sistema de generación distribuida;
  - Régimen Especial → Mantenimiento de un sistema de tarifas reguladas durante el periodo, con cupos crecientes asociados a tarifas decrecientes. Dirigido a PRODUCTORES NETOS.
  - Balance Neto → Mecanismo de compensación de saldos de energía eléctrica, diseñado para fomento del autoconsumo. Dirigido a CONSUMIDORES NETOS.

### 8.4.4.3. Energía Termoeléctrica

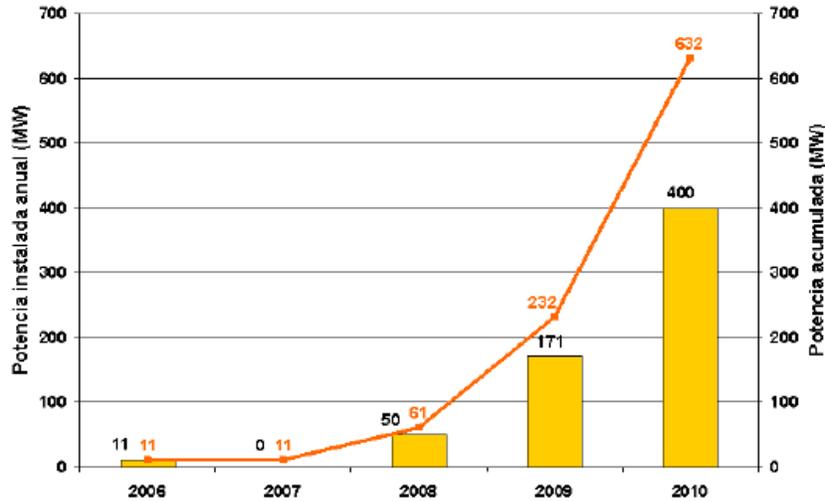


Figura 8.7. Situación 2010

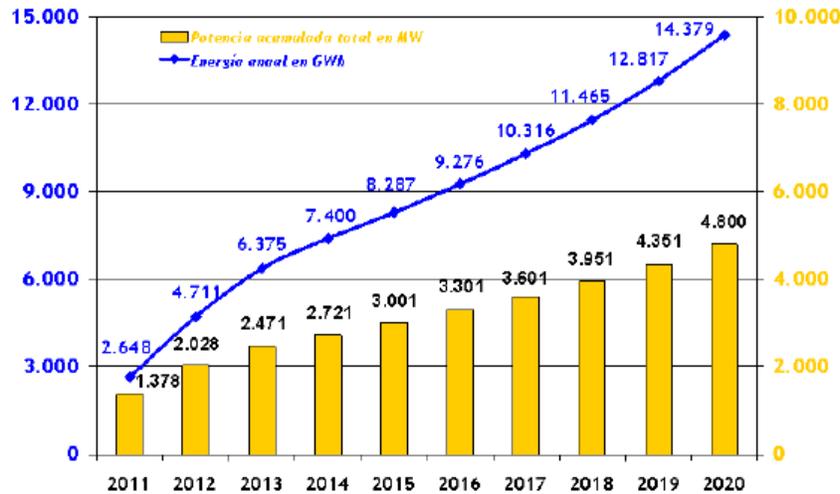


Figura 8.8. Evolución 2011-2020

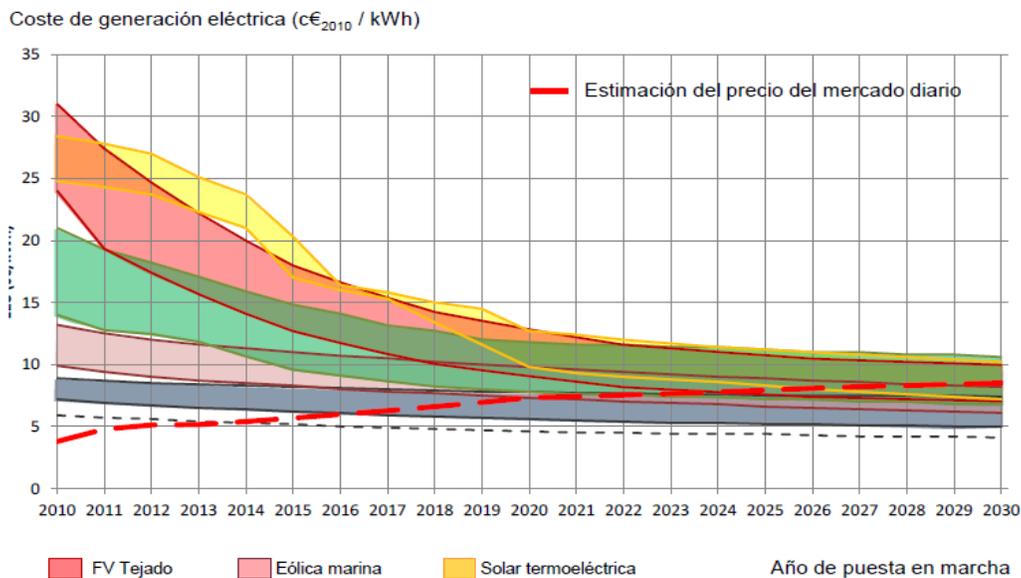
- En 2010 se alcanzan 632 MW y 692 GWh de generación solar termoeléctrica.
- En 2011-2020 incremento de 3.422 MW y 14.380 GWh de generación en 2020.
- Se prevé periodo de maduración del sector, con bajada intensa de costes de generación.

Las propuestas para la Energía Solar Termoeléctrica, según el IDEA;

- **Adaptación de la normativa** para promover flexibilización en la hibridación, simplificación de procedimientos, y reducción de barreras administrativas especialmente para proyectos innovadores.
- **Fomento de mejoras tecnológicas** en fluidos térmicos, equipos y componentes de campo solar y en los sistemas de almacenamiento, que permitan una intensa reducción de costes de generación.
- **Marco regulatorio** estable a partir de enero de 2014:
  - Con régimen económico suficiente y adecuado.
  - Que promueva la I+D para lograr reducción de costes y mejora de la competitividad de la tecnología.

P TOTAL (MW)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL
Torre	11			20		17			48
Cilindro Parabólica			50	150	400	699	649	372	2.320
Fresnel				1		30			31
Disco	0						1	70	71
<b>TOTAL</b>	<b>11</b>		<b>50</b>	<b>171</b>	<b>400</b>	<b>746</b>	<b>650</b>	<b>443</b>	<b>2.471</b>
<b>TOTAL ACUM</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>61</b>	<b>232</b>	<b>632</b>	<b>1.378</b>	<b>2.028</b>	<b>2.471</b>	

**Tabla 8.3.**

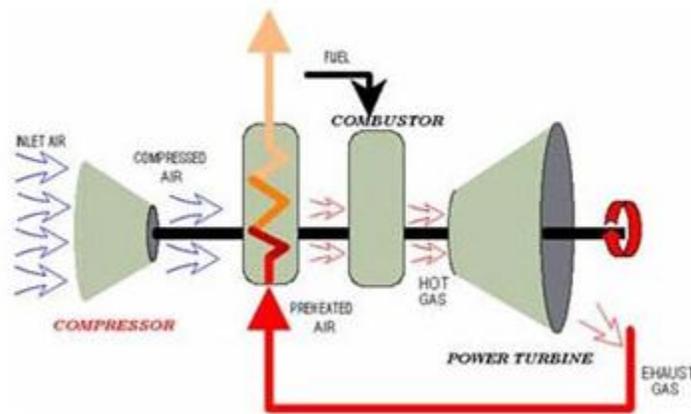


**Figura 8.9. Evolución: Costes de generación**

#### 8.4.4.4. Micro-cogeneración

La micro-cogeneración es el término empleado para denominar la cogeneración hasta 50 kW. El concepto se extiende habitualmente hasta la cogeneración de pequeña escala, que extiende dicha potencia hasta 1 MW.

La micro-generación, con micro-turbinas de gas o micro-motores de combustión, son aplicaciones que se han implantado con éxito en instalaciones del sector terciario tan diversas como son las correspondientes a hospitales, hoteles y oficinas. Ello se debe a que las micro-generadores cubren unas gamas de potencia adecuadas para poder actuar como cogeneraciones a escala reducida, que se adaptan bien a las necesidades de este tipo de establecimientos, aportándoles rendimientos competitivos y prestaciones energéticamente atractivas frente a los sistemas convencionales.



*Figura 8.10. Sistema de Micro-cogeneración [64]*

Según el Código Técnico de Edificación, la exigencia de contribución solar mínima en el aporte energético de agua caliente sanitaria de toda nueva vivienda puede ser sustituida por otros sistemas que usen fuentes renovables o procesos de cogeneración. De este modo, en cada situación las características energéticas, físicas y operativas determinará la viabilidad de la instalación de equipos de micro-cogeneración ó de sistemas de captación solar.

La solución basada en la generación de las necesidades de calor mediante sistemas de micro-cogeneración para la generación de ACS, calefacción y frío, reporta ventajas respecto a la generación de esta demanda mediante sistemas convencionales (calderas) y en muchos casos en los basados en colectores solares térmicos exclusivamente:

- Disponibilidad: La planta de micro-cogeneración no depende de la climatología y garantiza el suministro energético para ACS y calefacción e incluso el eléctrico en los equipos que pueden funcionar como generadores de emergencia.

- Liberación de espacio en comparación con la solar térmica y los sistemas convencionales: La planta de micro-cogeneración ocupa unas dimensiones reducidas, y no necesita invadir espacios arquitectónicamente visibles como fachadas y tejados, ya que se pueden ubicar bajo techo. La cogeneración al ser un sistema centralizado libera espacios de alto valor (interior de viviendas), ocupados por los sistemas convencionales.
- Generación distribuida de electricidad: La energía, tanto térmica como eléctrica, se genera junto al lugar de consumo por lo que no hay pérdidas en el transporte, distribución ni en transformación.
- El aprovechamiento del calor y la generación de electricidad de manera eficiente reportan un ahorro de energía primaria. Esto implica un ahorro en emisiones de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero. [64]

### **Eficiencia de los sistemas de micro-cogeneración. Legislación en España**

Los sistemas de micro-cogeneración tienen rendimientos de generación eléctricos inferiores a los equipos de cogeneración, de mayor tamaño, esta menor capacidad de transformar el combustible en electricidad produce una mayor capacidad de recuperación térmica.

Centrándonos en el ámbito de la micro-cogeneración, si comparamos ambas tecnologías para una misma potencia eléctrica unitaria, la micro-turbina tiene un rendimiento eléctrico menor que el micro-motor (entorno al 30% frente al 35%) pero queda compensado con la recuperación térmica cuando se comparan sus rendimientos globales. Por otra parte, cabe destacar que la ausencia de aceites lubricantes, sistemas auxiliares para el arranque y la refrigeración y una única parte móvil, hacen que su fiabilidad sea superior y sus costes de mantenimiento inferiores. En cada caso se escoger debe la tecnología más apropiada en función de la potencia y del modo de operación.

La legislación es favorable a la micro-cogeneración: El 1 de junio de 2007 entra en vigor el RD 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de electricidad en el Régimen Especial. Este RD otorga diferentes precios a la electricidad vertida a la red en función de los siguientes parámetros: Eficiencia Energética, Tipo de Combustible y Rango de Potencia. Para la actividad que nos interesa en este caso, nos centraremos en el combustible gas natural o GLP para el rango de centrales de menos de 1 MW eléctrico.

Todas las cogeneraciones del grupo a.1. deben cumplir una alta eficiencia energética como se describe en el anexo I del RD 661/2007. Esta eficiencia implica el cumplimiento del REE. Para turbinas de gas de menos de 1 MW, el valor es de 53,1 % y para los motores del mismo rango de potencia, es de 49,5%.

Cabría significar adicionalmente, que el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4), contempla ayudas a fondo perdido para la ejecución de plantas de cogeneración en el sector edificación. Las ayudas se articulan a

través de las CCAA y los porcentajes de las mismas están comprendidas entre un 10% y un 30% dependiendo de la potencia de la instalación. [64]

#### **8.4.4.5. Micro-trigeneración**

Los sistemas de micro-trigeneración son aquellos que generan electricidad, calor y frío. Teniendo en cuenta el ámbito de aplicación de la micro-cogeneración, suministro de la demandas de calor en el sector terciario (básicamente calefacción y ACS), no es difícil ver un campo de aplicación amplio en la micro-trigeneración. La generación de frío para climatización permite alargar el período de operación al no ser coincidentes las demandas de frío y calor. La conversión del calor en frío se realiza mediante máquinas de absorción, es una excelente solución para la cogeneración en el sector terciario. Estos sistemas aportan ventajas sustanciales como:

- Sustitución de consumos de energía eléctrica, de elevado coste, por consumos de energía térmica, lo que permite un mayor dimensionamiento de la central.
- Aumento del número de horas de funcionamiento con alta eficiencia energética.
- Aumento de la versatilidad de la central, puesto que es posible generar, además de electricidad y calor, un tercer tipo de energía: el frío.
- No utilización de CFC's, lo que las convierte en posibles sustitutos de las máquinas de compresión basadas en este tipo de fluidos refrigerantes.

Para la generación de frío a partir de calor se utiliza el ciclo de absorción integrado. Para el tipo de aplicación que estamos tratando, cabe destacar las máquinas basadas en BrLi que son las utilizadas habitualmente para la climatización de edificios. En éstas, el BrLi actúa como absorbente y el agua como fluido refrigerante. En aplicaciones de climatización, para generación de agua fría del orden de 5-7 °C las máquinas de simple efecto permiten conseguir COP's de aproximadamente 0,7. [64]

#### **8.4.4.6. Biomasa**

#### **8.4.5. Maquinas frigoríficas**

El término “bomba de calor” se aplica a aquéllas máquinas capaces de extraer calor de una fuente fría para cederlo a otra de nivel superior (fuente caliente). En función de su objetivo, estas máquinas reciben el nombre de máquinas frigoríficas o bombas de calor propiamente dichas. Podemos clasificar una máquina frigorífica en función de su modo de accionamiento, según éste se produzca:

- Por medio de energía eléctrica o trabajo mecánico
- A través de aporte de calor.

Las máquinas más conocidas del primer grupo son las máquinas de compresión, y

dentro del segundo, las más extendidas son las máquinas frigoríficas de absorción. La eficacia o rendimiento o COP de una máquina frigorífica se define como la razón entre la potencia frigorífica generada  $Q_0$ , y el trabajo absorbido  $W$ :

$$\text{COP}_{\text{MF}} = Q_0/W$$

Ahora bien, si empleamos esta máquina como bomba de calor, el rendimiento del ciclo se define como la razón entre el calor útil  $Q_1$ , y la energía de accionamiento  $W$ .

$$\text{COP}_{\text{BC}} = Q_1/W$$

Por el principio de conservación de la energía se cumple que:

$$Q_1 = Q_0 + W \rightarrow \text{COP}_{\text{BC}} = \text{COP}_{\text{MF}} + 1$$

Lo que significa que el rendimiento de una máquina funcionando como bomba de calor siempre es una unidad superior al rendimiento de dicha máquina funcionando como máquina frigorífica [65].

#### **8.4.6. Rendimientos para la facturación de energía**

##### **8.4.6.1. Horas equivalentes y factor de capacidad**

Existe un límite de horas de funcionamiento para facturar en régimen especial, dependiente de cada tecnología y cambiante con el tiempo según las decisiones gubernamentales. Viene dado por las “horas equivalentes” que miden el rendimiento energético la instalación en un emplazamiento dado. Representan el número de horas al año que la máquina estaría produciendo a su potencia nominal, será tanto mayor cuanto más elevado sea el potencial del emplazamiento así como cuanto mejor se adapte dicha tecnología a las condiciones del emplazamiento.

$$\text{Horas equivalentes} = \frac{\text{Energía total obtenida en un año}}{\text{Potencia nominal}}$$

El factor de capacidad representa el porcentaje de energía realmente producida en un año dividida por la teóricamente producible en el mismo periodo.

$$\text{Factor de capacidad} = \frac{\text{Horas equivalentes}}{\text{Horas totales del periodo}} \quad [66]$$

##### **8.4.6.2. Rendimiento eléctrico equivalente en cogeneración y trigeneración**

Como en capítulos posteriores explicaremos, la elección de la tecnología de Micro-cogeneración será un motor de combustión interna alternativo a gas natural. Por ello explicaremos la forma de calcular el rendimiento eléctrico equivalente (REE) y los parámetros asociados sólo para esta tecnología, este combustible, una potencia de 4 MW y para fecha de instalación de 2011 o superiores. Para la micro-trigeneración se elegirá una máquina de absorción para la generación de frío.

El calor que procede de la cogeneración ( $H_{CHP}$ ) se define como calor útil a efectos de evaluar las plantas y el calor que procede de un combustible, se denominará como calor de no cogeneración ( $H_{no-CHP}$ ) de forma que:

$$H = H_{CHP} + H_{no-CHP}$$

El calor no cogenerado es aquel que se ha producido fuera de un proceso de cogeneración, es decir que sea un calor que previamente no haya sido empleado para la producción de energía eléctrica. Este calor puede ser medido; no obstante en el caso de que no lo sea por dificultades técnicas puede ser estimado a partir del combustible empleado para su producción aplicando el valor de referencia de la eficiencia para la producción separada de calor  $Ref H_{\eta}$  para cada tipo de proceso. Dentro de este apartado se considera el calor producido por una caldera convencional o un quemador auxiliar, de postcombustión, vapor de extracción de una caldera alimentada con combustible, antes de su uso en una turbina de vapor, vapor sobrante, no recuperable y que suele condensarse produciendo energía eléctrica y/o mecánica en una turbina de condensación, vapor o calor empleado en la propia planta de cogeneración para precalentamientos de agua de alimentación, desgasificación térmica, etc. En términos generales se puede calcular:

$$H_{no-CHP} = F_{no-CHP,H} \cdot Ref H_{\eta}$$

En la tabla 8.4 se indican los valores de referencia de la producción separada de calor ( $Ref H_{\eta}$ ) aplicables al gas natural, distinguiendo entre la generación de vapor y/o agua caliente y el uso directo de gases de escape, si su temperatura es superior a 250 °C.

Tipo de combustible		Vapor/agua caliente	Uso directo de gases de escape
Combustibles gaseosos	Gas natural	90 %	82 %

*Tabla 8.4. Valores de referencia para la producción separada de calor*

La determinación del calor útil se realiza de acuerdo al medio transmisor de calor. Cuando se trate de agua líquida o fluidos térmicos (generalmente aceite), con un caudal  $m$ , con una alteración de temperaturas  $T_2 < T_1$ , se calcula como:

$$H = m (h_1 - h_2)$$

$$H = m \cdot C_e \cdot (T_1 - T_2)$$

donde  $h_1$  y  $h_2$  son las entalpías de salida y retorno de agua respectivamente y  $C_e$  es el calor específico medio del fluido si se puede considerar suficientemente significativo.

En el caso de tratarse de vapor de agua, se distinguirán los casos en los que éste se incorpore o no en los procesos:

-Cogeneraciones en las cuales el vapor de agua se incorpora al producto elaborado en el proceso. El calor útil únicamente consistirá en el calor de la corriente de vapor entregado a proceso.

$$H = m_v \cdot h_v - m_A \cdot h_A$$

Donde  $m_v$  es el caudal de vapor entregado a proceso;  $m_A$  el caudal de la corriente de agua de aporte a la cogeneración;  $h_v$ , entalpía específica del vapor entregado a proceso;  $h_A$ , entalpía del agua en estado líquido a  $15^\circ\text{C}$  y presión atmosférica (15 kcal/kg ó 63 kJ/kg).

-Cogeneraciones en las cuales el vapor de agua NO se incorpora al producto elaborado en el proceso. En estos casos el cálculo del calor útil se realizará de la siguiente forma:

A. Si el proceso demandante de calor sí retorna condensados en una cuantía mínima del 70% respecto del vapor entregado a dicho proceso, o bien si el producto de la entalpía del condensado que retorna por el porcentaje del caudal de retorno de condensados respecto al vapor entregado, dividido por 100, resulta igual o superior a 75,5 kcal/kg (316 kJ/kg), el calor útil se obtendrá de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H = m_v \cdot h_v - m_C \cdot h_C - m_A \cdot h_A$$

Donde  $m_C$  es el caudal medido de la corriente de retorno de condensados a los equipos de cogeneración y  $h_C$  es la entalpía del retorno de condensados obtenida a partir de mediciones.

B. En el resto de los casos no contemplados en el anterior punto "A" el calor útil se obtendrá de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H = m_v \cdot (h_v - h_0)$$

donde  $h_0$  entalpía del agua en estado líquido a  $80^\circ\text{C}$  y presión atmosférica (80 kcal/kg ó 334,9 kJ/kg).

En el caso de que el calor generado por la planta de cogeneración sea el contenido en los gases de escape del motor, calor útil (H) puede calcularse en este caso como sigue:

$$H = m \cdot (h_1 - h_2)$$

Donde  $m$  es la cantidad de gases correspondiente al período de control considerado,  $h_1$  es la entalpía del gas de entrada a los equipos de secado, y  $h_2$  es la entalpía de salida del gas de los equipos de secado.

Alternativamente puede calcularse el calor útil sumando al calor latente del agua evaporada el incremento del calor sensible del agua total más el incremento de calor sensible del producto secado, ambos incrementos desde la temperatura del producto húmedo a la entrada al secadero hasta la temperatura final del producto seco. Esta ecuación puede expresarse en función del calor específico de los gases y sus temperaturas, pudiéndose aplicar la siguiente ecuación que relaciona el calor específico de un gas con gran proporción de aire con su temperatura (expresión válida entre 0 °C y 1500 °C):

$$[C_{Pm}]_0^T = 0,9952 + 92,1 \cdot 10^{-6} \cdot T$$

Donde  $C_{Pm}$  viene expresado en kJ/(kg·°C) y T se introduce en °C. Así, aplicada esta expresión, la ecuación del calor útil sería la siguiente:

$$H = m \cdot (0,9952 + 92,1 \cdot 10^{-6} \cdot T_1) \cdot T_1 - (0,9952 + 92,1 \cdot 10^{-6} \cdot T_2) \cdot T_2$$

Siendo  $T_1$  y  $T_2$  las temperaturas de entrada y salida de los gases del secadero.

En el caso de la trigeneración, es decir, con demanda de refrigeración, la energía térmica útil correspondiente tomará el mismo valor que la demanda de refrigeración final que satisfaga la cogeneración. Esta indicación ha de entenderse únicamente aplicable al caso de climatización de edificios.

La metodología para la obtención del calor útil cuando el calor producido por una cogeneración se emplea en la producción de frío mediante máquinas de absorción, se indica a continuación:

-En el caso que la generación de frío se realice a un nivel de temperatura superior a 0°C el calor útil corresponderá a la demanda de refrigeración final.

-En el caso que la generación de frío se realice a un nivel de temperatura inferior a 0°C el calor útil corresponderá a todo el calor consumido por las máquinas de absorción, siempre que la temperatura de dicho calor consumido sea inferior a 180°C.

El REE es el rendimiento eléctrico comparable con una planta de sólo generación de energía eléctrica, descontando del combustible consumido el necesario para producir calor por sistemas convencionales. Esta comparación directa con plantas del régimen ordinario no tiene en cuenta las pérdidas evitadas en las redes de transporte y distribución. El rendimiento mínimo exigido para el gas natural en motores térmicos es  $REE_{mín} = 55\%$ . Su expresión es la siguiente:

$$REE = \frac{E}{F_{CC} + F_{no-CHP, hpostcombustión} - \frac{H_{CHP} + H_{no-CHP, postcombustión}}{Ref H_{\eta}}}$$

donde E es la energía eléctrica generada por la planta de cogeneración;  $F_{CC}$  el combustible consumido por la cogeneración;  $F_{no-CHP, H_{postcombustión}}$  el combustible consumido por dispositivos de postcombustión;  $H_{no-CHP, postcombustión}$  el calor producido por dispositivos de postcombustión.

La electricidad generada (E) podrá dividirse en dos clases: una que podemos denominar  $E_{CHP}$  o electricidad de cogeneración, y otra  $E_{no-CHP}$  que no puede considerarse de cogeneración al no aportar los beneficios que deben atribuirse a la electricidad producida en cogeneración.

La electricidad de cogeneración se considera igual a la producción de electricidad total en el período considerado en el punto de conexión de los generadores ( $E_{CHP} = E$ ) si se cumple que la eficiencia global del período  $\eta$  es mayor o igual de 75 % para turbinas de vapor de contrapresión, turbinas de gas con recuperación de calor, motores de combustión interna, micro-turbinas, motores Stirling y pilas de combustible.

En los casos en que la eficiencia global de la planta sea inferior al valor umbral mencionado, la electricidad de cogeneración se obtendrá mediante la expresión:

$$E_{CHP} = H_{CHP} \cdot C$$

donde C es la relación entre electricidad y calor funcionando en modo de cogeneración total, es decir,  $C = E_{CT}/H_{CT}$

No obstante, se acepta que el parámetro C sea medido y certificado en una operación puntual de prueba de la cogeneración en modo de cogeneración total, siendo válido por un periodo de 2 años no siendo necesario de este modo realizar el proceso de cálculo antes descrito durante este periodo de validez.

Como alternativa a la indicada anteriormente se puede calcular como sigue, teniendo en cuenta que no se instalará una turbina de vapor a condensación:

$$C = \frac{\eta_E}{\eta_0 - \eta_E}$$

Donde  $\eta_E$  es el rendimiento eléctrico de la cogeneración calculado como la división de la energía eléctrica generada (E) entre el combustible consumido exclusivamente por la cogeneración ( $F_{CC}$ );  $\eta_0$  es el rendimiento global umbral cuyo valor es del 75 % para motores de combustión interna.

De acuerdo a la Directiva 2004/8/CE, se entiende por cogeneración de alta eficiencia aquella que cumple para cogeneraciones de potencia eléctrica igual o superior a 1 MWe aquella cuya producción aporte un ahorro porcentual de energía primaria (PES) de al menos un 10%. El cumplimiento del REE<sub>mín</sub> y de la cogeneración de alta eficiencia es necesario para obtener el certificado de “garantías de origen”, solo se facturará en régimen especial la electricidad de cogeneración.

El ahorro de energía primaria se refiere únicamente al calor útil producido ( $H_{CHP}$ ), y la electricidad de cogeneración producida ( $E_{CHP}$ ); de este modo, la expresión del ahorro porcentual de energía primaria posee la siguiente expresión:

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{CHPH_{\eta}}{Ref H_{\eta}} + \frac{CHPE_{\eta}}{Ref E_{\eta}}} \right] \cdot 100$$

El parámetro  $F_{CHP}$  corresponde al combustible únicamente asociado a la producción del calor útil y la electricidad de cogeneración, cuyo cálculo se indica a continuación para el caso en que no se disponga de condensación de vapor:

$$CHPH_{\eta} = \frac{H_{CHP}}{F_{CHP}} ; \quad CHPE_{\eta} = \frac{E_{CHP}}{F_{CHP}}$$

La energía eléctrica que no es de cogeneración es  $E_{no-CHP} = E - E_{CHP}$

Para el cálculo de del valor de referencia para la producción separada de electricidad, acudimos a la tabla 8.5.

Año de construcción		2006-2011
Combustibles gaseosos	Gas natural	52,5 %

*Tabla 8.5. Valores básicos de referencia para la generación eléctrica separada*

A partir de los valores básicos se obtendrán, corregidos en función de las condiciones climáticas del emplazamiento de la planta y por el nivel de tensión de su conexión, los valores de referencia para la producción separada de electricidad [67].

Para la corrección por clima, hay que tener en cuenta que Murcia se encuentra en la zona con temperatura media de 19°C, de hecho según el Instituto Nacional de Estadística en el 2010 tuvo una temperatura media de 18,4° C, en el 2009 tuvo una temperatura media de 19,4°C, aunque en el 2008 fue de 18,9°C [68]. Tomando los 19°C como valor medio, habrá que disminuir el valor de referencia en 0,1% por cada grado por encima de 15°C, es decir, en un 0,4%.

En cuanto a la corrección por nivel de tensión, en la tabla 8.3 se reproduce la tabla de la Decisión en la que se pueden leer los factores a aplicar a los ya corregidos por condición climática. Dichos factores dependen, por un lado, del nivel de tensión, pero también de si la electricidad producida es exportada o auto-consumida.

Tensión de conexión	Exportación	Autoconsumo
> 200 kV	1	0,985
100 - 200 kV	0,985	0,965
50 - 100 kV	0,965	0,945
0,4 - 50 kV	0,945	0,925
< 0,4 kV	0,925	0,860

**Tabla 8.6. Factores de corrección por nivel de tensión**

Hay que tener en cuenta que el propósito de la instalación es la venta total de la energía eléctrica, pero para alimentar a las zonas anexas a la instalación aprovechando los beneficios que proporciona la generación distribuida.

Los contadores eléctricos se hallan situados en las cabinas de medición junto a los puntos de conexión y son los que la empresa de suministro utiliza para las transacciones. Para medir la electricidad generada se deben emplear contadores trifásicos comerciales y ser instalados para proveer lecturas directas tanto de la electricidad importada como de la electricidad exportada y los consumos propios.

La electricidad generada por la planta es el valor bruto. Este valor viene dado directamente por el contador integrado en el equipo principal, de modo que si éste se considera suficientemente preciso puede emplearse esta medición para evaluar la electricidad bruta.

De no ser así, la medición de la electricidad bruta generada deberá basarse en los contadores de facturación (ESI y ESE y EU) y en la medida de los consumos propios (ECP). Estos consumos son los debidos a los ventiladores, bombas de torres de refrigeración, consumos de los compresores de gas, etc.

La cantidad de autoconsumo eléctrico es distinto según el tipo de planta ya que, por ejemplo, una planta de motor a gas tiene más auxiliares y por tanto mayor autoconsumo que una planta de ciclo simple con turbina de gas. Este tanto por ciento depende del tipo de ciclo y del tamaño. Si no se puede efectuar la medida de los consumos propios directamente, se tomarán los valores establecidos en la tabla 8.7. [67]

Tipo de ciclo	Consumos propios (%)
Ciclo simple con motores de combustión interna a gas	4
Ciclo de trigeneración con motores	5

**Tabla 8.7. Valores por defecto de los consumos propios en función del tipo de ciclo empleado, expresados en función de la electricidad producida**

Para más información acudir al anexo IV: “Legislación Sobre Fiscalidad de [69].

### **8.4.6.3. Metodología de evaluación del REE para trigeneración**

La eficiencia de las plantas de cogeneración medida a través del REE, cuando producen frío (trigeneración), se ha venido evaluando de forma distinta en diversas comunidades autónomas debido a diferencias de criterio en la transformación del frío en energía primaria. La forma de evaluación más simple es considerar que el frío obtenido se ha realizado en una máquina de absorción que utiliza el calor producido en la planta de cogeneración.

Este método, que es el que se ha utilizado en la mayoría de las CCAA, es simple, pero puede dar lugar a situaciones no acordes con la eficiencia energética. Efectivamente, las plantas que utilizan máquinas de absorción con el COP más bajo (simple efecto), permiten aprovechar más calor que si se utilizaran plantas de doble efecto (que consumen la mitad del calor aprox.) y esto favorece la instalación de las plantas menos eficientes.

Para resolver este problema, se puede aplicar el criterio de utilizar el frío generado en lugar del calor empleado en su producción, lo que equivale a considerar un COP de frío a calor de 1/0,9. Esto crea situaciones discriminatorias, ya que tiene igual consideración un frío de 6°C para climatización que uno a -40°C (para túneles de congelación), cuando en realidad ambos requieren energías muy diferentes, tanto en cantidad, como en calidad.

Otro criterio podría ser el de la electricidad evitada en un sistema de compresión para producir el mismo frío. Esta electricidad evitada se transformaría en energía primaria a través del rendimiento de referencia (Ref  $E_{\eta}$ ) de producción de electricidad. Este método debería tener en consideración para cada nivel de frío producido, el COP de la planta de referencia (fundamentalmente de compresión), así como el Ref  $E_{\eta}$  que se debería considerar en función del combustible consumido, la edad de la planta, etc. Todo ello, hace que sea complejo de aplicar y, sobre todo, no tiene en consideración que, en lugar de usar energía primaria (combustible), se utiliza calor a temperaturas relativamente bajas y de difícil valorización en muchos casos.

El calor útil aquel que es económicamente justificable y que de no realizarse con esta planta debería usarse un sistema alternativo, que en el caso de producción de frío sería fundamentalmente el “chiller” de compresión. Por todo ello, es razonable considerar que el frío producido debería tener un precio igual o menor que el producido en una máquina alternativa de compresión y que el calor a emplear en la producción de frío no debería tener una utilización más eficiente (por ejemplo, producir más electricidad). El calor utilizado en la máquina de absorción es útil si permite producir más frío que el que se podría obtener en una máquina de compresión con la electricidad producida a partir del mismo calor.

Si el calor es útil a efectos de la Directiva Europea, la planta de Trigeneración podrá evaluarse como una de cogeneración, considerando la totalidad del calor empleado en producir frío y su evaluación se realizará como indicamos anteriormente.

La tabla 8.8 indica, para cada nivel (y su temperatura) de frío, las cantidades obtenibles de frío por absorción y por compresión con la utilización como energía primaria de 1 MWh térmico a diferentes temperaturas (desde 80° C hasta 180° C).

Temperatura °C	Del frío °C	Del calor					
		80	100	120	140	160	180
Por compresión COP = 6	+ 6	436	600	798	900	1043	1170
Por absorción 1 efecto 90		650	650	650	650	650	650
Por absorción 2 efectos 160		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1150	1170
Por compresión COP = 3,6	-10	261	360	478	540	626	702
Por absorción ( $T_{\min} = 90$ )		n.a.	610	610	610	610	610
Por compresión COP = 2,71	-30	n.a.	271	361	406	471	528
Por absorción ( $T_{\min} = 120$ )		n.a.	n.a.	480	480	480	480
Por compresión COP = 1,95	-40	141	195	259	292	339	380
Por absorción ( $T_{\min} = 130$ )		n.a.	n.a.	n.a.	420	420	420
Por compresión COP = 1,51	-50	109	151	200	226	262	294
Por absorción ( $T_{\min} > 150$ )		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	380	380

*Tabla 8.8. kWh de frío por compresión o absorción por MWh de energía eléctrica y térmica*

Puede considerarse útil el calor empleado en la generación de frío si se cumplen las siguientes condiciones:

En la generación de frío para climatización (5 a 6 °C):

-Todo el calor empleado en máquinas de simple efecto, siempre que dicho calor tenga una temperatura inferior a 120 °C.

-Todo el calor empleado en máquinas de doble efecto, siempre que su temperatura sea inferior a 180° C

Por lo tanto, no se considerará calor útil el utilizado para producir frío de climatizaciones si su temperatura supera los 120 °C en máquinas de absorción de simple efecto o de 180 °C en máquinas de doble efecto.

En la generación de frío industrial para niveles frigoríficos de hasta -50 °C:

-Todo el calor consumido en máquinas de absorción, siempre que su temperatura sea inferior a 180 °C [70].

## 8.5. Referencias

### 8.5.1. Figuras y Tablas

Figura 8.1.a. Generación de Electricidad en el Sist. Español en 2011

Figura 8.1.b. Generación de Electricidad en el Sist. Español en 2011

Figura 8.2.a. Balance Eléctrico Peninsular del mes de Febrero 2012

Figura 8.2.b. Balance Eléctrico Peninsular del mes de Febrero 2012

Figura 8.3.

Figura 8.4. Periodo 2011-2020. Previsiones de incremento anual

Figura 8.5. Situación en 2010

Figura 8.6. Evolución 2011-2020

Figura 8.7. Situación 2010

Figura 8.8. Evolución 2011-2020

Figura 8.9. Evolución: Costes de generación

Figura 8.10. Sistema de Micro-cogeneración [64]

Tabla 8.1

Tabla 8.2. Estudio Estratégico Ambiental del Litoral (abril 2009)

Tabla 8.3

Tabla 8.4. Valores de referencia para la producción separada de calor

Tabla 8.5. Valores básicos de referencia para la generación eléctrica separada

Tabla 8.6. Factores de corrección por nivel de tensión

Tabla 8.7. Valores por defecto de los consumos propios en función del tipo de ciclo empleado, expresados en función de la electricidad producida

Tabla 8.8. kWh de frío por compresión o absorción por MWh de energía eléctrica y térmica

### **8.5.2. Textos**

[53] CNE marzo de 2012 [http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/cne09\\_12.pdf](http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/cne09_12.pdf)

[54] [http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases\\_datos/doc.php?id=BOE-A-2012-1310](http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases_datos/doc.php?id=BOE-A-2012-1310)

[55] Real Decreto-ley 1/2012 <http://www.boe.es/boe/dias/2012/01/28/pdfs/BOE-A-2012-1310.pdf>

- [56] Revisión de tarifas  
2012 <http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Tarifas2008/Paginas/precios.aspx>
- [57] Costes considerados para 2012  
<http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Tarifas2008/Paginas/Costes.aspx>
- [58] <http://www.fundacionrenovables.org/2012/01/no-a-moratoria-de-renovables/>
- [59]  
[http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2012/02/01/206826.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2012/02/01/206826.php)
- [60] [http://www.ree.es/sistema\\_electrico/informeSEE-avance2011.asp](http://www.ree.es/sistema_electrico/informeSEE-avance2011.asp)
- [61] La Energía Nuclear es la Tecnología que más electricidad ha aportado en 2011  
<http://www.mundoenergia.com/noticias/convencionales/la-energia-nuclear-es-la-tecnologia-que-mas-electricidad-ha-aportado-en-2011-201201114389/>
- [62] WWF denuncia el aumento de las emisiones a pesar del record histórico de la eólica  
<http://www.mundoenergia.com/noticias/medioambiente/wwf-denuncia-el-aumento-de-las-emisiones-a-pegar-del-record-historico-de-la-eolica-201203074526/>
- [63] Barreras tecnológicas  
[http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Plan/Documentos/DocumentoCompleto/7Cap35\\_SectorFotovoltaico.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Plan/Documentos/DocumentoCompleto/7Cap35_SectorFotovoltaico.pdf)
- [64] <http://www.cogenspain.org/index.php/Microcogeneracion/microcogeneracion.html>
- [65] “Tema I.2. Transformaciones energéticas”. Apuntes de Tecnología Energética. 5º Ingeniero Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena,
- [66] “Energías renovables y eficiencia energética”. itc. <http://iesaricotec.files.wordpress.com/2010/11/libroenergiarenovableyeficienciaenergic3a9tica.pdf>
- [67] “Guía técnica para la medida y determinación del calor útil, del a electricidad y del ahorro de energía primaria de cogeneración de alta eficiencia”. IDAE.  
[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_Guia\\_calculo\\_calor\\_util\\_\\_Hchp-Echp-PES\\_c24e48c1.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Guia_calculo_calor_util__Hchp-Echp-PES_c24e48c1.pdf)
- [68] “Temperaturas medias, horas de sol y precipitación acuosa”. Climatología. Instituto Nacional de Estadística. <http://www.ine.es/daco/daco42/bme/c19.pdf>
- [69] “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica”. PFC. Mario Bastida Dólera. PFC. Director Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Universidad

Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Eléctrica

[70] Trigeneración: El Calor útil en la Producción de Frío. J.M.<sup>a</sup>. Cogen España.  
[http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/Evaluacion\\_20de\\_20las\\_20plantas\\_20de\\_20Trigeneracion\\_20v15\\_20noviembre\\_202004.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/Evaluacion_20de_20las_20plantas_20de_20Trigeneracion_20v15_20noviembre_202004.pdf)



# Capítulo 9. Respuesta a los Subcriterios.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

## CAPÍTULO 9: RESPUESTA A LOS SUBCRITERIOS

### 9.1. Introducción

Los atributos o los criterios no son lo suficientemente explícitos o claros como para dar respuesta por sí solos a las cuatro dimensiones que afectan de manera directa a la hora de construir un parque generador de energía eléctrica. Por ello incluimos subcriterios más operativos, en forma secuencial entre el nivel de criterios y el de las alternativas, en forma de preguntas que ahonden en los aspectos más influyentes de cada uno de ellos, se puede observar en la tabla 9.1;

Alternativas	Criterios	Subcriterios
Eólica (A <sub>1</sub> )	Medioambiente (C <sub>1</sub> )	¿Qué niveles de gases de efecto invernadero emite la planta? (C <sub>11</sub> )
Solar (A <sub>2</sub> )		¿Cuánto terreno hace falta para la instalación? (C <sub>12</sub> )
Micro-cogeneración (A <sub>3</sub> )	Sociedad (C <sub>2</sub> )	¿Hay prejuicios en contra de la tecnología? (C <sub>21</sub> )
Micro-trigeneración (A <sub>4</sub> )		¿Se generan ruidos molestos para los vecinos de la zona? (C <sub>22</sub> )
Biomasa (A <sub>5</sub> )		¿Cuánto empleo se crea en la localidad? (C <sub>23</sub> )
Hidráulica (A <sub>6</sub> )	Tecnología (C <sub>3</sub> )	¿La tecnología está madura? (C <sub>31</sub> )
		¿Hay proveedores de la tecnología cerca? (C <sub>32</sub> )
		¿Cuál es el rendimiento de la instalación? (C <sub>33</sub> )
		¿Cuál es la disponibilidad de los recursos? (C <sub>34</sub> )
	Economía (C <sub>4</sub> )	¿Cuál es la inversión inicial? (C <sub>41</sub> )
		¿Cuánto cuesta la materia prima? (C <sub>42</sub> )
		¿Cuál es el tiempo de Pay-back? (C <sub>43</sub> )
		¿Cuánto se ingresa? (C <sub>44</sub> )
		¿Cuáles son los costes? (C <sub>45</sub> )

*Tabla 9.1. Alternativas, Criterios y Subcriterio, de nuestro caso de estudio.*

La identificación de criterios y subcriterios constituye los puntos de vista considerados más importantes para la resolución de un problema o la consecución de un objetivo y por ello es el capítulo más intensivo en tiempo. Este proceso es la base para la toma de decisiones, que puede ser medida o evaluada y expresará las preferencias.

Se ha procurado enriquecer la investigación previa realizada en [71] “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica: Aplicado a Métodos de Relaciones de Superación”.

Para ello se ha recabado aún más información para la verificación de los datos arrojados, se han actualizado aquéllos que han variado con el tiempo, se ha dado un enfoque distinto en algunas líneas según otro punto de vista y, ante todo, se han asignado valores numéricos a todos los subcriterios, para que el análisis sea lo más fidedigno posible, y la respuesta final venga dada de forma natural por referencias de casos reales o de estudios realizados de forma exhaustiva sobre cada uno de los puntos, y no por valoraciones personales.

El modelo seguido podemos visualizarlo en la figura 9.1 donde se puede ver la vasta red de relaciones entre las alternativas y los subcriterios. Esto nos da una idea de la gran dificultad que sería tomar una decisión sin la existencia de los métodos de decisión multicriterio.

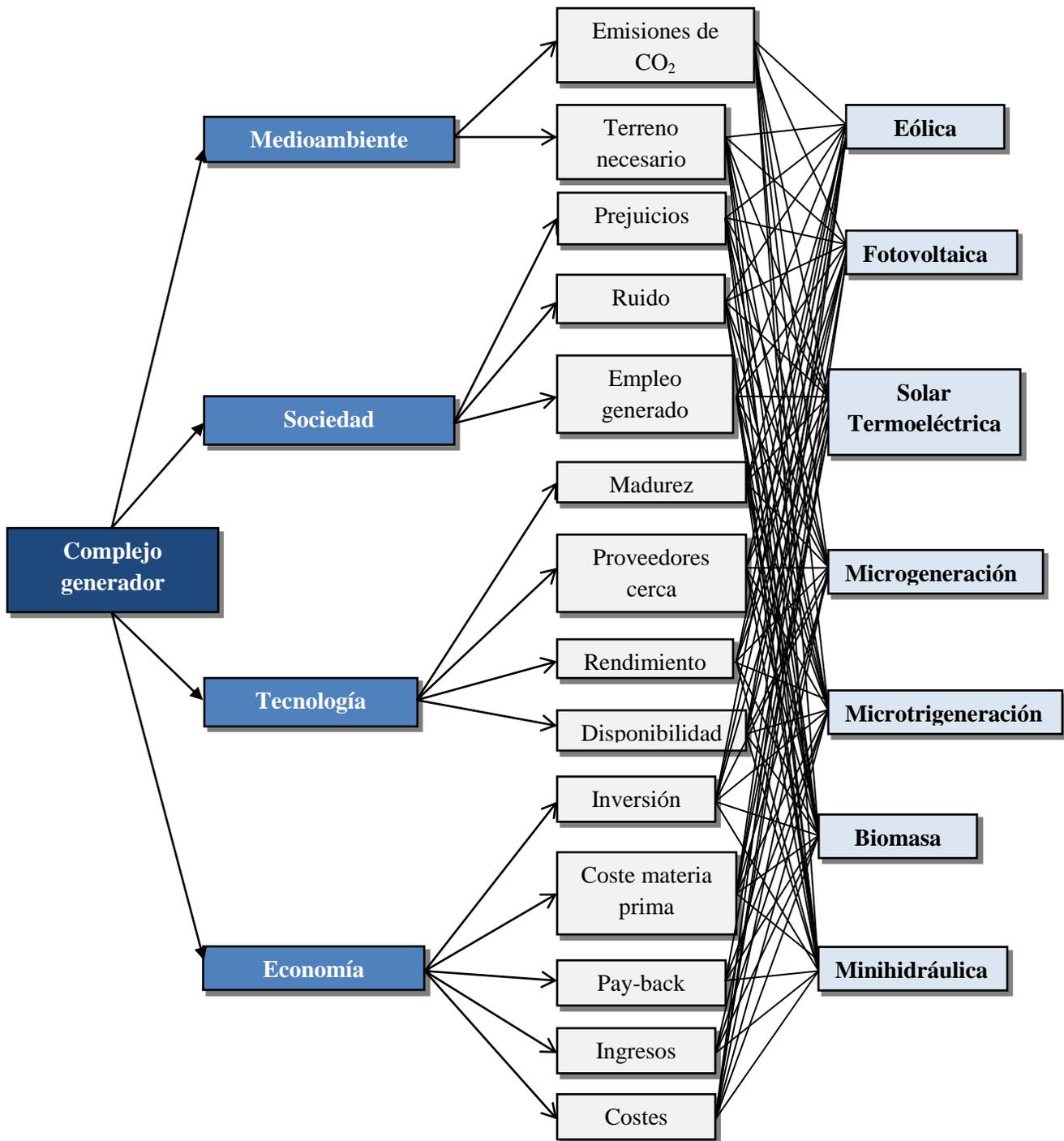


Figura 9.1. Modelo para la toma de decisiones. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas

La tabla de datos de la que partimos, es la obtenida por Carlos Baldasquín Cáceres [71], que se adjunta a continuación (la tabla 9.2), que como comentamos, se modificará aquellos valores que hayan sufrido variación en el tiempo, justificando los que cambian con respecto a los datos recogidos por Carlos, aquellos que no se justifiquen es porque no ha sufrido variación con los datos recogido por el compañero Carlos, y que ante cualquier duda de su obtención, se podrá consultar el PFC realizado por Carlos Baldasquín Cáceres [71]

Alternativas		Eólica	Solar	Solar	Micro-	Micro-	Biomasa	Mini-
Criterios		A <sub>1</sub>	Fotovoltaica	Termoeléctrica	Cogeneración	Trigeneración	A <sub>6</sub>	Hidráulica
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	24	138,5	29	257,41	257,41	35,8	11,93
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	350000	100.000	137.500	25	51	14.660	2·10 <sup>6</sup>
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	8,3	7,8	8,6	6,8	6,9	7,7	7,7
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	108,1	31,2	53	33,2	42	67,5	103
	Empleo generado C <sub>23</sub>	6	14	16	24	24	56	6
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	9,2	8,9	6,4	9,8	8,3	7,7	9
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	17	90	22	11	9	15	6
	Rendimiento C <sub>33</sub>	50	13	19	90	76	26	85
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	15,98	32,84	49,49	95,50	95,50	85,62	12,23
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	5,14	16	21,6	3,33	4	6	6,5
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	46,9552	46,9552	17,3770	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	8,36	10,29	11,08	4,42	5,11	9,46	4,16
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	7,9084	45,0886	29,0916	9,4341	9,4341	12,6897	8,4237
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	6,81	30	23,23	5,05	5,55	13,7	7,3

*Tabla 9.2 Datos recopilados por Carlos Baldasquín Cáceres [71]*

## 9.2. Medioambiente

De entre todas las consecuencias medioambientales que conllevaría el llevar a cabo el funcionamiento de las diversas opciones energéticas, elegimos como más significativas las emisiones de dióxido de carbono, estimadas mediante el análisis del ciclo de vida, en gramos por kilovatio-hora, y la ocupación de terrenos para llevar a cabo la actividad, medido en metros cuadrados.

### 9.2.1. Emisiones de CO<sub>2</sub>

Al público normalmente solo se le menciona el CO<sub>2</sub> en relación con el efecto invernadero (p.e. publicidad de vehículos), aunque realmente el gas más influyente en la atmósfera terrestre es el vapor de agua, con un 36-70% de contribución de forma general en la Tierra. Le siguen el dióxido de carbono (9-26%), el metano (4-9%), los óxidos de nitrógeno, el ozono (3-7%) y los clorofluorocarbonos.

Ahora bien, si hablamos del efecto invernadero antropogénico, es decir, la parte del efecto invernadero debida a gases emitidos por el ser humano, el dióxido de carbono sí se convierte en la principal fuente de modificación de la temperatura media. Por estas razones creemos más recomendable realizar el estudio únicamente con el CO<sub>2</sub> [83] [84].

Las emisiones directas en la generación de electricidad de las energías renovables no consumibles, como son la hidráulica, solar o la eólica, son nulas (ver tabla 9.2.). Por ello, en las publicaciones (como las del IDAE) cuando se citan las tecnologías del régimen especial, normalmente se habla de toneladas de emisiones evitadas, respecto de un “periodo de referencia”, un “escenario base”, o respecto de las que se generarían utilizando únicamente carbón, gas natural o éste en ciclo combinado. Esta indefinición en la información aportada no ofrece demasiadas garantías para un buen estudio.

ELECTRICIDAD									
TECNOLOGÍA	ENERGÍA FINAL		ENERGÍA PRIMARIA				FACTOR DE EMISIÓN		
			Bornas de central		En punto de consumo		En bornas de alternador (bruta)	En bornas de central (neta)	En punto de consumo
	MWh	tep	MWh	Tep	MWh	tep	tCO <sub>2</sub> /MWh	tCO <sub>2</sub> /MWh	tCO <sub>2</sub> /MWh
Hulla+ antracita	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	1,13	1,17	1,27
Lignito pardo	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,90	0,93	1,01
Lignito negro	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,97	1,00	1,09
Hulla importada	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,90	0,94	1,02
Nuclear	1	0,086	3,03	0,26	3,29	0,28	0	0	0
Ciclo Combinado	1	0,086	1,93	0,17	2,09	0,18	0,34	0,35	0,38
Hidroeléctrica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Cogeneración MCIA <sup>(3)</sup>	1	0,086	1,67	0,14	1,74	0,15	0,37	0,38	0,42
Cogeneración TG <sup>(4)</sup>	1	0,086	1,61	0,14	1,69	0,15	0,33	0,34	0,37
Cogeneración TV <sup>(6)</sup>	1	0,086	1,72	0,15	1,80	0,16	0,41	0,42	0,46
Cogeneración CC <sup>(6)</sup>	1	0,086	1,54	0,13	1,61	0,14	0,31	0,32	0,35
Eólica y fotovoltaica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Solar termoeléctrica	1	0,086	4,56	0,39	4,95	0,43	0	0	0
Biomasa eléctrica	1	0,086	4,88	0,42	5,29	0,46	0	0	0
Biogás	1	0,086	3,70	0,32	4,02	0,35	0	0	0
RSU	1	0,086	4,02	0,35	4,36	0,38	0,24	0,25	0,27
Centrales de fuelóleo	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,71	0,73	0,79
Gas siderúrgico	1	0,086	2,86	0,25	3,10	0,27	0,64	0,69	0,75
Energía Eléctrica General	1	0,086	0,17		0,18		0,23	0,23	0,25
			tep /MWh neto		tep /MWh		tCO <sub>2</sub> /MWh bruto	tCO <sub>2</sub> /MWh neto	tCO <sub>2</sub> /MWh final
			1,94		2,11		2,63	2,72	2,95
			MWh primario/MWh neto		MWh primario/MWh final		tCO <sub>2</sub> /tep bruto	tCO <sub>2</sub> /tep neto	tCO <sub>2</sub> /tep final

**Tabla 9.3. Factores de Emisión de CO<sub>2</sub> por las diferentes tecnologías [72]**

En cambio cuando consideramos todas las etapas de su existencia, es decir, extracción, producción, distribución, uso y desecho, todas las opciones emiten un cierto grado de CO<sub>2</sub>. Mediante la dimensión más amplia que nos ofrece el concepto de “huella de carbono” encontramos en la bibliografía datos que esta vez sí concuerdan de manera más exacta, aunque la dificultad de su estimación pudiera indicar lo contrario.

Entre las fuentes consultadas se encuentran la Agencia Internacional de la Energía, la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, REE, la Universidad Católica de Chile, el Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía

Social, la Universidad de Creta (Grecia) o la Universidad Nacional de Singapur, entre otras, obteniendo los siguientes valores medios recogidos en la tabla 9.4.

Mencionar que los datos eran similares entre las fuentes consultadas, salvo algunas que otorgaba cifras mayores pero concordaban las diferencias entre tecnologías. La única que sí encontramos datos dispares es para la fotovoltaica.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh)	24	138,5	29	11,93	35,18	257,41	257,41

**Tabla 9.4. Emisiones de CO<sub>2</sub> (g/kWh) [71]**

### 9.2.1.1. Micro-cogeneración y Micro-trigeneración

Vemos como la micro-cogeneración y la micro-trigeneración se sitúa como las dos tecnologías que más cantidad de este contaminante emiten por unidad de energía producida. Esto es debido a que utilizan gas natural, y en su combustión, como cualquier otro combustible fósil, origina diversas cantidades de gases contaminantes.

COMBUSTIBLES					
FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA <sup>(1)</sup>		FACTOR DE EMISIÓN <sup>(2)</sup>
	tep	Volumen específico	tep	MWh	tCO <sub>2</sub> /tep
Hulla	1	2,01 t	1,14	13,21	4,23
Lignito negro	1	3,14 t	1,14	13,21	4,16
Carbón para coque	1	1,45 t	1,14	13,26	4,40
Biomasa agrícola	1	3,34 t	1,25	14,53	neutro
Biomasa industria forestal	1	2,87 t	1,25	14,53	neutro
Coque de petróleo	1	1,29 t	1,42	16,49	4,12
Gas de coquerías	1	1,08 t	1,14	13,26	1,81
Gasóleo C	1	1.092 l	1,12	13,02	3,06
Fuelóleo	1	1.126 l	1,11	12,91	3,18
Gas Natural	1	910 Nm <sup>3</sup>	1,07	12,44	2,34
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21	2,72
Butano	1	1.670 l	1,05	12,21	2,72
Propano	1	1.748 l	1,05	12,21	2,67
Gas de refinería	1	0,85 t	1,12	13,07	2,30

**Tabla 9.5. Factores de Emisión de CO<sub>2</sub> por las diferentes fuentes de energía [72]**

No obstante, en el caso del gas natural, debido a la alta proporción de hidrógeno carbono de sus moléculas, sus emisiones de CO<sub>2</sub> son un 40-50% menor de las del carbón y un 25-30% menor de las del fuel-oíl. El componente principal del gas naturales el metano (80%) y aunque es un causante del efecto invernadero más potente que el dióxido de carbono, sus moléculas tienen un tiempo de vida en la atmósfera más corto.

### 9.2.1.2. Fotovoltaica

La siguiente en importancia, en nuestro estudio, resulta ser la solar fotovoltaica, y con unas cifras mucho más elevadas que el resto de las energías renovables. La explicación radica en que la producción de los módulos y del resto de componentes (marcos de

aluminio, inversores, etc.) que integran una instalación fotovoltaica, consume una considerable electricidad. En la medida en que el “mix” eléctrico está compuesto no sólo de renovables, sino también de centrales de gas, fuel y carbón, esa producción de módulos y componentes para instalaciones fotovoltaicas provoca, indirectamente, tales emisiones [85].

En la tabla 9.6 representamos las emisiones que se dan en la producción de los diferentes módulos fotovoltaicos, según un estudio realizado por la Comisión Europea.

Como se puede apreciar, los módulos de silicio mono cristalino son los que más emisiones generan, algo que se deriva de un uso de la electricidad mucho más intensivo.

Tipo de módulo	Emisiones en gCO <sub>2</sub> /kWh
Silicio policristalino	37
Silicio monocristalino	45
Capa fina (CdTe)	12-19

**Tabla 9.6. Emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de módulos [71]**

La fabricación del silicio purificado consta de tres pasos generales: Desoxidación del óxido de silicio o cuarcita (SiO<sub>2</sub>) en un horno de arco eléctrico, utilizando carbón o coque como elemento reductor, obteniéndose silicio bruto con una pureza del orden del 99%. Purificación del silicio y separación de las impurezas gasificando el silicio bruto y separando las impurezas en una torre de destilación generándose el triclorosilano (SiHCl<sub>3</sub>). Por último se obtiene gas silano ultra puro que se inyecta un reactor de lecho fluidizado para obtener así el silicio solar purificado.

A esto hay que añadir que, una vez fundido el silicio, se cristaliza a partir de una semilla, y según ésta es extraída, el silicio va solidificando resultando, si hay tiempo suficiente, un monocristal; en el caso del silicio policristalino se usa un horno de inducción electromagnética. Posteriormente se obtienen las obleas, cortando el lingote, con un espesor de las láminas entre 2-4 mm (hasta aquí ya se ha consumido entre el 60-80% de todo el ciclo de producción). Por último queda la fabricación del módulo, que consta de la preparación de la superficie, la formación de la unión PN, la formación de contactos metálicos y el interconexiónado, encapsulado, y fabricación.

Una alternativa más barata al silicio son los módulos de telurio de cadmio, si bien es altamente tóxico y menos eficiente [86] [87]. El resto de componentes emiten en su producción el equivalente a 6 gCO<sub>2</sub> e/kWh a lo largo del ciclo de vida de la instalación [87].

### **9.2.1.3. Energía eólica, termoeléctrica y mini-hidráulica**

En cambio para la energía eólica, suponiendo 2.400 horas equivalentes, el período de retorno energético (o “Pay-back”) es de unos 3 meses. Es decir, el aerogenerador genera unas 80 veces más energía de la que ha consumido a lo largo de su vida [88].

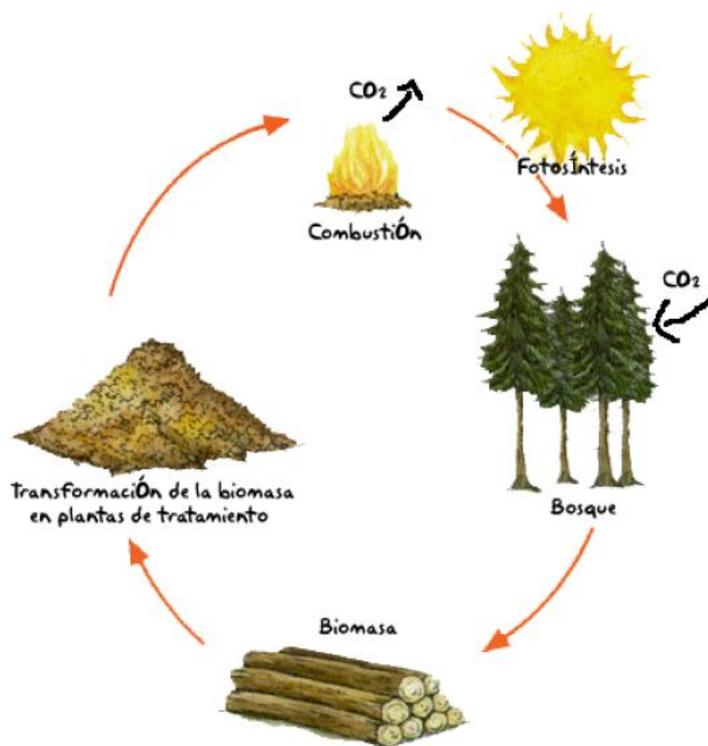
En el caso de la termoeléctrica se indica que cada m<sup>2</sup> de superficie de un campo solar

cilíndrico parabólico evita una emisión anual de 200 kg de dióxido de carbono. Además tiene una vida útil de 25 a 30 años y la mayoría de los materiales usados se pueden reciclar y reutilizar en otras centrales [89].

En cuanto a la mini-hidráulica los resultados son aún mejores, contaminando la mitad que estas dos últimas tecnologías.

#### 9.2.1.4. Biomasa y el ciclo neutro

Una cuestión que merece especial atención es la relacionada con la biomasa. Autores como Marland y Schlamadinger (1995), Leemans et al. (1996), Fernández (1997) o, más actualmente, Caparrós y Campos (2004), sostienen que el ciclo de emisiones de la biomasa está caracterizado por un factor de emisión nulo de CO<sub>2</sub> (ver figura 9.2.). Este resultado se deriva de la absorción, a lo largo del crecimiento de las masas forestales, de las cantidades de CO<sub>2</sub> que se emiten durante su combustión [90].



*Figura 9.2. Ciclo neutro en las emisiones de CO<sub>2</sub> de la biomasa*

Cuando se quema la biomasa forestal para la producción de energía se está produciendo una emisión de CO<sub>2</sub> pero, como ese contaminante ya había sido retenido anteriormente (fijación de carbono), el efecto en cuanto a emisión es nulo, no existiendo entonces en ese ciclo una fuente neta de contaminación. Carpintero (1999) estima que una hectárea de bosque captura 1,8 toneladas de CO<sub>2</sub> al año y Mingo (2002) estima 0,8 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de biomasa valorizada. Estos datos han de ser tomados como una simplificación, pues la capacidad de captura se ve influida por la edad de las masas

forestales y las condiciones climáticas [90].

Este hecho también sería válido para los cultivos energéticos, pues aunque tengan menor capacidad de captura hay que tener en cuenta que de no utilizarse para este fin, en esas tierras seguramente no habría vegetación.

Aun así le hemos otorgado un 35 g/kWh ya que las fuentes consultadas proponían un valor aún mayor, y aunque algunos autores manifiesten que el ciclo neutro también comprende el transporte y manipulación, no es la norma habitual.

### 9.2.2. Terreno necesario

Para asignar valores al terreno necesario se ha acudido preferentemente a centrales reales, asignando en la media un peso mucho mayor a aquéllas de potencias iguales o similares a nuestro caso (4 MW), asimismo se ha comprobado la similitud con datos de [2]. Las estimaciones finales son las de la tabla 9.7.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Superficie m <sup>2</sup>	350.000	100.000	137.500	2.000.000	14.660	25	51

*Tabla 9.7. Terreno necesario (m<sup>2</sup>) [71]*

## 9.3. Sociedad

### 9.3.1. Prejuicios

La aceptabilidad social de una tecnología afecta a asuntos muy amplios como la extracción o uso de los recursos naturales, el control de la energía, la percepción de riesgos naturales o de la naturaleza como tal. Una serie de trabajos (Ellis et al., 2007; Devine-Wright & Devine-Wright 2006; Haggett & Toke 2005; Woods, 2003) demuestra cómo las posiciones de los agentes sociales hacia el apoyo o rechazo de los proyectos del régimen especial no dependen solamente de la ausencia de sensibilidad hacia los beneficios ambientales de la energía renovable, del escepticismo sobre la tecnología o emplazamiento de proyectos específicos, sino que reflejan valores más profundos, contextos culturales e institucionales más amplios, y reivindican la objetividad y la verdad.

Por todo esto, conviene analizar por separado las cuestiones de la percepción social de las energías renovables en general y la problemática de apoyo o rechazo a proyectos específicos. La implantación de las energías renovables en España cuenta con una amplia base de apoyo social, político y sindical. El público general percibe esta tecnología como algo moderno y beneficioso, sobre todo en el nuevo contexto de la lucha contra el calentamiento global. Según los Euro barómetros sobre actitud de la población acerca de la energía de los años 2006 y 2007, un 90% de los españoles opinaban que las energías renovables deberían tener una cuota mínima de base en el “mix” de generación,

relacionándose estas tecnologías con las acepciones “limpio”, “sano”, “verde” o “sostenible” [91].

Para valorar las preferencias que la sociedad tiene hacia unas determinadas tecnologías y el rechazo hacia otras, hemos acudido a encuestas realizadas en varios estudios, ya que es la mejor forma de conocer su verdadera opinión. Los resultados obtenidos mediante el cotejo de los diversos estudios vienen reflejados en la tabla 9.8

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Valoración	8,3	7,8	8,6	7,7	7,7	6,8	6,9

**Tabla 9.8. Prejuicios (notas de 0 a 10 en aceptación) [71]**

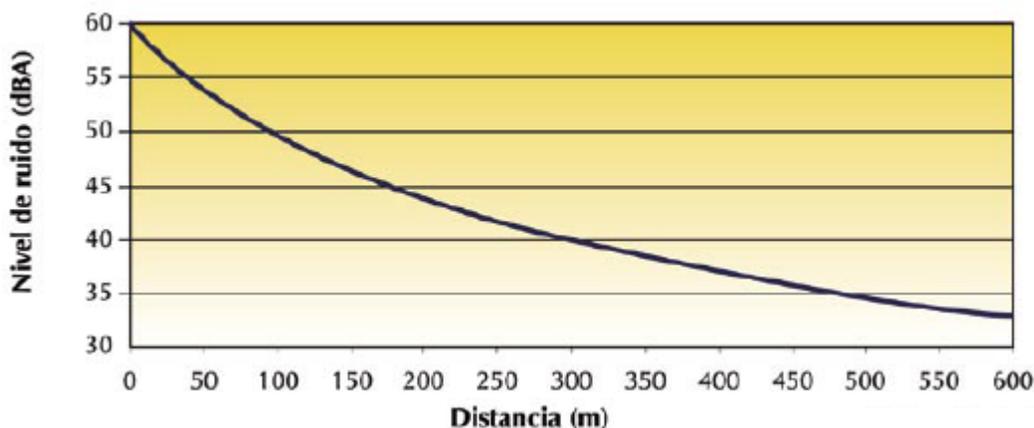
### 9.3.2. Ruido

Como necesitamos valores numéricos para aplicar los MDMC decidimos indicarla cantidad de dB que emiten las distintas instalaciones. De entre las opciones posibles valoramos indicar el ruido que directamente generan las partes más ruidosas de la tecnología, es decir, a 1 metro de ellas o bien a unos 300 ó 350 metros que es lo que de verdad afectará a la población y que, por ello, finalmente elegimos. Los datos a utilizar son los de la tabla 9.9.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Ruido (dB)	108,082	31,2	53	44,625	67,5	33,2	42

**Tabla 9.9. Ruido a 300-350 metros de distancia (dB) [71]**

El sonido no varía linealmente con la distancia, sino que lo hace como se expone en la figura 9.3, en donde un nivel de ruido de 60 dB en el origen se transforma en 50dB a 100 metros, a 40 en 300 y a 33 dB a 600 metros.



**Figura 9.3. Nivel de sonoro en función de la distancia**

Este hecho concuerda con los datos encontrados a un metro de distancia y que exponemos en la tabla 9.10.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Ruido (dB)	147,059	43,5	82	103	98	69,5	85

*Tabla 9.10. Ruido a 1 metro de distancia (dB) [71]*

### 9.3.3. Empleo generado

Este subcriterio ha sido el más difícil de responder, ya que no se dan datos claros sobre el empleo directo e indirecto de cada instalación. Siempre se menciona, a modo de propaganda, la gran cantidad de puestos de trabajo que generan las energías renovables, pero la mayoría de las veces son debidos al período de construcción y montaje. Hemos pensado que una fase que dura unos dos años como máximo, no es significativo para apoyar un proyecto u otro, sino que lo importante es saber las ocupaciones laborales durante el resto de la vida útil del parque o central. Aquí es donde surge el segundo problema, pues en la etapa de generación eléctrica se aluden solo los puestos en mantenimiento y operación, no el resto como suministro de gas o comercialización.

En resumen, los puestos permanentes que generaría la construcción del hipotético parque generador de 4 MW son los de la tabla 9.11.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Empleo directo e indirecto	6	14	16	6	56	24	24

*Tabla 9.11. Empleo generado directo e indirecto para la instalación de 4 MW [71]*

## 9.4. Tecnología

Para la elección de los subcriterios tecnológicos hemos tenido en cuenta los cuatro bloques esenciales que debe cumplir una determinada tecnología. Por una parte el grado de conocimiento, experiencia, seguridad o de fiabilidad que nos puede aportar cada una de ellas mediante la madurez; por otro la facilidad de suministro y la certidumbre de abastecimiento mediante la cantidad de proveedores cerca; el aprovechamiento o rentabilidad de los recursos, la productividad y utilidad de cada alternativa mediante el rendimiento; y por último las horas de funcionamiento o la cantidad de energía generada mediante la disponibilidad.

### 9.4.1. Madurez

Hay múltiples maneras de medir la madurez, como el número de empresas del sector, estudios de fiabilidad o viabilidad, años de existencia de la tecnología de entre las opciones nos decantamos por dos, en primer lugar pensamos en la media de edad de las empresas como podemos observar en la tabla 9.12.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Media edad de las empresas	5,2	5,4	4,7	12	5,1	17	4

**Tabla 9.12. Media de edad de las empresas (años) [71]**

Aunque ésta es una buena opción, finalmente nos decantamos por asignar una nota de 0 a 10 según éste y otros datos que explicamos a continuación.

#### **9.4.1.1. Antecedentes Micro-cogeneración**

Retribución a tarifa suficiente para rentabilidad razonable (3T 2011) [73]:

•  $P \leq 0,5$  MW: 15,36 c€/kWh (gn) - 19,53 c€/kWh (glp)

•  $0,5 \leq P \leq 1$  MW: 12,16 c€/kWh (gn) -16,62 c€/kWh (glp)

Tecnología madura, experimentada y con numerosos ejemplos en funcionamiento obteniendo definitivamente las calificaciones de la tabla 9.13.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Puntuación de 1 a 10	9,2	8,9	6,4	9	7,7	9,8	8,3

**Tabla 9.13. Puntuación del grado de madurez [71]**

#### **9.4.2. Proveedores cercanos**

La búsqueda para este subcriterio es complicada de filtrar. Se pensó principalmente en dos formas de aportar los datos, mencionar el número de empresas murcianas de cada sector, indicado en la tabla 9.14, y el número de compañías que operan u ofrecen servicio en Murcia (ver tabla 9.15.). Se eligió la primera opción, ya que, sobre todo, a la hora de pedir ayudas a la Comunidad siempre es recomendable pactar el suministro con empresas de la Región de Murcia, además es difícil ofrecer datos fiables sobre la segunda opción, pues aunque no esté especificado, debido a la facilidad de transporte y a que las distancias “se acortan” en los tiempos actuales cualquier empresa podría ofertarnos sus productos.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Empresas murcianas	17	90	22	6	15	11	9

**Tabla 9.14. Proveedores murcianos [71]**

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Empresas que operan en Murcia	46	232	43	27	76	21	19

**Tabla 9.15. Proveedores cerca [71]**

Para llegar a estos números se ha consultado básicamente el Directorio de Empresas de Energías Renovables del IDAE así como a su directorio de Empresas de Servicios Energéticos (ESE) [92].

También se ha consultado la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) del Instituto Nacional de Estadística, aunque la última revisión se realizó el 1 de enero de 2009 [93].

Y por último se han revisado diversas páginas de buscadores de empresas de la gran multitud que existen por la red.

### 9.4.3. Rendimiento de la Instalación

Debido a que el rendimiento es un dato muy fácil de encontrar, contrastado y que en los propios catálogos viene especificado, no vamos a mencionar todas las fuentes ni ejemplos, aunque igualmente se ha contrastado mirando casos reales. (Tabla 9.16).

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Rendimiento %	50	13	19	85	26	90	76

**Tabla 9.16. Rendimiento de las instalaciones (%) [71]**

### 9.4.4. Disponibilidad de recursos

Para hallar la disponibilidad u horas de funcionamiento de cada tecnología hemos tenido que realizar estudios de la zona donde se pretende ubicar el parque generador y, en algunos, casos hemos consultado ejemplos. (Ver tabla 9.17).

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoelectrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Disponibilidad %	5,98	32,84	49,49	12,23	85,62	95,5	95,5

**Tabla 9.17. Disponibilidad de los recursos (%) [71]**

## 9.5. Economía

Para la elección de los subcriterios económicos hemos seleccionado los más influyentes, tanto al comienzo del proyecto como es la inversión inicial y que puede echar para atrás a alguna tecnología por sobrepasar el límite establecido, así como el Pay-back o período de amortización de dicha inversión, como también los costes durante todo el período de funcionamiento como son el coste de la materia prima y los costes de generación, y los beneficios o ingresos por unidad de energía.

**En resumen, de los datos de referencia [71], se modifico, actualizando los datos que se indican en la tabla 9.18 que se presenta a continuación.**

Alternativas		Eólica	Solar Fotovoltaica	Solar Termoelectrica	Micro-Cogeneración	Micro-Trigeneración	Biomasa	Mini-Hidraulica
Criterios		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	aA <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	24	138,5	29	257,41	257,41	35,8	11,93
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	350000	100.000	137.500	25	51	14.660	2·10 <sup>6</sup>
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	8,3	7,8	8,6	6,8	6,9	7,7	7,7
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	108,1	31,2	53	33,2	42	67,5	103
	Empleo generado C <sub>23</sub>	6	14	16	24	24	56	6
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	9,2	8,9	6,4	9,8	8,3	7,7	9
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	17	90	22	11	9	15	6
	Rendimiento C <sub>33</sub>	50	13	19	90	76	26	85
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	15,98	32,84	49,49	95,50	95,50	85,62	12,23
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	5,14	16	21,6	3,33	4	6	6,5
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	49,9125	49,9125	17,3770	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	8,36	10,29	11,08	4,42	5,11	9,46	4,16
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	8,1270	46,3348	29,8957	11,0864	11,0864	13,0404	8,6565
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	6,81	30	23,23	5,05	5,55	13,7	7,3

**Tabla 9.18.**

Aunque los que realmente sufren modificación, son los criterios y subcriterios que engloba el criterio Economía.

Hay que resaltar que el nuevo Real Decreto aprobado en Enero de 2012, solo les afecta a las empresas que comiencen su estudio de implantación este año, las que se pongan en marcha este año pero tuviera aprobado el proyecto antes de que llegase el nuevo Real Decreto, no se le aplicara éste.

Por este motivo, no veremos la repercusión de la reforma en el sector energético hasta que no pasen un par de años. Es ahí donde podremos visualizar sus efectos en las instalaciones y en la producción.

### 9.5.1. Formulación a considerar

#### Estudio económico de la planta de cogeneración. Cálculo del VAN [72]

El Valor Actualizado Neto es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual -que se actualiza mediante una tasa- todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial y los costes que durante el futuro se originen, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

En nuestro caso, el flujo de caja es el ahorro anual en el aprovisionamiento energético (€), definido como:

$$A = \text{coste inicial del aprovisionamiento} - (\text{coste final} - \text{ingresos por venta de electricidad})$$

Donde;

$$\begin{aligned} \text{Coste inicial del aprovisionamiento} &= E + F_{\text{cald}} \\ \text{Coste final} &= F_{\text{cc}} + F_{\text{cald}} + E \end{aligned}$$

Los costes que se originan durante el proyecto consideraremos que son exclusivamente los costes de mantenimiento del motor (€), que evaluaremos de forma intensiva como:

$$M = 1 \frac{c\text{€}}{kWh_e}$$

La inversión inicial será el coste del motor o motores de cogeneración y el coste de las calderas de apoyo, en su caso:

$$I_0 = \text{coste motor} + \text{coste caldera apoyo}$$

Las tasas con las que trabajaremos (en '*tanto por uno*') son:

'*e*', **interés del capital**: consideraremos el EURIBOR actual, que indica el tipo de interés promedio al que las entidades financieras se prestan dinero en el mercado interbancario del

euro.

**'i', inflación:** es el incremento generalizado de los precios de bienes y servicios con relación a una moneda durante un período de tiempo determinado. Tomaremos la inflación anual del periodo Septiembre 2010 - Septiembre 2011.

**'k', tasa de actualización:** es una tasa que define cómo se devalúa el dinero en el futuro. Está compuesta por el interés del capital 'e' y la inflación 'i', y se calcula como

$$k = e + i \cdot (1 + e) + r$$

**'r', prima de riesgo:** en nuestro caso tomaremos  $r=0$ .

**'c', inflación de la energía:** es un valor promedio que utilizaremos para cuantificar el incremento anual de los precios del gas natural y de la electricidad. Tomaremos el valor  $c=12\%$

**'m', inflación del mantenimiento:** es un índice que estima el aumento del precio de los gastos de mantenimiento del motor (mano de obra y repuestos). Tomaremos  $m=3\%$

A partir de estas definiciones, podemos calcular el VAN en el año 'n' como:

$$VAN(n) = -I_0 + A \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+c}{1+k} \right)^j - M \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+m}{1+k} \right)^j$$

Donde;

$$\text{Flujo de caja} = A \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+c}{1+k} \right)^j$$

$$\text{Mantenimiento} = M \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+m}{1+k} \right)^j$$

Los sumatorios que calculan el flujo de caja y el coste de mantenimiento actualizados al valor actual se pueden aproximar mediante una única progresión:

$$VAN(n) = -I_0 + A \left[ \frac{\left( \frac{1+c}{1+k} \right)^n - 1}{\left( \frac{1+c}{1+k} \right) - 1} \right] - M \left[ \frac{\left( \frac{1+m}{1+k} \right)^n - 1}{\left( \frac{1+m}{1+k} \right) - 1} \right]$$

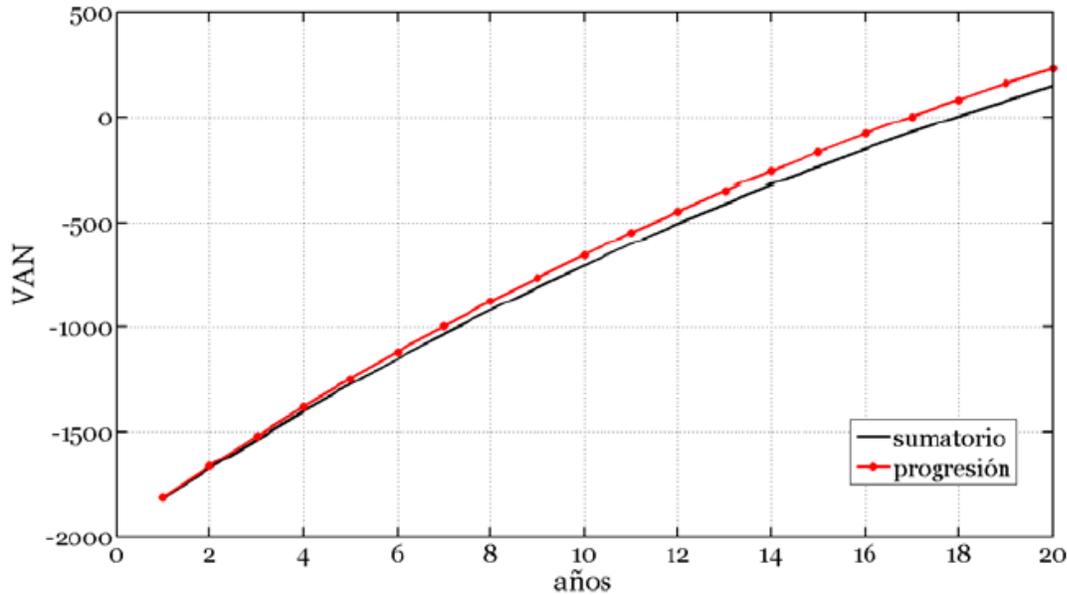
Donde;

$$\text{Flujo de caja} = A \left[ \frac{\left( \frac{1+c}{1+k} \right)^n - 1}{\left( \frac{1+c}{1+k} \right) - 1} \right]$$

$$\text{Mantenimiento} = M \left[ \frac{\left(\frac{1+m}{1+k}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+m}{1+k}\right) - 1} \right]$$

La primera ecuación del VAN, es más precisa que la segunda, aunque en esta práctica se podrá usar cualquiera de las dos sin perjuicio de la valoración del apartado.

En la figura se muestra la comparación entre los dos cálculos.



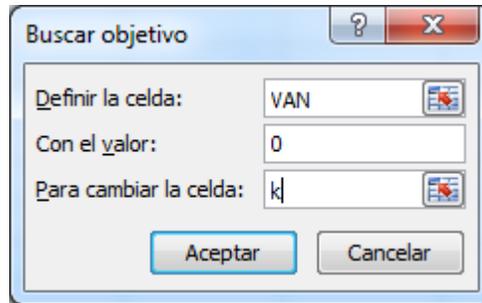
**Figura 9.4. Evolución del VAN [72]**

### Cálculo del TIR

La *Tasa Interna de Retorno (TIR)* en el año 'n' posterior a la puesta en funcionamiento de la instalación es el valor de la tasa de actualización (*k*) que haría nuestro VAN en ese año cero. Es decir, es el valor de la tasa de actualización para el cual retornaría la inversión inicial en el periodo 'n'.

Para calcular el TIR usaremos las ecuaciones anteriores, igualando VAN=0 en un año determinado y despejando el valor de *k* (al que en este caso llamaremos TIR).

La solución de esta ecuación se puede obtener de forma iterativa usando Excel. En la versión 2007, se usaría la herramienta '*Datos/Análisis Y Si/Buscar Objetivo*':



Si  $TIR > k$ , la inversión  $I_0$  se puede considerar rentable en el periodo calculado.

### 9.5.2. Inversión Inicial

Para este subcriterio hemos partido del estudio previo realizado por [1], que nos ha parecido muy exhaustivo y veraz, por lo que como veremos no variará mucho sus datos, aun así hemos revisado muchas instalaciones obteniendo la tabla 9.19.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Inversión M€	5,14	16	21,6	6,5	6	3,33	4

*Tabla 9.19. Inversión inicial (Millones de euros) [71]*

### 9.5.3. Coste de la materia prima

Los mayores beneficios de las energías renovables son precisamente el no necesitar el uso de combustible fósil, ni de cualquier otro que deba comprarse, salvo la biomasa, las demás utilizan fuentes de energía “gratuitas” y únicamente se deriva el gasto de capital en tratar de aprovechar dichos vectores energéticos.

En la tabla 9.20 tenemos el coste de la biomasa empleada en nuestra hipotética instalación, calculada a través de precios actualizados de diversas formas de aprovechamiento existentes en la Región de Murcia y mediante la proporción más adecuada según la zona concreta de la ubicación de la central, y que a continuación expondremos dicho estudio. También disponemos de los precios del gas natural por unidad de energía producida [71].

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Coste materia prima (€/MWh)	0	0	0	0	17,3770	49,91254	49,91254

*Tabla 9.20. Coste de la materia prima (€/MWh)*

### 9.5.3.1. Micro-cogeneración y Micro-trigeneración

Vamos a tomar el mismo consumo de gas natural con la micro-cogeneración y a la micro-trigeneración, y por tanto el coste del gas natural, aunque no sea exactamente el mismo, al no ser los rendimientos iguales, pero este aspecto ya ha sido tenido en cuenta en otro subcriterio y no debemos calificarlo dos veces.

El consumo real de gas natural ( $F_{CHP}$ ) de la micro-cogeneración, considerando que todo el calor es de cogeneración ( $H_{CHP}$ ), y que la disponibilidad de la planta es del 95,5%, es decir 8365,8 horas anuales, está dado por;

$$\eta_{global} = \frac{E + H_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{(4 + 3,6)}{F_{CHP}} MW \cdot 8365,8h = 0,9 \Rightarrow F_{CHP} = 70.644,533MWh$$

Como hemos comentado no debemos tener en cuenta el rendimiento, al igual que se ha hecho con la biomasa; tampoco incluir el gasto que conlleva el calor generado, pues convertimos una gran ventaja de esta tecnología, esto es, un ahorro global de combustible frente a un aumento neto de consumo.

Debemos comprar mayor volumen de gas para el proceso, pero menor que si el calor fuera generado por separado mediante, por ejemplo, una caldera; más aún si el frío fuera obtenido mediante máquinas de compresión eléctrica, al ser la electricidad más cara que el gas.

La energía a facturar será por tanto únicamente la eléctrica. Los precios del gas natural según la Resolución de 28 de abril de 2012, de la Dirección General de Política Energética y Minas son los de la tabla 9.21, y los del alquiler de contadores los de la tabla 9.22.

Tarifa	Término	
	Fijo (€/Cliente)/mes	Variable c€/kWh
T.1. Consumo inferior o igual a 5.000 kWh/año...	4,35	5,795
T.2. Consumo superior a 5.000 kWh/año e inferior o igual a 50.000 kWh/año .....	8,99	5,130
T.3. Consumo superior a 50.000 kWh/año e inferior o igual a 100.000 kWh/año .....	58,49	4,529
T.4. Consumo superior a 100.000 kWh/año .....	175,92	4,229

**Tabla 9.21. Tarifas del gas natural a 28 de abril de 2012 [74]**

Caudal del contador (m <sup>3</sup> /h)	Tarifas del alquiler
Hasta 3 m <sup>3</sup> /hora	0,67 €/mes
Hasta 6 m <sup>3</sup> /hora	1,22 €/mes
Superior a 6 m <sup>3</sup> /hora, % por 1.000 del valor medio del contador que se fija a continuación.	12,5 por 1.000 del valor medio del contador que se fija a continuación/mes

Caudal del contador (m <sup>3</sup> /h)	Valor medio del contador €
Hasta 10	205,83
Hasta 25	378,84
Hasta 40	734,71
Hasta 65	1.500,90
Hasta 100	2.031,91
Hasta 160	3.187,11
Hasta 250	6.745,02

**Tabla 9.22. Tarifas de alquiler de los contadores de gas [75]**

$$\text{Energía} = 4\text{MW} \cdot 8365,8 \text{ h} = 33463,2 \text{ MWh}_{\text{PCI}}$$

$$\text{Propiedades gas natural: PCS} = 41791 \text{ kJ/m}^3(\text{n}); \text{PCI} = 37393 \text{ kJ/m}^3(\text{n})$$

$$\text{Energía} = 33288 \text{ MWh}_{\text{PCI}} \cdot \text{PCS}/\text{PCI} = 37.398,99423 \text{ MWh}_{\text{PCS}}$$

Más de 100.000 kWh/año: Tarifa 3.4.

$$T_f = 175,92 \text{ €/cliente} \cdot \text{mes} = 175,92 \text{ (€/cliente} \cdot \text{mes)} \cdot 12 \text{ meses/año} = 2111,04 \text{ €/año}$$

$$T_v = 4,2292 \text{ c€/kWh} \cdot 37.398,99423 \cdot 1000 \text{ MWh/kWh} = 1,5816782 \text{ M €}$$

$$T_v = 42,29877 \text{ €/MWh}$$

$$Q = P_n/\text{PCI} = 4000 \text{ (kJ/s)}/0,9 \cdot 37393 \text{ kJ/m}^3 = 0,118857659 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 3600 \text{ s/h} = 427,8875725 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Contador: } (12,5/1000) \cdot 6745,02 \text{ €/mes} \cdot 12 \text{ meses/año} = 1011,753 \text{ €/año}$$

$$\text{El gasto anual por gas natural es de: } 1,4952944 \cdot 106 + 976,914 + 1928,28 = 1,4882$$

$$\text{El coste por MWh al año será: } 1,5816782/37.398,99423 = \mathbf{42,29877 \text{ €/MWh}}$$

Teniendo en cuenta los impuestos (I.V.A) (al igual que con la biomasa) este coste asciende a:  $1,18 \cdot 42,29877 = 49,91254 \text{ €/MWh}$

#### 9.5.4. Periodo de retorno de la inversión (Pay-back)

El periodo de retorno de la inversión (Pay-back) es un dato fundamental para la empresa que invierte el capital. La recuperación de la inversión es un valor indicativo del tipo de proyecto que se realiza y constituye uno de los principales criterios para decidir si el proyecto se llevará a cabo o no.

Esta vez no se cuenta con demasiados ejemplos reales, ya que los datos económicos son menos expuestos al público y más aún durante la operación de las plantas, ya que las noticias suelen lanzarse con la instalación. En su mayoría hemos acudido a estudios previos realizados o teóricos generalizados, por ello no nos parece muy interesante, como en las anteriores ocasiones descifrar todas las fuentes y solo comentaremos algunos hechos relevantes. Los valores elegidos son los de la tabla 9.23.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Pay-back (años)	8,36	10,29	11,08	4,16	9,46	4,42	5,11

*Tabla 9.23. Periodos de retorno de las inversiones en años [71]*

El Pay-back varía mucho dependiendo del año a partir del cual se calcule, de los costes de generación, es extremadamente sensible al precio de venta de energía, es muy sensible a las horas de funcionamiento y producción, precios de la materia prima, impuestos, la vida útil de la instalación, de la inversión inicial junto con su forma de pago al tipo de interés del préstamo y a la duración del mismo, es menos sensible a la inflación (si no se supera el 4%) y al período de amortización fiscal hasta de si se ha establecido un buen plan de negocio económico-financiero o no.

Las cifras varían enormemente, por lo dicho anteriormente, entre unas fuentes y otras, incluso para proyectos muy similares, aunque debido a la gran recopilación de datos la solución final adoptada es coherente con la realidad. Realmente se debe calcular para la condición particular de nuestro proyecto (velocidad del viento, horas de sol, potencia...) pero se escapa de lo pretendido en el proyecto, ya que lo importante es encontrar las diferencias entre las tecnologías, no valores totalmente exactos.

En la figura 9.5 podemos observar la importancia de incentivar las energías renovables por parte de las Administraciones (Central, Autonómica o Local), ya que favorecería la rentabilidad de las instalaciones aumentando su TIR y reduciendo su periodo de amortización. En este caso se trata de la solar térmica para Murcia, donde también se observa la dependencia con la superficie ocupada. Así para una superficie instalada de  $15 \text{ m}^2$  se amortizaría la instalación con un 70% subvencionado solamente en 4 años, mientras

que sin disponer de ninguna ayuda se amortizaría en más de 10, resultado de la situación actual.

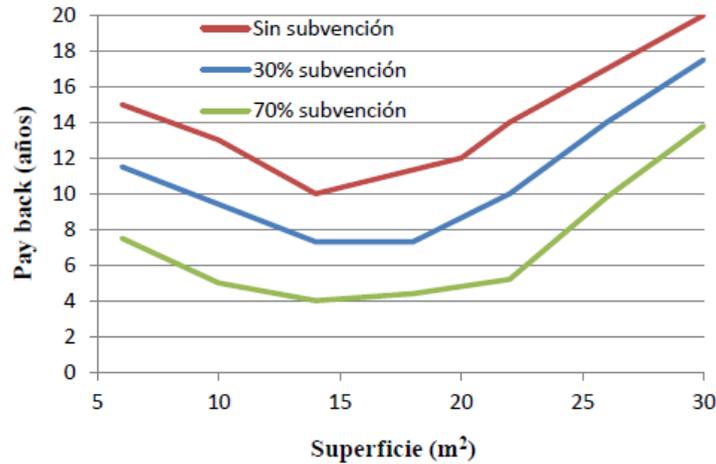


Figura 9.5. Periodo de amortización de la fotovoltaica según el grado de subvención.

#### 9.5.4.1. Las energías renovables se quedan sin primas: ¿Cómo nos afecta?

El Gobierno ha suspendido las primas para las nuevas instalaciones renovables, unas ayudas que permitían a sus productores vender su energía a precios más competitivos. Los responsables del Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MINETUR) sostienen que la medida es positiva para los consumidores y no impedirá cumplir el compromiso con la Unión Europea de desarrollar estos sistemas. Desde el sector de las energías renovables creen sin embargo que afectará de forma negativa a los consumidores, la economía, el empleo y el medio ambiente. [76]

#### 9.5.4.2. ¿Por qué se suspenden las primas a las energías renovables?

El **Real Decreto Ley 1/2012** suspende "de forma temporal" las primas de nuevas instalaciones de régimen especial, la mayoría energías renovables. Estas primas suponen en la práctica una ayuda económica, proveniente de la factura eléctrica pagada por los consumidores, para vender la energía producida de forma más competitiva. Su objetivo es apoyar el desarrollo de las renovables por sus ventajas para el medio ambiente y la economía del país.

Sin embargo, el Gobierno ha aprobado esta ley por dos motivos principales: la crisis económica (incluido el descenso del consumo eléctrico), y la necesidad de contener el déficit de tarifa (abajo se explica qué es), "que amenaza la sostenibilidad del sistema eléctrico". [76]

#### 9.5.5. Ingresos

De las dos posibilidades que tenemos para vender la electricidad, es decir, acudir al

mercado percibiendo una prima de referencia para cada tecnología o ceder la energía eléctrica a una distribuidora a cambio de una tarifa regulada, elegimos la segunda opción, aunque ambas son igualmente válidas. En definitiva nos muestran similares diferencias entre alternativas. Las tarifas a aplicar son las de la tabla 9.24.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Tarifa regulada (c€/kWh)	8,1270	46,3348	29,8957	8,6565	13,0404	11,0864	11,0864

**Tabla 9.24. Tarifas reguladas por Tecnología**

**NOTA:** Las tarifas reguladas de la tabla 9.22, corresponden al primer trimestre de 2012, aunque en el apartado de la micro-cogeneración y micro-trigeneración, se comentan los precios de gas natural, como combustible empleado, para el segundo trimestre de 2012, para tener una idea de la variación de los precios, después de la entrada en vigor del Real Decreto ley 1/2012.

Así que utilizamos los datos del primer trimestre, por no tener la información de tarifas reguladas para las energías renovables, y hacer una comparación en la misma línea del tiempo.

### 9.5.5.1. Micro-cogeneración y Micro-trigeneración

Tarifas y primas de aplicación a partir del 1 de enero de 2012 para las instalaciones de categoría a) cogeneración y energías residuales.

En nuestro caso de estudio, la potencia a instalar es de 4 MW, y utilizaremos gas natural como combustible, así que la tarifa regulada para Micro-cogeneración y Micro-trigeneración, es de 11,0864 c€/kWh, como vemos en la tabla 9.25.

Grupo	Subgrupo	Combustible	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh
a.1	a.1.1		P≤0,5 MW		16,6694	-
			0,5<P≤1 MW		13,6787	-
			1<P≤10 MW		11,0864	4,6420
			10<P≤25 MW		10,5615	3,8437
			25<P≤50 MW		10,0893	3,4454
	a.1.2	Gasóleo / GLP	P≤0,5 MW		20,1286	-
			0,5<P≤1 MW		17,1296	-
			1<P≤10 MW		15,0069	7,9803
			10<P≤25 MW		14,6626	7,3271
			25<P≤50 MW		14,2216	6,7372
		Fuel	0,5<P≤1 MW		15,5791	-
			1<P≤10 MW		13,6016	6,6294
		10<P≤25 MW		13,2450	5,9626	
		25<P≤50 MW		12,8361	5,4007	

**Tabla 9.25. Tarifas y primas para cogeneración [77]**

## Tarifas y primas para el 2º trimestre de 2012

El borrador de Orden para tarifas y primas 2T 012 así como la actualización de las mismas respecto a las publicadas en diciembre para el 1T 012. Los valores para este 2º trimestre son:

	Tarifa			Prima		
	1T 2012	2T 2012	Variación	1T 2012	2T 2012	Variación
GAS NATURAL	16,6694	16,8961	1,36%	-	-	-
	13,6787	13,8647	1,36%	-	-	-
	11,0864	11,2404	1,39%	4,6420	4,7065	1,39%
	10,5615	10,7089	1,40%	3,8437	3,8974	1,40%
	10,0893	10,2309	1,40%	3,4454	3,4938	1,40%
FUEL	15,5791	15,9323	2,27%	-	-	-
	13,6016	13,9369	2,47%	6,6294	6,7928	2,46%
	13,2450	13,5763	2,50%	5,9626	6,1118	2,50%
	12,8361	13,1639	2,55%	5,4007	5,5386	2,55%
GASOIL	20,1286	20,5969	2,33%	-	-	-
	17,1296	17,5281	2,33%	-	-	-
	15,0069	15,3838	2,51%	7,9803	8,1807	2,51%
	14,6626	15,0358	2,55%	7,3271	7,5136	2,55%
	14,2216	14,5889	2,58%	6,7372	6,9112	2,58%
PURINES DT 2ª	14,5233	14,7208	1,36%			
	14,5233	14,7208	1,36%			
	15,0644	15,2736	1,39%			
	15,1559	15,3675	1,40%			
	15,2944	15,5091	1,40%			

*Tabla 9.26. Tarifas y primas para el 2º trimestre de 2012. [78]*

Por lo que parece, las tarifas subirán un 1,4% para instalaciones de cogeneración a gas y plantas de purines, mientras que para las plantas de fuel y gasoil esta subida oscilará entre el 2,3% y el 2,6%. Las Primas suben un 1,4% para gas natural, y alrededor de un 2,5% para fuel y gasoil.

Aparte y como tema nuevo se incluye el pago al operador del sistema (a partir del 1 de Junio) de una cantidad mensual de 23,52 €/MW por potencia instalada, con un factor de disponibilidad que varía según combustible. [78]

### 9.5.5.2. Energías renovables

Tarifas, primas y límites de aplicación a partir del 1 de enero de 2012, para las instalaciones de la categoría b) del artículo 2 del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo [79].

Para nuestro caso de estudio, se trata de una potencia instalada de 4MW de potencia,

tenemos las siguientes tarifas por tecnología aplicada, (ver tabla 9.27);

b.1.1. Solar fotovoltaica → Tarifa regulada de 46,3348 c€/kWh

b.1.2. Solar termoeléctrica → Tarifa regulada de 29,8957 c€/kWh

b.2.1. Eólica → Tarifa regulada de 8,1270 c€/kWh

b.4. Mini-hidráulica → Tarifa regulada de 8,6565 c€/kWh

b.6.1. Biomasa → Tarifa regulada de 13,0404 c€/kWh

Una apreciación importante es que, debido a la distribución de la biomasa escogida, la tarifa debida a esta tecnología será un compendio de diferentes subgrupos, así será un 20% de b.6.1, un 60% de b.6.2 y un 20% de b.6.3.

Tarifa regulada biomasa =  $16,2689 \cdot 0,2 + 11,9350 \cdot 0,6 + 13,1285 \cdot 0,2 = 13,0404$  c€/kWh

Grupo	Subgrupo	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh	Límite Superior c€/kWh	Límite Inferior c€/kWh
b.1	b.1.1	P≤100 kW	primeros 30 años	48,8743			
		100 kW<P≤10 MW	primeros 30 años	46,3348			
		10<P≤50 MW	primeros 30 años	25,4997			
b.1	b.1.2		primeros 25 años	29,8957	28,1894	38,1751	28,1936
			a partir de entonces	23,9164	22,5515		
b.2	b.2.1		primeros 20 años	8,1270	2,0142	9,4273	7,9103
			a partir de entonces	6,7921			
	b.2.2*				9,3557	18,2009	
b.3			primeros 20 años	7,6467	4,2667		
			a partir de entonces	7,2249	3,3960		
b.4			primeros 25 años	8,6565	2,7795	9,4557	7,2360
			a partir de entonces	7,7909	1,4920		
b.5			primeros 25 años	**	2,3355	8,8785	6,7921
			a partir de entonces	***	1,4920		
b.6	b.6.1	P≤2 MW	primeros 15 años	17,6339	13,2937	18,4563	17,1023
			a partir de entonces	13,0882			
		2 MW < P	primeros 15 años	16,2689	11,7033	16,7471	15,8371
			a partir de entonces	13,7030			
	b.6.2	P≤2 MW	primeros 15 años	13,9515	9,6113	14,7717	13,4177
			a partir de entonces	9,4060			
		2 MW < P	primeros 15 años	11,9350	7,3694	12,4189	11,5188
			a partir de entonces	8,9519			
b.6.3	P≤2 MW	primeros 15 años	13,9515	9,6113	14,7717	13,4177	
		a partir de entonces	9,4060				
	2 MW < P	primeros 15 años	13,1285	8,5636	13,6064	12,6963	
		a partir de entonces	8,9519				

Tabla 9.27. Tarifas y primas para energía renovables [79]

Donde los subgrupos son los siguientes:

-Subgrupo b.1.1. Instalaciones que únicamente utilicen la radiación solar como energía primaria mediante la tecnología fotovoltaica.

- Subgrupo b.1.2. Instalaciones que utilicen únicamente procesos térmicos para la transformación de la energía solar, como energía primaria, en electricidad.

-Subgrupo b.2.1. Instalaciones eólicas ubicadas en tierra.

-Grupo b.4. Centrales hidroeléctricas cuya potencia instalada no sea superior a 10 MW.

-Subgrupo b.6.1. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de cultivos energéticos. 20%

- Subgrupo b.6.2. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de residuos de las actividades agrícolas o de jardinerías. 60%

- Subgrupo b.6.3. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de residuos de aprovechamientos forestales y otras operaciones silvícolas en las masas forestales y espacios verdes. 20%

### **9.5.5.3. ¿Cómo afecta la suspensión de las primas?. “El déficit de tarifa podría superar los 28.500 millones de euros”**

A los consumidores: según Emilio Jarillo, responsable de comunicación del MINETUR, la motivación última de esta moratoria es la defensa de los consumidores. "Su principal objetivo es que deje de aumentar el déficit tarifario, en cuyo crecimiento tienen que ver, en un porcentaje muy alto, las primas a las renovables, que las pagamos entre todos los consumidores." Además, desde el Ministerio insisten en que no se pone en riesgo el suministro eléctrico.

Desde el sector de las renovables consideran que esta medida frena su avance y por ello perjudica a los consumidores. Sergio de Otto, patrono de la Fundación Renovables, considera una "falacia" achacar a las renovables la subida de la factura eléctrica, porque no tiene en cuenta sus efectos positivos o su retorno socioeconómico. Para ello se basa en dos aspectos: por un lado, un estudio de la Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA), que señala que entre 2005 y 2010 las renovables supusieron un ahorro neto al sistema de 9.173 millones de euros. Por otro lado, el Plan de Energías Renovables (PER) del Gobierno, de cuyos datos deduce que a medio y largo plazo el petróleo, gas y carbón costarán al consumidor español diez veces más que las renovables. Según De Otto, la medida contribuirá a aumentar el consumo de estos combustibles fósiles, producirá más contaminación y un mayor gasto para el país y los consumidores.

A la economía y al empleo: las empresas aseguran que en la práctica destruirá puestos de trabajo y frenará a un sector cada vez más importante para la economía española, muy

dependiente de la energía del exterior. Desde la Fundación Renovables recuerdan que el sector da trabajo a 180.000 personas y prevé generar 300.000 puestos hasta 2020, según el PER. Ahora bien, la medida no afecta a todas las energías por igual. Según datos de las empresas, se han quedado fuera 4.500 megavatios (MW) eólicos y 550 MW fotovoltaicos. Las tecnologías menos maduras, como la geotérmica, la eólica marina, del oleaje o la mareomotriz, son las más afectadas. Por su parte, el PER señala unos 13.000 MW previstos para instalar entre 2015 y 2020 que quedan ahora también sin una retribución clara, a expensas de que dicha medida temporal se anule.

Emilio Jarillo subraya que la Ley deja de aprobar nuevas instalaciones sin tocar las anteriores, y por ello "es difícil que cierren empresas que todavía no han nacido". En cuanto a la industria de componentes, Jarillo recuerda que "el Gobierno habló de su confianza en el autoconsumo, un nicho de mercado con muy buenas expectativas que se les va a abrir al sector de fabricación de equipos." Asimismo, la Ley incluye excepciones a las renovables "eficientes", como las plantas de cogeneración, biomasa o biocarburantes, que mediante nuevos reglamentos podrían recibir unas primas específicas.

Al compromiso con Europa: los responsables de las empresas aseguran que dificultará que España logre que el 20% de la energía final provenga de renovables, un objetivo marcado por la Unión Europea para 2020. Según datos de la Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA), el objetivo para 2010 del 12,1% no se alcanzó, al quedarse en el 11,3%.

Por su parte, **según datos del MINETUR**, un 93% de la potencia instalada fue de origen renovable en 2011 y estas instalaciones cubrieron un 33% de la demanda eléctrica, "lo que convierte a España en uno de los países más avanzados en este sentido". Su responsable de comunicación asegura que "vamos muy adelantados sobre los objetivos previstos, tenemos margen suficiente para llegar a 2020 con los deberes cumplidos". [76]

#### **9.5.5.4. Supresión de los incentivos económicos para las nuevas instalaciones (Real Decreto-ley 1/2012, [80])**

1. Se suprimen los valores de las tarifas reguladas, primas y límites previstos en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, para todas las instalaciones que se encuentren en el ámbito de aplicación del presente real decreto-ley.
2. Se suprimen el complemento por eficiencia y el complemento por energía reactiva, regulados en los artículos 28 y 29, respectivamente, del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para todas las instalaciones que se encuentren en el ámbito de aplicación del presente real decreto-ley.
3. Sin perjuicio de lo previsto en los apartados 1 y 2 de este artículo, el Gobierno podrá establecer reglamentariamente regímenes económicos específicos para determinadas instalaciones de régimen especial, así como el derecho a la percepción de un régimen económico específico y, en su caso, determinadas obligaciones y derechos de los

regulados en los apartados 1 y 2 del artículo 30 de la Ley 54/1997, de 23 de noviembre, del Sector Eléctrico, para aquellas instalaciones de producción de energía eléctrica de cogeneración o que utilicen como energía primaria, energías renovables no consumibles y no hidráulicas, biomasa, biocarburantes o residuos agrícolas, ganaderos o de servicios, aun cuando las instalaciones de producción de energía eléctrica tengan una potencia instalada superior a 50 MW.

Para la determinación de los regímenes económicos específicos se podrá tener en cuenta la potencia instalada, el nivel de tensión de entrega de la energía a la red, la contribución efectiva a la mejora del medio ambiente, al ahorro de energía primaria y a la eficiencia energética, la producción de calor útil económicamente justificable y los costes de inversión y de operación, el tipo de energía primaria empleada, teniendo en el mercado de capitales.

#### **9.5.5.5. Instalaciones que hubieran obtenido autorización administrativa para una modificación sustancial con fecha anterior a la entrada en vigor del presente real decreto-ley 1/2012 [80]**

La derogación del apartado 4 del artículo 4 y del artículo 4.bis del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, prevista en la disposición derogatoria única, no será de aplicación a aquellas instalaciones que hubieran obtenido autorización administrativa para la modificación sustancial de la misma, en los términos regulados en el citado artículo 4 del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, con fecha anterior a la entrada en vigor del presente real decreto-ley.

#### **9.5.6. Costes**

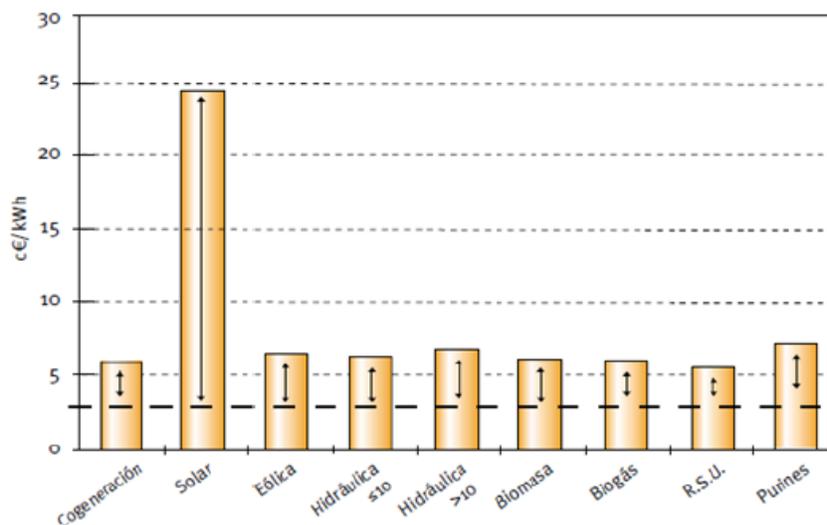
Como ya comentamos los datos económicos durante el periodo de explotación no se suelen hacer público. Hemos acudido a los pocos actualizados que hemos encontrado, pero la mayoría han sido estudios realizados por diversos organismos como el MITYC, IDAE, Ciemat, ASIF, Argem, CNE, AEE, NEO ENERGIA, o Intermoney; e investigadores como Thomas S., Bradford, John R. Crocker, Ceferino Viescas o M. de Noord. La recopilación de datos es la de la tabla 9.28.

Tecnología	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Mini-hidráulica	Biomasa	Micro-cogeneración	Micro-trigeneración
Coste generación (c€/kWh)	6,81	30	23,23	7,3	13,7	5,05	5,55

*Tabla 9.28. Costes durante el periodo de explotación [71].*

Para obtener estos datos se ha tenido sumo cuidado en filtrar la información, ya que en muchas ocasiones solo se tenían en cuenta gastos de operación y mantenimiento pero sin tener en cuenta otros tipos de costes como los derivados de seguros, alquiler de terrenos... y también había mucha disparidad entre los que no sumaban el coste del combustible y los

que sí, valorando de esta forma doblemente el mismo criterio.



**Figura 9.6. Costes de explotación de las energías del régimen especial [71]**

Estos valores hallados concuerdan perfectamente con los ofrecidos por el IDEA (ver figura 9.6) salvo en la biomasa, quizás por no tener en cuenta costes de almacenamiento de biomasa y posibles pre-tratamientos, y donde refleja claramente la gran diferencia entre la energía solar (media entre termoeléctrica y fotovoltaica) y las demás del régimen especial, al ser casi 5 veces superior su coste.

Los costes facilitados por la CNE en 2010 también se acercan mucho a los encontrados en la bibliografía. Indica costes mayores para la fotovoltaica (37,4 c€/kWh) y para la mini-hidráulica (8,1 c€/kWh), y algo menores para la eólica (5,7 c€/kWh) y para la biomasa (9,5 c€/kWh). Asimismo indica que la generación de energía a partir de las fuentes tradicionales, contabiliza unos costes sensiblemente inferiores a los del régimen especial, así en la nuclear se registran los más bajos con 4,1 c€/kWh, seguido de las centrales de ciclo combinado (4,2 c€/kWh) y de carbón (4,2-4,6 c€/kWh) [82].

### **9.5.6.1. Costes considerados para 2012**

En la Orden IET/3586/2011, de 30 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2012 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial, se fijan los costes previstos para 2012 para la retribución de las actividades reguladas, transporte y distribución de las empresas sujetas al sistema de liquidación para 2012, así como los correspondientes a las empresas insulares y extra peninsulares y los de las empresas distribuidoras de menos de 100.000 clientes.

Asimismo, según lo contemplado en la disposición adicional vigésima primera de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico se prevén las cantidades previstas para satisfacer los derechos de cobro del sistema eléctrico, sin perjuicio de las anualidades

que correspondan para satisfacer los derechos pendientes a la entrada en vigor de dicha Orden.

En la citada orden, y de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 325/2008, de 29 de febrero, y en el Real Decreto 2819/1998, de 23 de diciembre, se establece la previsión de la retribución de la actividad de transporte a partir de 1 de enero de 2012. Asimismo, se revisan los costes de distribución para 2010 y 2011 y se establece una previsión de los costes de distribución y gestión comercial para 2012. Se establecen asimismo los costes de diversificación y seguridad de abastecimiento (moratoria nuclear y 2ª parte del ciclo de combustible nuclear) y los costes permanentes (CNE, operador del sistema, déficit de ingresos en la liquidación de las actividades reguladas) establecidos todos ellos como un porcentaje de facturación de los peajes de acceso, salvo las cuantías destinadas al servicio de gestión de la demanda de interrumpibilidad y las compensaciones extra peninsulares. Asimismo, se fija la cuantía de la retribución del Operador del Mercado Ibérico de Energía, Polo Español, correspondiente al año 2012 que se financia a través de los precios que cobre a los agentes del mercado, tanto del régimen ordinario como del régimen especial que actúen en el ámbito del Mercado Ibérico de la Electricidad. La Comisión Nacional de Energía incluirá en las liquidaciones que corresponda la diferencia, que tendrán la consideración de ingreso o costes liquidable del sistema [81]

## 9.6. Normalización de criterios y pesos

Los datos de los que partimos en nuestro estudio, para la posterior valoración de criterios y pesos, con la escala Saaty, son los que se indican en la tabla 9.29 donde todos los datos han sido comprobados y actualizados a la situación actual.

Alternativas		Eólica	Solar	Solar	Micro-	Micro-	Biomasa	Mini-
Criterios		A <sub>1</sub>	Fotovoltaica	Termoeléctrica	Cogeneración	Trigeneración	A <sub>6</sub>	Hidráulica
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	24	138,5	29	257,41	257,41	35,8	11,93
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	350000	100.000	137.500	25	51	14.660	2·10 <sup>6</sup>
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	8,3	7,8	8,6	6,8	6,9	7,7	7,7
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	108,1	31,2	53	33,2	42	67,5	103
	Empleo generado C <sub>23</sub>	6	14	16	24	24	56	6
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	9,2	8,9	6,4	9,8	8,3	7,7	9
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	17	90	22	11	9	15	6
	Rendimiento C <sub>33</sub>	50	13	19	90	76	26	85
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	15,98	32,84	49,49	95,50	95,50	85,62	12,23
	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	5,14	16	21,6	3,33	4	6	6,5

Economía  C <sub>4</sub>	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	49,9125	49,9125	17,3770	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	8,36	10,29	11,08	4,42	5,11	9,46	4,16
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	8,1270	46,3348	29,8957	11,0864	11,0864	13,0404	8,6565
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	6,81	30	23,23	5,05	5,55	13,7	7,3

**Tabla 9.29. Datos de referencia actualizados**

La normalización es necesaria por tres tipos de razones;

- En primer lugar debe tenerse en cuenta que, en la mayor parte de los contextos decisionales, las unidades en que están medidos los diferentes criterios suelen ser muy diferentes. En este tipo de situación, una comparación o agregación de los diferentes criterios carece de significado.
- En segundo lugar debe tenerse en cuenta que en muchos problemas multicriterio, los valores alcanzables por los diferentes criterios pueden ser muy diferentes. En tales casos, sin una normalización previa de los criterios los métodos multicriterio pueden conducirnos a soluciones sesgadas hacia los criterios con valores alcanzables mayores.

En bastantes casos los centros decisores realizan con más facilidad las tareas comparativas entre criterios cuando trabajan con valores normalizados de los mismos en vez de con sus correspondientes valores originales.

Uno de los métodos más simples consiste en dividir los valores que alcanza el criterio por su valor "mejor". El valor mejor es el máximo cuando el criterio consiste en un atributo del tipo "más mejor" o el mínimo cuando se trata de un atributo del tipo "menos mejor".

También pueden normalizarse los criterios, dividiendo los valores que alcanza el criterio por su recorrido. Se entiende por recorrido la diferencia entre el valor "mejor" y el valor "peor" alcanzado por cada criterio.

En algunos métodos multicriterio resulta conveniente que los valores normalizados de los criterios queden acotados en el intervalo [0,1]. Este tipo de normalización puede conseguirse con facilidad restando al "mejor" valor el que realmente alcanza el criterio, dividiendo seguidamente dicha diferencia por el correspondiente rango. Con este sistema de normalización el valor normalizado del criterio es 0 cuando el criterio alcanza su "mejor" valor y por el contrario es 1 cuando el criterio alcanza su "peor" valor [85].

Una vez puntuados los criterios de las diferentes alternativas, se hace preciso en muchos métodos el trasladar las puntuaciones brutas otorgadas a una escala normalizada por dos motivos fundamentales:

-Como estamos manejando un espacio multivariable hay que homogeneizar las

puntuaciones para su comparación: esto es, considerarlas todas sobre la misma escala.

-Es razonable trabajar con escalas de dimensión suficientemente pequeña para simplificación de cálculos.

Con la normalización buscamos que las evaluaciones  $m$  de cada alternativa "i" correspondientes a un cierto criterio "j" sean comparables con las correspondientes a otros criterios. Llamaremos  $(X_j, \dots, X_i, \dots, X_m)$  al vector de puntuaciones de todas las alternativas sobre un criterio, el cual queremos transformar a uno normalizado.

$$(Y_j, Y_i, Y_m)$$

Los métodos de normalización más utilizados son los siguientes:

- Método 1.  $Y_i = (X_i - \min X_i) / (\max X_i - \min X_i)$ , donde  $0 < Y_i \leq 1$ .

Se otorga un cero a la mínima puntuación y un 1 a la máxima y el resto de las puntuaciones proporcionales a su valor en ese rango que es muy amplio. Como interpretación de  $Y_i$  se puede decir que es un porcentaje del rango  $(\max X_i - \min X_i)$ , este método tiene como desventaja que no mantiene la proporcionalidad pre post-normalización

- Método 2.  $Y_i = x_i / (\max X_i)$ , donde  $0 < Y_i \leq 1$

La alternativa con valor máximo alcanza el 1 en esta escala, pero la mínima no alcanza el cero si ella misma no es cero. Este método es el más utilizado, tiene como evidentes ventajas su intuitiva interpretación como un porcentaje del máximo  $X_i$  y el hecho de mantener la proporcionalidad pre y post-normalización, es decir que,  $(X_i / X_k) = (Y_i / Y_k)$ .

- Método 3.  $Y_i = X_i / \Sigma(m)X_i$ , donde  $0 < Y_i < 1$

No se alcanza ni el cero ni el 1 si  $X_i$  no es igual a cero. La interpretación de  $Y$ , sería la de un porcentaje del total  $\Sigma X_i$  este método mantiene la proporcionalidad pre y post-normalización, y ofrece casi las mismas ventajas que el método 2, pero "condensa" los  $Y_i$  hacia valores pequeños [89].

### 9.6.1. Normalización de los datos de referencia

Para la normalización de los datos de referencia para la implementación de los métodos multicriterio, que tendrán lugar en el siguiente capítulo, los vamos a normalizar de acuerdo al método 2, que se anunció anteriormente, por su fácil interpretación, por eso es el mas usado.

$$Y_i = \frac{X_i}{\max(X_i)} \quad \text{donde } 0 < Y_i \leq 1$$

La escala que utilizaremos en los cálculos (en el próximo capítulo), será la escala Saaty, que va del 1 al 9, donde  $Y_i = 0$  corresponderá a "1" de nuestra escala, y  $Y_i = 1$

corresponderá a “9” de nuestra escala, tabla 9.30.

Alternativas			Solar	Solar	Micro-	Micro-		Mini-
Criterios		Eólica	Fotovoltaica	Termoeléctrica	Cogeneración	Trigeneración	Biomasa	Hidráulica
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	0,0932	0,5380	0,1126	1	1	0,1390	0,0463
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	0,0250	0,0500	0,0687	1,25*10 <sup>-5</sup>	2,55*10 <sup>-5</sup>	0,0023	1
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	0,9651	0,9069	1	0,7906	0,8023	0,8953	0,8953
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	1	0,2886	0,4902	0,3071	0,3885	0,6244	0,9528
	Empleo generado C <sub>23</sub>	0,1071	0,2500	0,2857	0,4285	0,4285	1	0,1071
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	0,9387	0,9081	0,6530	1	0,8469	0,7857	0,9183
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	0,0777	1	0,2444	0,1222	0,1000	0,0555	0,0666
	Rendimiento C <sub>33</sub>	0,5555	0,1444	0,2111	1	0,8444	0,2888	0,9444
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	0,0626	0,3438	0,5182	1	1	0,8965	0,1280
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	0,2379	0,7407	1	0,1541	0,1851	0,2777	0,3009
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	1	1	0,3481	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	0,7445	0,9287	1	0,3989	0,4611	0,8537	0,3754
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	0,1753	1	0,6452	0,2382	0,2382	0,2814	0,1868
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	0,2270	1	0,7743	0,1683	0,1850	0,1233	0,2433

*Tabla 9.30. Datos de referencia normalizados.*

## 9.7. Referencias

### 9.7.1. Figuras y Tablas

Figura 9.1. Modelo para la toma de decisiones. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas

Figura 9.2. Ciclo neutro en las emisiones de CO<sub>2</sub> de la biomasa

Figura 9.3. Nivel de sonoro en función de la distancia

Figura 9.4. Evolución del VAN [72]

Figura 9.5. Periodo de amortización de la fotovoltaica según el grado de subvención.

Figura 9.6. Costes de explotación de las energías del régimen especial [71]

Tabla 9.1. Alternativas, Criterios y Subcriterio, de nuestro caso de estudio.

Tabla 9.2 Datos recopilados por Carlos Baldasquín Cáceres [71]

Tabla 9.3. Factores de Emisión de CO<sub>2</sub> por las diferentes tecnologías [72]

Tabla 9.4. Emisiones de CO<sub>2</sub> (g/kWh) [71]

Tabla 9.5. Factores de Emisión de CO<sub>2</sub> por las diferentes fuentes de energía [72]

Tabla 9.6. Emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de módulos [71]

Tabla 9.7. Terreno necesario (m<sup>2</sup>) [71]

Tabla 9.8. Prejuicios (notas de 0 a 10 en aceptación) [71]

Tabla 9.9. Ruido a 300-350 metros de distancia (dB) [71]

Tabla 9.10. Ruido a 1 metro de distancia (dB) [71]

Tabla 9.11. Empleo generado directo e indirecto para la instalación de 4 MW [71]

Tabla 9.12. Media de edad de las empresas (años) [71]

Tabla 9.13. Puntuación del grado de madurez [71]

Tabla 9.14. Proveedores murcianos [71]

Tabla 9.15. Proveedores cerca [71]

Tabla 9.16. Rendimiento de las instalaciones (%) [71]

Tabla 9.17. Disponibilidad de los recursos (%) [71]

Tabla 9.18.

Tabla 9.19. Inversión inicial (Millones de euros) [71]

Tabla 9.20. Coste de la materia prima (€/MWh)

Tabla 9.21. Tarifas del gas natural a 28 de abril de 2012 [74]

Tabla 9.22. Tarifas de alquiler de los contadores de gas [75]

Tabla 9.23. Periodos de retorno de las inversiones en años [71]

Tabla 9.24. Tarifas reguladas por Tecnología

Tabla 9.25. Tarifas y primas para cogeneración [77]

Tabla 9.26. Tarifas y primas para el 2º trimestre de 2012. [78]

Tabla 9.27. Tarifas y primas para energía renovables [79]

Tabla 9.28. Costes durante el periodo de explotación [71].

Tabla 9.29. Datos de referencia actualizados

Tabla 9.30. Datos de referencia normalizados.

### **9.7.2. Textos**

[71] “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica: Aplicando a Métodos de Relaciones de Superación”. PFC. Carlos Baldasquín Cáceres. PFC. Director Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. Ingeniería Eléctrica.

[72] Facilitada por el profesor Juan Pedro Solano, del Departamento de Térmica y Fluidos de la UPCT

[73]<http://www.cogenspain.org/>

[74] <https://www.iberdrola.es/webibd/gc/prod/es/doc/TURgas.pdf>

[75] <http://www.boe.es/boe/dias/2011/12/31/pdfs/BOE-A-2011-20647.pdf>

[76]

[http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2012/02/01/206826.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2012/02/01/206826.php)

[77]

[http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Instalaciones/Documents/Tarifas\\_enero\\_2012\\_a.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Instalaciones/Documents/Tarifas_enero_2012_a.pdf)

[78]<http://www.cogenspain.org/index.php/Noticias/tarifas-y-primas-2t012.html>

[79][http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Instalaciones/Documents/Tarifas\\_enero\\_2012\\_b.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Instalaciones/Documents/Tarifas_enero_2012_b.pdf)

[80] [http://www.cogenspain.org/images/stories/cogen/cogeneracion/Legislacin\\_Espaola/RD\\_LEY\\_1-2012\\_de\\_27\\_de\\_enero.pdf](http://www.cogenspain.org/images/stories/cogen/cogeneracion/Legislacin_Espaola/RD_LEY_1-2012_de_27_de_enero.pdf)

[81] <http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Tarifas/Tarifas2008/Paginas/Costes.aspx>

[82] “Energías Renovables. Situación y Horizonte 2010. Aspectos diferenciales con el Sector Eólico”. [www.economiaandaluza.es/sites/default/files/cap79.pdf](http://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/cap79.pdf)

[83] “Efecto invernadero”. <http://www.descubriendo.cl/pdf/Efecto%20invernadero.pdf>

[84] “El efecto invernadero III (dióxido de carbono). El tamiz”. <http://eltamiz.com/2008/09/22/falacias-el-efecto-invernadero-iii-dioxido-de-carbono/>

[85] “Energía solar fotovoltaica, ¿una energía “limpia”?”. Andrés Celave. <http://es.scribd.com/doc/38737728/6-Emisiones-de-CO2-en-la-produccion-de-panelesfotovoltaicos>

[86] “Tema IV.5. Energía solar fotovoltaica”. Apuntes de Tecnologías Energética. 5º Ingeniero Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena.

[87] “Generación de electricidad. Efecto fotovoltaico”. Martín Giordano. <http://tipos-de-energia.blogspot.com/2007/01/energa-solar-fotovoltaica.html>

[88] “Energía eólica”. Manuales de energías renovables. IDAE. MYTC [http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos\\_documentos/Energia\\_Eolica.pdf](http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Energia_Eolica.pdf)

[89] “La energía solar termoeléctrica en España”. Cayetano Espejo Marín, Ramón García Marín. Universidades de Murcia y Extremadura. <http://www.ucm.es/BUCM/revistas/ghi/02119803/articulos/AGUC1010220081A.PDF>

[90] “Electricidad verde. La biomasa en los montes de Galicia”. Albino Prada Blanco (dir.) Mario Soliño Millán María Xosé Vázquez Rodríguez. Fundación Caixa Galicia <http://webs.uvigo.es/aprada/pdfs/Electricidade%20verde%202.pdf>

[91] “Los paisajes e la energía eólica: su percepción social y gestión en España”. Marina Frolova. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Granada. <http://bddoc.csic.es:8080/detalles.html;jsessionid=10FD0264415159F0CE966B189BB57D8?id=644709&bd=ISOC&tabla=docu>

[92] Directorio de Empresas IDAE. <http://www.idae.es/index.php/recategoria.3889/id.675/reلمenu.364/mod.pags/mem.detalle>

[93] Clasificación Nacional de Actividades Económicas. [www.cnae.com.es/](http://www.cnae.com.es/)

# Capítulo 10. Aplicación de los Métodos de Decisión Multicriterio.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

# CAPÍTULO 10: APLICACIÓN DE LOS METODOS DE DECISION MULTICRITERIO

## 10.1. Introducción

Una vez se definió el problema en su totalidad se decidieron qué factores influían de manera más importante en la implantación de una u otra alternativa. Se optó por la jerarquización, ya que así se consigue reducir el número de criterios a evaluar simultáneamente, agrupándose en niveles según su generalidad. Así, se situarían en un primer nivel los criterios, formados por las cuatro dimensiones; Social, Económica, Tecnológica y Medioambiental, y en un nivel inferior, cada uno de ellas se dividiría en sub-criterios, como las emisiones de CO<sub>2</sub> y el terreno necesario, en el medio ambiental ... etc.

Posteriormente se transformaron las cuestiones en valores numéricos. Esta jerarquización simularía además de alguna forma las decisiones humanas, que generalmente se organizan de lo más general y menos controlable a lo más específico y controlable. Algunos autores han citado como un problema de la jerarquización el que generalmente se produce un “aplanamiento” de los pesos con respecto a cuando no se usa jerarquización, al recibir los criterios en grupos numerosos una menor ponderación que los que se sitúan en niveles más reducidos [94].

Un proyecto de esta profundidad, como el de “Generar Electricidad”, que es un bien indispensable para el desarrollo de los pueblos, el crecimiento económico y el bienestar de los ciudadanos, está rodeado de innumerables agentes implicados, por lo que en mayor medida que en otro tipo de proyectos influyen las preferencias o razonamientos del decisor, lo que ocasiona algo de subjetividad y alimenta a los detractores de estos métodos, pero que resueltos de otra forma generaría aún mayor grado de incertidumbre.

La parte más imparcial de la toma de decisiones es la de dar respuesta a los subcriterios, pues es una actividad de búsqueda de información y de contrastación de datos existentes. Sin perder la visión global, se ha intentado realizar una aproximación realista al escenario concreto en el que está enclavado nuestro proyecto, teniendo en cuenta tanto la situación geográfica del mismo, como los condicionantes políticos a los que está sometido, el aprovisionamiento o entramado empresarial murcianos, la economía actual o ejemplos de plantas generadoras de similares características y con preferencia nacional.

Ha sido de suma importancia para que la solución sea lo más robusta y verídica posible, encontrar referencias lo más actualizadas posibles, ya que aspectos como las ayudas al régimen especial (que han desaparecido actualmente) o los precios de las tecnologías, varían con mucha frecuencia.

Cuando disponemos de la matriz de decisión, y una vez hayamos asignado unos pesos a cada criterio y subcriterio, ya podemos implementar los dos métodos de decisión multicriterio elegidos (AHP FUZZY y TOPSIS FUZZY), llegando a la parte final del proyecto, estableceremos las prioridades locales y totales asociadas a cada alternativa ya sea mediante suma ponderada o mediante métodos de sobre clasificación.

Para llegar a una solución actualizada y objetiva, partiendo de los datos actualizados de compañeros de estudios anteriores, vamos a aplicar los Métodos Multicriterio Clásicos (AHP y Topsis) y los Métodos MulticriterioFuzzyficado (AHP Fuzzy y TopsisFuzzy), donde sacaremos las conclusiones oportunas de ambas aplicaciones a nuestro estudio.

Con la figura 10.1, podemos situarnos, para ver de donde partimos y a donde vamos;

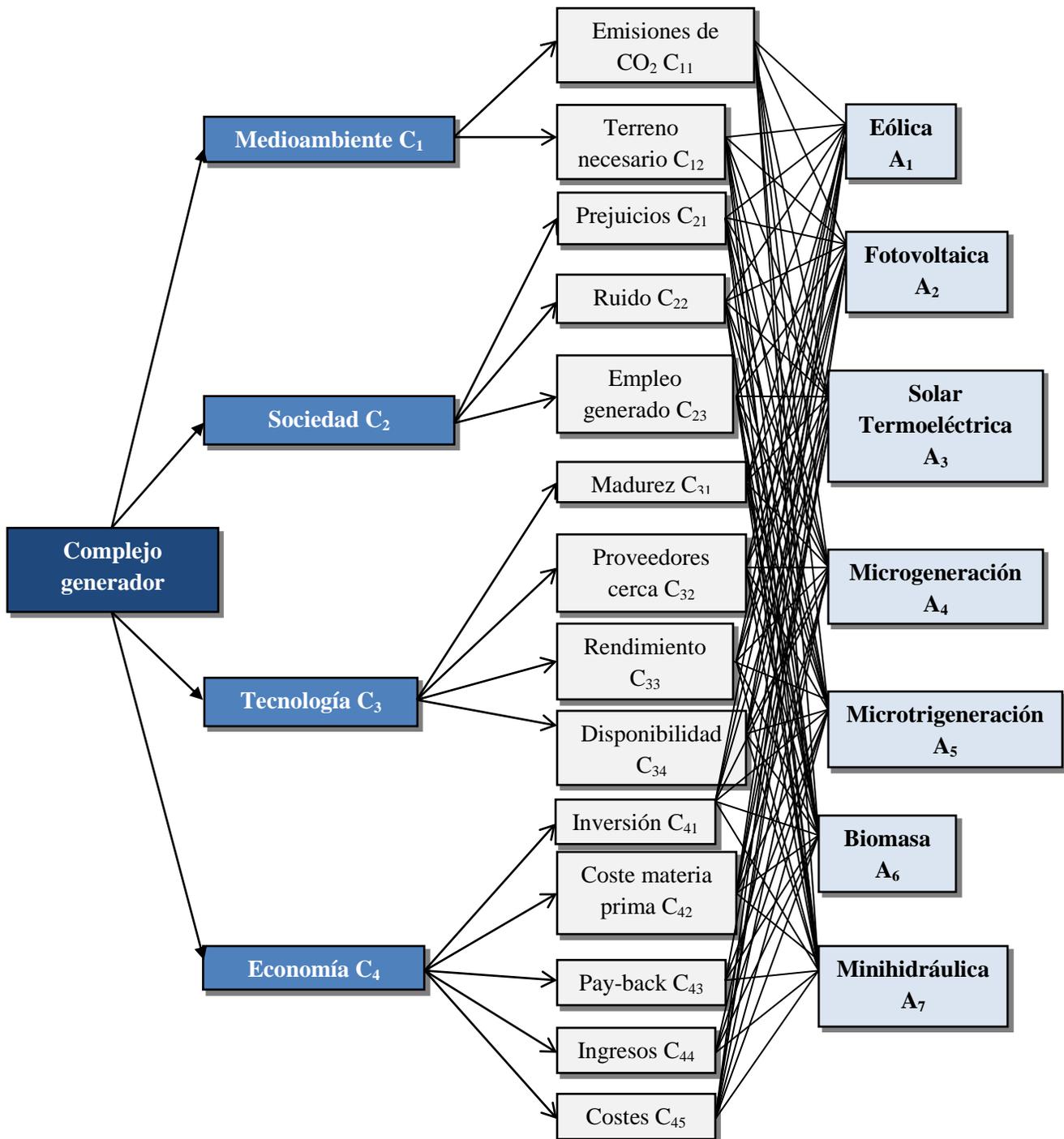


Figura 10.1. Modelo para la toma de decisiones. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas

A modo de resumen, representamos en la tabla 10.1 lo realizado hasta ahora. Notar que la mini-hidráulica se rechaza como alternativa realizable y por ello aparecen sus celdas coloreadas en naranja.

Alternativas		Eólica	Solar	Solar	Micro-	Micro-	Biomasa	Mini-
Criterios		A <sub>1</sub>	Fotovoltaica	Termoeléctrica	Cogeneración	Trigeneración	A <sub>6</sub>	Hidraulica
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	24	138,5	29	257,41	257,41	35,8	11,93
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	350000	100.000	137.500	25	51	14.660	2·10 <sup>6</sup>
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	8,3	7,8	8,6	6,8	6,9	7,7	7,7
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	108,1	31,2	53	33,2	42	67,5	103
	Empleo generado C <sub>23</sub>	6	14	16	24	24	56	6
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	9,2	8,9	6,4	9,8	8,3	7,7	9
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	17	90	22	11	9	15	6
	Rendimiento C <sub>33</sub>	50	13	19	90	76	26	85
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	15,98	32,84	49,49	95,50	95,50	85,62	12,23
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	5,14	16	21,6	3,33	4	6	6,5
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	49,9125	49,9125	17,3770	0
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	8,36	10,29	11,08	4,42	5,11	9,46	4,16
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	8,1270	46,3348	29,8957	11,0864	11,0864	13,0404	8,6565
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	6,81	30	23,23	5,05	5,55	13,7	7,3

**Tabla 10.1. Valoración de las alternativas respecto a los subcriterios**

En la siguiente tabla, se presentan las valoraciones de las alternativas, normalizados por el método 2 (tabla 10.2), que nos servirá de referencia para construir la matriz de comparación binaria entre criterios, descartando la Mini-Hidráulica como alternativa realizable.

Alternativas		Eólica A <sub>1</sub>	Solar Fotovoltaica A <sub>2</sub>	Solar Termoeléctrica A <sub>3</sub>	Micro- Cogeneración A <sub>4</sub>	Micro- Trigeneración A <sub>5</sub>	Biomasa A <sub>6</sub>
Criterios							
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	0,0932	0,5380	0,1126	1	1	0,1390
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	1	0,2857	0,3928	6,85·10 <sup>-5</sup>	1,45·10 <sup>-4</sup>	0,0418
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	0,9651	0,9069	1	0,7906	0,8023	0,8953
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	1	0,2886	0,4902	0,3071	0,3885	0,6244
	Empleo generado C <sub>23</sub>	0,1071	0,2500	0,2857	0,4285	0,4285	1
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	0,9387	0,9081	0,6530	1	0,8469	0,7857
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	0,1888	1	0,2444	0,1222	0,1000	0,1666
	Rendimiento C <sub>33</sub>	0,5555	0,1444	0,2111	1	0,8444	0,2888
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	0,0626	0,3438	0,5182	1	1	0,8965
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	0,2379	0,7407	1	0,1541	0,1851	0,2777
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	0	0	0	1	1	0,3481
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	0,7445	0,9287	1	0,3989	0,4611	0,8537
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	0,1753	1	0,6452	0,2382	0,2382	0,2814
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	0,2270	1	0,7743	0,1683	0,1850	0,4566

*Tabla 10.2. Datos de referencia normalizados*

## 10.2. Métodos de Decisión Multicriterio

Para ponderar la importancia relativa de los cuatro criterios, y de los catorce subcriterios, partimos de la labor de investigación y de estudio realizada en el PFC, previo al presente, “Aplicación de los Métodos de Decisión Multicriterio”, y el PFC, “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica: Aplicando Métodos de Relaciones de Superación”, donde se consultó en bibliografía muy diversa de expertos en la materia de diferentes países del mundo como Zhao, Yang y Chen; San Cristóbal; Heo, Kim y Boo; Wang, Kocaoglu, Daim y Yang; Nigim, Munier y Green; Talinli, Topuz y UygurAkbaý; y, finalmente, Nieto Morote, Ruz Vila y Cánovas Rodríguez, profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Es importante filtrar dicha información y enfocar los datos hacia el contexto particular en el que se encontraría la hipotética planta de generación ubicada en Murcia, ya que no son igualmente importantes unos aspectos en China que en España, por poner un ejemplo.

### 10.3. Aplicación del Método AHP Clásico

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) según toda la información que hemos ido recopilando a lo largo del proyecto. Una vez hemos definido los criterios, los subcriterios y las alternativas, nos falta determinar la importancia de cada criterio para poder implementar el método. Para ello se realiza la escala de asignación directa, del autor Saaty, tabla 10.3.

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa	
	Escala simple	Escala de Saaty
Muy débil	1	1
Débil	2	3
Moderada	3	5
Fuerte	4	7
Muy fuerte	5	9

*Tabla 10.3. Propuestas de escala de asignación directa*

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

*Tabla 10.4. Escala fundamental de Saaty, comparación pareada [9]*

Al final se dilucidará cuál es la tecnología de generación óptima para instalar en la zona norte de la ciudad de Murcia que abastezca a los centros comerciales, al estadio de fútbol y a parte de los vecinos de Molina de Segura y alrededores. [97]



$C_{12}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1/7	1/6	1/9	1/9	1/8
$A_2$	7	1	3	1/7	1/7	1/6
$A_3$	6	1/3	1	1/6	1/6	1/5
$A_4$	9	7	6	1	1	1
$A_5$	9	7	6	1	1	1
$A_6$	8	6	5	1	1	1

**Tabla 10.6. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar**

$C_{21}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	2	1	3	3	2
$A_2$	1/2	1	1/2	2	2	1
$A_3$	1	2	1	3	3	2
$A_4$	1/3	1/2	1/3	1	1	1/2
$A_5$	1/3	1/2	1/3	1	1	1/2
$A_6$	1/2	1	1/2	2	2	1

**Tabla 10.7. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar**

$C_{22}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1/7	1/5	1/7	1/6	1/4
$A_2$	7	1	3	1	2	4
$A_3$	5	1/3	1	1/3	1/2	2
$A_4$	7	1	3	1	1	4
$A_5$	6	1/2	2	1	1	3
$A_6$	4	1/4	1/2	1/4	1/3	1

**Tabla 10.8. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar**

$C_{23}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/9
$A_2$	2	1	1	1/2	1/2	1/7
$A_3$	2	1	1	1/2	1/2	1/7
$A_4$	4	2	2	1	1	1/6
$A_5$	4	2	2	1	1	1/6
$A_6$	9	7	7	6	6	1

**Tabla 10.9. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar**

$C_{31}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	2	4	1	2	3
$A_2$	1/2	1	4	1/2	2	3
$A_3$	1/4	1/4	1	1/4	1/3	1/2
$A_4$	1	2	4	1	2	3
$A_5$	1/2	1/2	3	1/2	1	2
$A_6$	1/3	1/3	2	1/3	1/2	1

**Tabla 10.10. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar**

$C_{32}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1/8	1/2	1	2	1
$A_2$	8	1	7	9	9	8
$A_3$	2	1/7	1	2	2	2
$A_4$	1	1/9	1/2	1	1	1/2
$A_5$	1/2	1/9	1/2	1	1	1/2
$A_6$	1	1/8	1/2	2	2	1

**Tabla 10.11. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar**

$C_{33}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	4	3	1/5	1/4	3
$A_2$	1/4	1	1/2	1/8	1/7	1/2
$A_3$	1/3	2	1	1/7	1/6	1
$A_4$	5	8	7	1	2	7
$A_5$	4	7	6	1/2	1	6
$A_6$	1/3	2	1	1/7	1/6	1

*Tabla 10.12. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar*

$C_{34}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1/4	1/5	1/9	1/9	1/8
$A_2$	4	1	1/2	1/7	1/7	1/5
$A_3$	5	2	1	1/5	1/5	1/4
$A_4$	9	7	5	1	1	2
$A_5$	9	7	5	1	1	2
$A_6$	8	5	4	1/2	1/2	1

*Tabla 10.13. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar*

$C_{41}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	5	8	1/2	1/2	1
$A_2$	1/5	1	2	1/6	1/6	1/5
$A_3$	1/8	1/2	1	1/8	1/8	1/7
$A_4$	2	6	8	1	1	2
$A_5$	2	6	8	1	1	2
$A_6$	1	5	7	1/2	1/2	1

*Tabla 10.14. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar*

$C_{42}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1	1	9	9	4
$A_2$	1	1	1	9	9	4
$A_3$	1	1	1	9	9	4
$A_4$	1/9	1/9	1/9	1	1	1/6
$A_5$	1/9	1/9	1/9	1	1	1/6
$A_6$	1/4	1/4	1/4	6	6	1

*Tabla 10.15. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar*

$C_{43}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	3	3	1/4	1/3	2
$A_2$	1/3	1	2	1/5	1/5	1
$A_3$	1/3	1/2	1	1/6	1/6	1/2
$A_4$	4	5	6	1	2	5
$A_5$	3	5	6	1/2	1	5
$A_6$	1/2	1	2	1/5	1/5	1

*Tabla 10.16. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar*

$C_{44}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	1/8	1/5	1/2	1/2	1/2
$A_2$	8	1	4	8	8	7
$A_3$	5	1/4	1	4	4	4
$A_4$	2	1/8	1/4	1	1	1
$A_5$	2	1/8	1/4	1	1	1
$A_6$	2	1/7	1/4	1	1	1

*Tabla 10.17. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar*

$C_{45}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	1	7	5	1/2	1/2	3
$A_2$	1/7	1	1/3	1/8	1/8	1/5
$A_3$	1/5	3	1	1/6	1/6	1/3
$A_4$	2	8	6	1	1	4
$A_5$	2	8	6	1	1	4
$A_6$	1/3	5	3	1/4	1/4	1

**Tabla 10.18. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar**

De esta forma hemos sido capaces de realizar comparaciones y establecer la fuerza de las preferencias. Si nos fijamos, la intensidad de estas preferencias satisface la condición de reciprocidad: “Si  $A_i$  es  $x$  veces preferido que  $A_j$ , entonces  $A_j$  es  $1/x$  veces preferido que  $A_i$ ”. [94]

### Paso 3: Prioridades de los criterios y consistencia de las comparaciones binarias

Se obtienen los siguientes resultados (tabla 10.19);

Criterio	$\lambda_{\max}$	Índice de consistencia	Ratio de consistencia
$C_{11}$	6'2044	0'0409	0'0326
$C_{12}$	6'5874	<b>0'1175</b>	0'0938
$C_{21}$	5'9675	-0'0065	-0'0052
$C_{22}$	6'1459	0'0292	0'0233
$C_{23}$	6'0987	0'0292	0'0233
$C_{31}$	6'1178	0'0236	0'0188
$C_{32}$	6'1238	0'0248	0'0198
$C_{33}$	6'1774	0'0355	0'0283
$C_{34}$	6'2395	0'0479	0'0383
$C_{41}$	6'0881	0'0176	0'0141
$C_{42}$	6'1645	0'0329	0'0263
$C_{43}$	6'1516	0'0303	0'0242
$C_{44}$	6'1269	0'0254	0'0203
$C_{45}$	6'1632	0'0326	0'0261

**Tabla 10.19. Ratios de consistencia de cada criterio**

Sea aprecia que el ratio de consistencia es superior al 10 % en el caso del criterio  $C_{12}$  (Terreno necesario), pero recordemos que este es un criterio demasiado conservador, por lo que hemos tomado como límite de aceptabilidad el 15 %. Vemos que no hay ninguna

comparación binaria que dé lugar a un ratio de consistencia superior a ese valor, luego los resultados los consideraremos como válidos.

Una vez calculado  $\lambda_{\text{máx}}$  y el vector propio  $\vec{Z}$  asociado, ya podemos obtener el vector  $\vec{w}$ , disponiendo así de la preferencia entre los diversos criterios, como observamos en la tabla 10.20.

Criterios	Pesos	Subcriterios	Pesos
Medio Ambiente	0'11970	Emisiones CO <sub>2</sub>	0'059850
		Terreno necesario	0'059850
Sociedad	0'04890	Prejuicios	0'009780
		Ruido	0'009780
		Empleo generado	0'029340
Tecnología	0'22609	Madurez	0'065641
		Proveedores cerca	0'021879
		Rendimiento	0'051053
		Disponibilidad de recursos	0'087521
Economía	0'60528	Inversión inicial	0'181590
		Coste materia prima	0'079294
		Pay-back	0'060530
		Ingresos	0'141935
		Costes	0'141935

*Tabla 10.20. Pesos de los criterios y subcriterios*

Y la clasificación de las alternativas es (Tabla 10.21):

Alternativa	Peso	Ranking
Eólica	0'1501	4°
Solar Fotovoltaica	0'1615	3°
Solar Termoeléctrica	0'1078	6°
Micro-Cogeneración	0'2291	1°
Micro-Trigeneración	0'2074	2°
Biomasa	0'1442	5°

*Tabla 10.21. Clasificación de las alternativas*

#### Paso 4: Ordenación de preferencias

Llegamos al último paso de este método, que nos ofrecerá el ranking final de las alternativas. El criterio es ordenar las mejores alternativas de acuerdo con  $R_i$  en orden descendente, ya que cuanto más próximo esté este índice a la unidad, más cercano estará a la solución idónea, así el pre-orden es:

**Micro-Cogeneración > Micro-Trigeneración > Solar Fotovoltaica > Eólica > Biomasa > Solar Termoeléctrica**

#### 10.4. Aplicación del Método AHP Fuzzy

Para determinar los pesos de los criterios debemos hacer uso de la escala de Saaty, que aunque ya fue expuesta en el Capítulo 5, por comodidad y facilidad a la hora de seguir el texto incluimos la tabla 10.22, y la figura 10.2 donde tenemos las variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP, con (9) conjuntos difusos de forma triangular, según el autor Bezdek et. al., 1978;

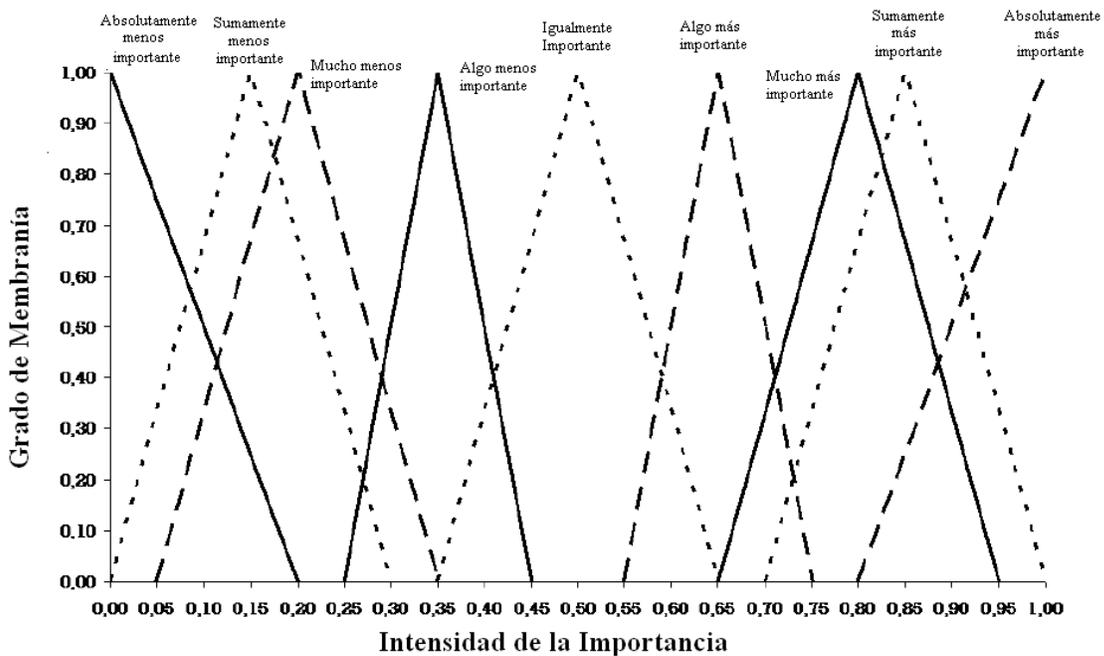


Figura 10.2. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP

Intensidad de la Importancia	Definición Lingüística	Variable Lingüística	Etiquetado Fuzzy (Intensidad de importancia)
1	Absolutamente menos importante	AmI	[0, 0, 0'2]

2	Sumamente menos importante	SmI	[0, 0'15, 0'3]
3	Mucho menos importante	MmI	[0'05, 0'2, 0'35]
4	Algo menos importante	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]
5	Igualmente importante	IgI	[0'35, 0'5, 0'65]
6	Algo más importante	AlMsI	[0'55, 0'65, 0'75]
7	Mucho más importante	MMsI	[0'65, 0'8, 0'95]
8	Sumamente más importante	SMsI	[0'7, 0'85, 1]
9	Absolutamente más importante	AMsI	[0'8, 1, 1]

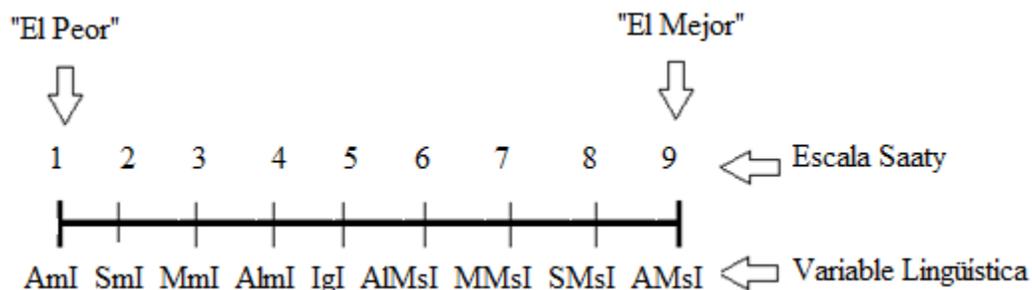
**Tabla 10.22. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones**

**Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía.** Ver figura 10.1, del principio del capítulo donde;

Meta/Objetivo → Complejo generador  
 Criterios →  $C_i$   
 Subcriterios →  $C_{ij}$   
 Alternativas →  $A_i$

**Paso 2: Establecimiento de las Matrices comparación entre criterios.** Utilizando la Escala de Saaty con números triangulares (figura 10.2)

Forma de valoración: con valores normalizados (en tanto por 1, método 2) junto con la interpretación de la Escala de Saaty, pero ahora con etiquetado Fuzzy, como vemos en la tabla 10.20, y en el esquema siguiente, para mayor aclaración;



Resulta conveniente utilizar métodos en que las preferencias de los decisores se estimen no de manera directa y simultánea, sino más bien mediante la comparación entre grupos reducidos de atributos, preferiblemente por parejas.

El método utilizado en este proyecto para la estimación de los pesos de los criterios es uno basado en la comparación en términos de importancia de los criterios, el AHP difuso, método que puede consultarse en el Capítulo 5 o en mayor profundidad en [95].

Subcriterios	Pesos	Pesos normalizados	Pesos Lingüística	Pesos $w_j$
Emisiones CO <sub>2</sub>	0'059850	0,3295	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]
Terreno necesario	0'059850	0,3295	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]
Prejuicios	0'009780	0,0538	AmI	[0, 0, 0'2]
Ruido	0'009780	0,0538	AmI	[0, 0, 0'2]
Empleo generado	0'029340	0,1615	SmI	[0, 0'15, 0'3]
Madurez	0'065641	0,3614	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]
Proveedores cerca	0'021879	0,1204	SmI	[0, 0'15, 0'3]
Rendimiento	0'051053	0,2811	MmI	[0'05, 0'2, 0'35]
Disponibilidad de recursos	0'087521	0,4819	IgI	[0'35, 0'5, 0'65]
Inversión inicial	0'181590	1	AMsI	[0'8, 1, 1]
Coste materia prima	0'079294	0,4366	IgI	[0'35, 0'5, 0'65]
Pay-back	0'060530	0,3333	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]
Ingresos	0'141935	0,7816	MMsI	[0'65, 0'8, 0'95]
Costes	0'141935	0,7816	MMsI	[0'65, 0'8, 0'95]

**Tabla 10.23. Pesos de los subcriterios**

Indicar que el principal problema apuntado en la literatura sobre este método es el de la inversión del orden de preferencia (rankreversal), que consiste en que la ordenación de dos criterios puede verse alterada por la inclusión de otro criterio irrelevante (se viola el axioma de independencia de alternativas irrelevantes). Esto hace que la ordenación de criterios proporcionada por AHP difuso pueda ser arbitraria, y que, por lo tanto, su utilización debe ser cuidadosa. Aunque Saaty considera que este fenómeno es el propio del comportamiento humano, por lo que puede considerarse aceptable [94].

Una vez que los analistas han realizado las comparaciones paritarias se obtiene la siguiente matriz del tipo A. En esta matriz las relaciones de comparación entre criterios han sido hechas utilizando la escala de Saaty pero ahora con números triangulares. [96]

C <sub>11</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	MMsI	AIMsI	AMsI	AMsI	AIMsI

A <sub>2</sub>	MmI	IgI	MmI	MMsI	MMsI	MmI
A <sub>3</sub>	AlmI	MMsI	IgI	AMsI	AMsI	IgI
A <sub>4</sub>	AmI	MmI	AmI	IgI	IgI	AmI
A <sub>5</sub>	AmI	MmI	AmI	IgI	IgI	AmI
A <sub>6</sub>	AlmI	MMsI	IgI	AMsI	AMsI	IgI

*Tabla 10.24. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO<sub>2</sub>, a Minimizar*

C <sub>12</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	SmI	SmI	AmI	AmI	AmI
A <sub>2</sub>	SMsI	IgI	AlMsI	AlmI	AlmI	AlmI
A <sub>3</sub>	SMsI	AlmI	IgI	MmI	MmI	AlmI
A <sub>4</sub>	AMsI	AlMsI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>5</sub>	AMsI	AlMsI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>6</sub>	AMsI	AlMsI	AlMsI	AlmI	AlmI	IgI

*Tabla 10.25. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar*

C <sub>21</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	IgI	IgI	AlMsI	AlMsI	IgI
A <sub>2</sub>	IgI	IgI	IgI	AlMsI	AlMsI	IgI
A <sub>3</sub>	IgI	IgI	IgI	AlMsI	AlMsI	AlMsI
A <sub>4</sub>	AlmI	AlmI	AlmI	IgI	IgI	AmI
A <sub>5</sub>	AlmI	AlmI	AlmI	IgI	IgI	IgI
A <sub>6</sub>	IgI	IgI	AlmI	AlMsI	IgI	IgI

*Tabla 10.26. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar*

C <sub>22</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	SmI	MmI	SmI	SmI	MmI
A <sub>2</sub>	SMsI	IgI	AlMsI	IgI	IgI	MMsI
A <sub>3</sub>	MMsI	AlmI	IgI	AlmI	IgI	AlMsI
A <sub>4</sub>	SMsI	IgI	AlMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>5</sub>	SMsI	IgI	IgI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>6</sub>	MMsI	MmI	AlmI	AlmI	AlmI	IgI

*Tabla 10.27. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar*

C <sub>23</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	AlmI	AlmI	MmI	MmI	AmI
A <sub>2</sub>	AlMsI	IgI	IgI	AlmI	AlmI	SmI
A <sub>3</sub>	AlMsI	IgI	IgI	AlmI	AlmI	SmI
A <sub>4</sub>	MMsI	AlMsI	AlMsI	IgI	IgI	MmI
A <sub>5</sub>	MMsI	AlMsI	AlMsI	IgI	IgI	MmI
A <sub>6</sub>	AMsI	SMsI	SMsI	MMsI	MMsI	IgI

*Tabla 10.28. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar*

C <sub>31</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	IgI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>2</sub>	IgI	IgI	MMsI	IgI	IgI	MMsI
A <sub>3</sub>	MmI	MmI	IgI	MmI	AlmI	AlmI
A <sub>4</sub>	IgI	IgI	MMsI	IgI	AlMsI	MMsI
A <sub>5</sub>	IgI	IgI	AlMsI	AlmI	IgI	IgI
A <sub>6</sub>	AlmI	MmI	AlMsI	MmI	IgI	IgI

*Tabla 10.29. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar*

C <sub>32</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	AmI	IgI	IgI	AlMsI	IgI
A <sub>2</sub>	AMsI	IgI	SMsI	AMsI	AMsI	AMsI
A <sub>3</sub>	IgI	SmI	IgI	IgI	AlMsI	IgI
A <sub>4</sub>	IgI	AmI	IgI	IgI	IgI	IgI
A <sub>5</sub>	AlmI	AmI	AlmI	IgI	IgI	IgI
A <sub>6</sub>	IgI	AmI	IgI	IgI	IgI	IgI

*Tabla 10.30. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar*

C <sub>33</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	MMsI	MMsI	MmI	AlmI	AlMsI
A <sub>2</sub>	MmI	IgI	IgI	AmI	MmI	AlmI
A <sub>3</sub>	MmI	IgI	IgI	SmI	MmI	IgI
A <sub>4</sub>	MMsI	AMsI	SMsI	IgI	AlMsI	SMsI

A <sub>5</sub>	AlMsI	MMsI	MMsI	AlmI	IgI	MMsI
A <sub>6</sub>	AmI	AlMsI	IgI	SmI	MmI	IgI

*Tabla 10.31. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar*

C <sub>34</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	AlmI	MmI	AmI	AmI	SmI
A <sub>2</sub>	AlMsI	IgI	AlmI	SmI	SmI	MmI
A <sub>3</sub>	MMsI	AlMsI	IgI	MmI	MmI	AlmI
A <sub>4</sub>	AMsI	SMsI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>5</sub>	AMsI	SMsI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>6</sub>	SMsI	MMsI	AlMsI	AlmI	AlmI	IgI

*Tabla 10.32. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar*

C <sub>41</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	MMsI	SMsI	AlmI	IgI	IgI
A <sub>2</sub>	MmI	IgI	AlMsI	SmI	MmI	MmI
A <sub>3</sub>	SmI	AlmI	IgI	AmI	AmI	SmI
A <sub>4</sub>	AlMsI	SMsI	AMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>5</sub>	IgI	MMsI	AMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>6</sub>	IgI	MMsI	SMsI	AlmI	AlmI	IgI

*Tabla 10.33. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar*

C <sub>42</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	IgI	IgI	AMsI	AMsI	AlMsI
A <sub>2</sub>	IgI	IgI	IgI	AMsI	AMsI	AlMsI
A <sub>3</sub>	IgI	IgI	IgI	AMsI	AMsI	AlMsI
A <sub>4</sub>	AmI	AmI	AmI	IgI	IgI	SmI
A <sub>5</sub>	AmI	AmI	AmI	IgI	IgI	SmI
A <sub>6</sub>	AlmI	AlmI	AlmI	SMsI	SMsI	IgI

*Tabla 10.34. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar*

C <sub>43</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	MMsI	MMsI	MmI	AlmI	IgI
A <sub>2</sub>	MmI	IgI	IgI	SmI	SmI	AlmI
A <sub>3</sub>	MmI	IgI	IgI	SmI	SmI	AlmI
A <sub>4</sub>	MMsI	SMsI	SMsI	IgI	IgI	MMsI
A <sub>5</sub>	AlMsI	SMsI	SMsI	IgI	IgI	MMsI
A <sub>6</sub>	IgI	AlMsI	AlMsI	MmI	MmI	IgI

*Tabla 10.35. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar*

C <sub>44</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	AmI	MmI	AlmI	AlmI	AlmI
A <sub>2</sub>	AMsI	IgI	MMsI	SMsI	SMsI	SMsI
A <sub>3</sub>	MMsI	MmI	IgI	AlMsI	AlMsI	AlMsI
A <sub>4</sub>	AlMsI	SmI	AlmI	IgI	IgI	IgI
A <sub>5</sub>	AlMsI	SmI	AlmI	IgI	IgI	IgI
A <sub>6</sub>	AlMsI	SmI	AlmI	IgI	IgI	IgI

*Tabla 10.36. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar*

C <sub>45</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	IgI	SMsI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>2</sub>	SmI	IgI	AlmI	AmI	AmI	SmI
A <sub>3</sub>	MmI	AlMsI	IgI	SmI	MmI	MmI
A <sub>4</sub>	IgI	AMsI	SMsI	IgI	IgI	MMsI
A <sub>5</sub>	IgI	AMsI	MMsI	IgI	IgI	AlMsI
A <sub>6</sub>	AlmI	SMsI	MMsI	MmI	AlmI	IgI

*Tabla 10.37. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar*

De esta forma hemos sido capaces de realizar comparaciones y establecer la fuerza de las preferencias. Si nos fijamos, la intensidad de estas preferencias satisface la condición de reciprocidad: “Si  $A_i$  es  $x$  veces preferido que  $A_j$ , entonces  $A_j$  es  $1/x$  veces preferido que  $A_i$ ”. [94]

### **Traducción de las variables lingüísticas a etiquetado Fuzzyficado;**

C <sub>11</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]

<b>A<sub>2</sub></b>	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'05, 0'2, 0'35]
<b>A<sub>3</sub></b>	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]
<b>A<sub>4</sub></b>	[0, 0, 0'2]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]
<b>A<sub>5</sub></b>	[0, 0, 0'2]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]
<b>A<sub>6</sub></b>	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.38. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO<sub>2</sub>, a Minimizar**

<b>C<sub>12</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>	<b>A<sub>2</sub></b>	<b>A<sub>3</sub></b>	<b>A<sub>4</sub></b>	<b>A<sub>5</sub></b>	<b>A<sub>6</sub></b>
<b>A<sub>1</sub></b>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0, 0'15, 0'3]	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]
<b>A<sub>2</sub></b>	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]
<b>A<sub>3</sub></b>	[0'7, 0'85, 1]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'25, 0'35, 0'45]
<b>A<sub>4</sub></b>	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
<b>A<sub>5</sub></b>	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
<b>A<sub>6</sub></b>	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.39. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar**

<b>C<sub>21</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>	<b>A<sub>2</sub></b>	<b>A<sub>3</sub></b>	<b>A<sub>4</sub></b>	<b>A<sub>5</sub></b>	<b>A<sub>6</sub></b>
<b>A<sub>1</sub></b>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]
<b>A<sub>2</sub></b>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]
<b>A<sub>3</sub></b>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]
<b>A<sub>4</sub></b>	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]
<b>A<sub>5</sub></b>	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
<b>A<sub>6</sub></b>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.40. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar**

<b>C<sub>22</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>	<b>A<sub>2</sub></b>	<b>A<sub>3</sub></b>	<b>A<sub>4</sub></b>	<b>A<sub>5</sub></b>	<b>A<sub>6</sub></b>
<b>A<sub>1</sub></b>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0, 0'15, 0'3]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35]
<b>A<sub>2</sub></b>	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]
<b>A<sub>3</sub></b>	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
<b>A<sub>4</sub></b>	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
<b>A<sub>5</sub></b>	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
<b>A<sub>6</sub></b>	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.41. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar**

$C_{23}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0, 0, 0'2]
$A_2$	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0, 0'15, 0'3]
$A_3$	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0, 0'15, 0'3]
$A_4$	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'05, 0'2, 0'35 ]
$A_5$	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'05, 0'2, 0'35 ]
$A_6$	[0'8, 1, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.42. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar**

$C_{31}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
$A_2$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]
$A_3$	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]
$A_4$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'65, 0'8, 0'95]
$A_5$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
$A_6$	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.43. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar**

$C_{32}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]
$A_2$	[0'8, 1, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'7, 0'85, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]
$A_3$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]
$A_4$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
$A_5$	[0'25, 0'35, 0'45]	[0, 0, 0'2]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
$A_6$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.44. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar**

$C_{33}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_1$	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'55, 0'65, 0'75]
$A_2$	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'25, 0'35, 0'45]
$A_3$	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35 ]	[0'35, 0'5, 0'65]
$A_4$	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'8, 1, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'7, 0'85, 1]

A <sub>5</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]
A <sub>6</sub>	[0, 0, 0'2]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.45. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar**

C <sub>34</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0, 0'15, 0'3]
A <sub>2</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0, 0'15, 0'3]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35]
A <sub>3</sub>	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'25, 0'35, 0'45]
A <sub>4</sub>	[0'8, 1, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>5</sub>	[0'8, 1, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>6</sub>	[0'7, 0'85, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.46. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar**

C <sub>41</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'7, 0'85, 1]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
A <sub>2</sub>	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'05, 0'2, 0'35]
A <sub>3</sub>	[0, 0'15, 0'3]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0, 0'15, 0'3]
A <sub>4</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'7, 0'85, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>5</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'8, 1, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>6</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'7, 0'85, 1]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.47. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar**

C <sub>42</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>2</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>3</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>4</sub>	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]
A <sub>5</sub>	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0, 0, 0'2]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]
A <sub>6</sub>	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'7, 0'85, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.48. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar**

C <sub>43</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]
A <sub>2</sub>	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0, 0'15, 0'3]	[0'25, 0'35, 0'45]
A <sub>3</sub>	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0, 0'15, 0'3]	[0'25, 0'35, 0'45]
A <sub>4</sub>	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'7, 0'85, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]
A <sub>5</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'7, 0'85, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]
A <sub>6</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.49. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar**

C <sub>44</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0, 0'2]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'25, 0'35, 0'45]
A <sub>2</sub>	[0'8, 1, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'7, 0'85, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'7, 0'85, 1]
A <sub>3</sub>	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>4</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0, 0'15, 0'3]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
A <sub>5</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0, 0'15, 0'3]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]
A <sub>6</sub>	[0'55, 0'65, 0'75]	[0, 0'15, 0'3]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.50. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar**

C <sub>45</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
A <sub>1</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'7, 0'85, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>2</sub>	[0, 0'15, 0'3]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'8, 1, 1]	[0'8, 1, 1]	[0, 0'15, 0'3]
A <sub>3</sub>	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'55, 0'65, 0'75]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0, 0'15, 0'3]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'05, 0'2, 0'35]
A <sub>4</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'7, 0'85, 1]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'65, 0'8, 0'95]
A <sub>5</sub>	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'8, 1, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'55, 0'65, 0'75]
A <sub>6</sub>	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'7, 0'85, 1]	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'35, 0'5, 0'65]

**Tabla 10.51. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar**

### Paso 3: Prioridades de los criterios y consistencia de las comparaciones binarias

En la tabla 10.52, tenemos recogidos las prioridades locales, obtenidas de las comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios, aplicando la normalización de la media geométrica y aplicando la propiedad de la división para números difusos;

Método de normalización;

$$\frac{(\prod_j r_{ij})^{1/n}}{\sum_i (\prod_j r_{ij})^{1/n}}$$

Propiedad de la División:  $T_1 \oslash T_2 = [a_1, b_1, c_1] \cdot [1/c_2, 1/b_2, 1/a_2]$

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
C <sub>11</sub>	0'168 0'310 0'486	0'046 0'154 0'314	0'136 0'267 0'436	0 0 0'188	0 0 0'188	0'136 0'267 0'436
C <sub>12</sub>	0 0 0'139	0'099 0'176 0'298	0'051 0'132 0'252	0'144 0'245 0'391	0'144 0'245 0'391	0'116 0'201 0'324
C <sub>21</sub>	0'110 0'212 0'357	0'110 0'212 0'357	0'119 0'221 0'366	0 0 0'233	0'080 0'162 0'283	0'097 0'191 0'328
C <sub>22</sub>	0 0'070 0'183	0'126 0'214 0'388	0'100 0'174 0'319	0'122 0'207 0'373	0'113 0'198 0'364	0'063 0'135 0'264
C <sub>23</sub>	0 0 0'301	0 0'148 0'406	0 0'148 0'406	0'089 0'198 0'513	0'089 0'198 0'513	0'170 0'306 0'717
C <sub>31</sub>	0'111 0'195 0'359	0'114 0'201 0'373	0'031 0'096 0'213	0'123 0'211 0'382	0'094 0'169 0'317	0'049 0'125 0'258
C <sub>32</sub>	0 0 0'802	0'189 0'669 1,365	0 0'330 0'858	0 0 0'783	0 0 0'693	0 0 0'783
C <sub>33</sub>	0'088 0'227 0'455	0 0 0'290	0 0'138 0'330	0'168 0'347 0'624	0'135 0'286 0'537	0 0 0'307
C <sub>34</sub>	0 0 0'191	0 0'108 0'256	0'057 0'150 0'318	0'148 0'265 0'480	0'148 0'265 0'480	0'116 0'210 0'395
C <sub>41</sub>	0'112 0'209 0'387	0 0'101 0'237	0 0 0'176	0'143 0'252 0'435	0'131 0'238 0'421	0'106 0'197 0'364
C <sub>42</sub>	0'139 0'266 0'412	0'139 0'266 0'412	0'139 0'266 0'412	0 0 0'170	0 0 0'170	0'104 0'201 0'334
C <sub>43</sub>	0'079 0'169 0'397	0 0'097 0'270	0 0'097 0'270	0'146 0'250 0'540	0'142 0'241 0'519	0'057 0'144 0'351
C <sub>44</sub>	0 0 0'408	0'172 0'312 0'940	0'096 0'209 0'683	0 0'159 0'560	0 0'159 0'560	0 0'159 0'560
C <sub>45</sub>	0'120 0'203 0'440	0 0'131 0'315	0 0'089 0'248	0'128 0'218 0'461	0'123 0'209 0'440	0'072 0'148 0'342

Tabla 10.52. Prioridades locales de las comparaciones binarias de las alternativas, “r<sub>ij</sub>”

Y a continuación, el IC y RC, para cada criterio (Tabla 10.53);

Criterio	$\lambda_{\max}$	Índice de consistencia	Ratio de consistencia
C <sub>11</sub>	1,224	-0,955	-0,770
C <sub>12</sub>	1,969	-0,806	-0,650
C <sub>21</sub>	2,059	-0,788	-0,635
C <sub>22</sub>	2,740	-0,651	-0,525
C <sub>23</sub>	1,902	-0,819	-0,660
C <sub>31</sub>	2,828	-0,634	-0,511
C <sub>32</sub>	0,287	-1,142	-0,921
C <sub>33</sub>	1,179	-0,964	-0,777
C <sub>34</sub>	1,860	-0,827	-0,667
C <sub>41</sub>	1,919	-0,816	-0,658
C <sub>42</sub>	1,310	-0,937	-0,756
C <sub>43</sub>	2,636	-0,672	-0,542
C <sub>44</sub>	1,896	-0,820	-0,661
C <sub>45</sub>	3,213	-0,557	-0,449

Tabla 10.53. Ratios de consistencia de cada criterio

Sea aprecia que el ratio de consistencia no es superior al 10 % en ninguno de los casos, luego los resultados son válidos.

**Paso 4: Sintetizar las prioridades locales sobre la jerarquía para obtener una prioridad global para cada alternativa**

En la tabla 10.54, se obtiene la sintetización de las prioridades locales, obtenidas en el proceso;

Pesos, w <sub>j</sub>	C <sub>1</sub>			C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>	
	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0'15 0'3	0'25 0'35 0'45	0 0'15 0'3	
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	
A <sub>1</sub>	0'168 0'310 0'486	0 0 0'139	0'110 0'212 0'357	0 0'070 0'183	0 0 0'301	0'111 0'195 0'359	0 0 0'802	
A <sub>2</sub>	0'046 0'154 0'314	0'099 0'176 0'298	0'110 0'212 0'357	0'126 0'214 0'388	0 0'148 0'406	0'114 0'201 0'373	0'189 0'669 1,365	
A <sub>3</sub>	0'136 0'267 0'436	0'051 0'132 0'252	0'119 0'221 0'366	0'100 0'174 0'319	0 0'148 0'406	0'031 0'096 0'213	0 0'330 0'858	
A <sub>4</sub>	0 0 0'188	0'144 0'245 0'391	0 0 0'233	0'122 0'207 0'373	0'089 0'198 0'513	0'123 0'211 0'382	0 0 0'783	
A <sub>5</sub>	0 0 0'188	0'144 0'245 0'391	0'080 0'162 0'283	0'113 0'198 0'364	0'089 0'198 0'513	0'094 0'169 0'317	0 0 0'693	
A <sub>6</sub>	0'136 0'267 0'436	0'116 0'201 0'324	0'097 0'191 0'328	0'063 0'135 0'264	0'170 0'306 0'717	0'049 0'125 0'258	0 0 0'783	

Tabla 10.54. Prioridades locales, vector final por la clasificación (continua)

Pesos, w <sub>j</sub>	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>	
	0'05 0'2 0'35	0'35 0'5 0'65	0'8 1 1	0'35 0'5 0'65	0'25 0'35 0'45	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95
	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
A <sub>1</sub>	0'088 0'227 0'455	0 0 0'191	0'112 0'209 0'387	0'139 0'266 0'412	0'079 0'169 0'397	0 0 0'408	0'120 0'203 0'440
A <sub>2</sub>	0 0 0'290	0 0'108 0'256	0 0'101 0'237	0'139 0'266 0'412	0 0'097 0'270	0'172 0'312 0'940	0 0'131 0'315
A <sub>3</sub>	0 0'138 0'330	0'057 0'150 0'318	0 0 0'176	0'139 0'266 0'412	0 0'097 0'270	0'096 0'209 0'683	0 0'089 0'248
A <sub>4</sub>	0'168 0'347 0'624	0'148 0'265 0'480	0'143 0'252 0'435	0 0 0'170	0'146 0'250 0'540	0 0'159 0'560	0'128 0'218 0'461
A <sub>5</sub>	0'135 0'286 0'537	0'148 0'265 0'480	0'131 0'238 0'421	0 0 0'170	0'142 0'241 0'519	0 0'159 0'560	0'123 0'209 0'440
A <sub>6</sub>	0 0 0'307	0'116 0'210 0'395	0'106 0'197 0'364	0'104 0'201 0'334	0'057 0'144 0'351	0 0'159 0'560	0'072 0'148 0'342

Tabla 10.55. Prioridades locales, vector final para la clasificación (continuación)

El vector global  $\vec{p}$  de prioridades que agrega las prioridades obtenidas en las dos jerarquías consideradas: criterios y alternativas. Las componentes  $p_i$  de este vector son las prioridades totales asociadas a cada alternativa  $A_i$ , que reflejan el valor total que cada alternativa tiene para el decisor. Cada componente de este vector se calcula según la expresión:

$$p_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot r_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Y la clasificación de las alternativas es (Tabla 10.53), aplicando el método de defuzzificación siguiente, para obtener la clasificación de las alternativas, para números difusos:

$$\tilde{A} = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$$

Alternativa	Peso, $p_i$	Desfuzzificar pesos ( $\tilde{A}_i$ )	Ranking, $R_i$
Eólica	0'311 0'787 2'807	1'173	5°
Solar Fotovoltaica	0'226 0'987 3'212	1'353	3°
Solar Termoeléctrica	0'186 0'754 2'696	1'097	6°
Micro-Cogeneración	0'362 1'033 3'235	1'416	1°
Micro-Trigeneración	0'339 0'983 3'112	1'354	2°
Biomasa	0'299 0'954 2'991	1'299	4°

Tabla 10.56. Clasificación de alternativas

### Paso 3: Ordenación de preferencias

Llegamos al último paso de este método, que nos ofrecerá la clasificación final de las alternativas. El criterio es ordenar las mejores alternativas de acuerdo con  $R_i$  en orden descendente, así el pre-orden es:

**Micro-Cogeneración > Micro-Trigeneración > Solar Fotovoltaica > Biomasa > Eólica > Solar Termoeléctrica**

Como podemos observar, obtenemos la misma solución, aplicando el Método AHP Clásico, que el Método AHP Fuzzy.

## 10.5. Aplicación del Método Topsis Clásico

### 10.5.1. Establecimiento de la matriz de decisión normalizada

Para la resolución de la clasificación de las alternativas mediante el método TOPSIS seguiremos los pasos indicados en el Capítulo 3.

Como ejemplo normalizaremos la respuesta a todos los subcriterios de la alternativa  $A_1$  (eólica), siendo el proceso idéntico para las demás.

El primer paso es normalizar la matriz de decisión obteniendo la tabla 10.54, donde se han incluido también los pesos en %.

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{11}} = \frac{24}{\sqrt{24^2 + 138,5^2 + 29^2 + 257,41^2 + 257,41^2 + 35,8^2}} = \frac{24}{39,29386} = 0,06108244$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{12}} = \frac{350.000}{\sqrt{350.000^2 + (10^5)^2 + 137.500 + 25^2 + 51^2 + 14.660^2}} = \frac{350.000}{3,8938563 \cdot 10^5} = 0,89885187$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{22}} = \frac{108,1}{\sqrt{108,1^2 + 31,2^2 + 53^2 + 33,2^2 + 42^2 + 67,5^2}} = \frac{108,1}{151,2962} = 0,71515345$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{23}} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 14^2 + 16^2 + 24^2 + 24^2 + 56^2}} = \frac{6}{69,10861} = 0,086819862$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{31}} = \frac{9,2}{\sqrt{9,2^2 + 8,9^2 + 6,4^2 + 9,8^2 + 8,3^2 + 7,7^2}} = \frac{9,2}{20,71303937} = 0,44164655$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{32}} = \frac{17}{\sqrt{17^2 + 90^2 + 22^2 + 11^2 + 9^2 + 15^2}} = \frac{17}{96,43651} = 0,176281788$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{33}} = \frac{50}{\sqrt{50^2 + 13^2 + 19^2 + 90^2 + 76^2 + 26^2}} = \frac{50}{132,59713} = 0,377082056$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{34}} = \frac{15,98}{\sqrt{15,98^2 + 32,84^2 + 49,49^2 + 95,5^2 + 95,5^2 + 85,62^2}} = \frac{15,98}{171,33117} = 0,09326966$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{41}} = \frac{5,14}{\sqrt{5,14^2 + 16^2 + 21,6^2 + 3,33^2 + 4^2 + 6^2}} = \frac{5,14}{28,496816} = 0,18037103$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{42}} = \frac{0}{\sqrt{0^2 + 0^2 + 0^2 + 49,9125^2 + 49,9125^2 + 17,3770^2}} = \frac{0}{72,694397} = 0$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{43}} = \frac{8,36}{\sqrt{8,36^2 + 10,29^2 + 11,08^2 + 4,42^2 + 5,11^2 + 9,42^2}} = \frac{8,36}{20,80685} = 0,4017907$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{44}} = \frac{8,127}{\sqrt{8,127^2 + 46,3348^2 + 29,8957^2 + 11,0864^2 + 11,0864^2 + 13,0404^2}} = \frac{8,127}{59,351354} = 0,1369303$$

$$\bar{n}_{A_1, C_{45}} = \frac{6,81}{\sqrt{6,81^2 + 30^2 + 23,23^2 + 5,05^2 + 5,55^2 + 13,7^2}} = \frac{6,81}{41,5933168} = 0,1637282$$

% Pesos	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>				C <sub>4</sub>				
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
A <sub>1</sub>	0,0610	0,3275	0,4393	0,7144	0,0868	0,4441	0,1762	0,3770	0,0932	0,1803	0	0,4014	0,1369	0,1637
A <sub>2</sub>	0,3524	0,9359	0,4129	0,2062	0,2025	0,4296	0,9332	0,0980	0,1916	0,5614	0	0,4941	0,7806	0,7212
A <sub>3</sub>	0,0738	0,1286	0,4552	0,3503	0,2315	0,3089	0,2281	0,1432	0,2888	0,7579	0	0,5320	0,5037	0,5585
A <sub>4</sub>	0,6550	2,3 · 10 <sup>-5</sup>	0,3599	0,2194	0,3472	0,4731	0,1140	0,6787	0,5574	0,1168	0,6866	0,2122	0,1867	0,1214
A <sub>5</sub>	0,6550	4,7 · 10 <sup>-5</sup>	0,3652	0,2776	0,3472	0,4007	0,0933	0,5731	0,5574	0,1403	0,6866	0,2453	0,1867	0,1334
A <sub>6</sub>	0,0911	0,0137	0,4076	0,4461	0,8103	0,3717	0,1555	0,1960	0,4997	0,2105	0,2390	0,4542	0,2197	0,3293
Objetivo	Min	Min	Max	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Max	Min

Tabla 10.57. Matriz de decisión normalizada

### 10.5.2. Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada

Igualmente mostramos los cálculos para la alternativa A<sub>1</sub>. Los resultados finales los representamos en la tabla 10.55.

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij} \quad j = 1, \dots, n ; \quad i = 1, \dots, m \quad 1 \in \sum_{j=1}^n w_j$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{11}} = 0,0598 \cdot 0,061078252 = 0,003655533; \quad \bar{v}_{A_1, C_{21}} = 0,00978 \cdot 0,439387211 = 0,004297207$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{12}} = 0,0598 \cdot 0,3275722 = 0,19605196; \quad \bar{v}_{A_1, C_{22}} = 0,00978 \cdot 0,714492501 = 0,006987737$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{23}} = 0,02934 \cdot 0,086819862 = 0,002547295$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{31}} = 0,065641 \cdot 0,444164656 = 0,029155412; \quad \bar{v}_{A_1, C_{41}} = 0,18159 \cdot 0,18037103 = 0,03275358$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{32}} = 0,021879 \cdot 0,176281788 = 0,003856869; \quad \bar{v}_{A_1, C_{42}} = 0,0792943 \cdot 0 = 0$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{33}} = 0,051053 \cdot 0,3770826 = 0,019251117; \quad \bar{v}_{A_1, C_{43}} = 0,06053 \cdot 0,401440773 = 0,02429921$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{34}} = 0,087521 \cdot 0,09326966 = 0,00816305; \quad \bar{v}_{A_1, C_{44}} = 0,141935 \cdot 0,13693032 = 0,01943521$$

$$\bar{v}_{A_1, C_{45}} = 0,141935 \cdot 0,163728227 = 0,0232387$$

Los demás términos, los podemos ver en la tabla 10.55;

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	Criterio
C <sub>11</sub>	0,00365553	0,02109547	0,00441710	0,03920711	0,03920711	0,00545283	Min
C <sub>12</sub>	0,01960519	0,05601484	0,00770204	1,4003·10 <sup>-6</sup>	2,8567·10 <sup>-6</sup>	0,00082117	Min
C <sub>21</sub>	0,00429720	0,00403833	0,00445252	0,00357237	0,00357237	0,00398656	Max
C <sub>22</sub>	0,00698773	0,00201681	0,00342599	0,002146609	0,00271493	0,00436329	Min
C <sub>23</sub>	0,00254729	0,00594368	0,00679278	0,01018917	0,01018917	0,02377475	Max
C <sub>31</sub>	0,02915542	0,02820469	0,02028202	0,03105685	0,02630325	0,02440181	Max
C <sub>32</sub>	0,00385686	0,0204187	0,00499124	0,00249562	0,00204187	0,00340312	Max
C <sub>33</sub>	0,01925117	0,0050053	0,00731544	0,03465211	0,02926178	0,01001061	Max
C <sub>34</sub>	0,00816305	0,01677564	0,02528095	0,04878421	0,04878421	0,04373721	Max
C <sub>41</sub>	0,03275358	0,10195666	0,13764148	0,02121973	0,02548916	0,03823375	Min
C <sub>42</sub>	0	0	0	0,05444404	0,05444404	0,01895465	Min
C <sub>43</sub>	0,02429921	0,02990895	0,03220517	0,01284719	0,01485274	0,02749647	Min
C <sub>44</sub>	0,01943521	0,11080674	0,07149367	0,02651242	0,02651242	0,03118529	Max
C <sub>45</sub>	0,02323876	0,10237341	0,07927115	0,017232859	0,01893908	0,04675052	Min

Tabla 10.58. Matriz de decisión normalizada ponderada

### 10.5.3. Determinación de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

Encontraremos la solución ideal positiva y la solución ideal negativa de entre todas las alternativas para cada criterio, dichos valores aparecen en la tabla 10.56.

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \{(max \bar{v}_{lj}^+, j \in J)(min \bar{v}_{lj}^+, j \in J')\}$$

$$\bar{A}^+ = \{(max(\bar{v}_{A_i,C_{21}}, \bar{v}_{A_i,C_{23}}, \bar{v}_{A_i,C_{31}}, \bar{v}_{A_i,C_{32}}, \bar{v}_{A_i,C_{33}}, \bar{v}_{A_i,C_{34}}, \bar{v}_{A_i,C_{44}})(min(\bar{v}_{A_i,C_{11}}, \bar{v}_{A_i,C_{12}}, \bar{v}_{A_i,C_{22}}, \bar{v}_{A_i,C_{41}}, \bar{v}_{A_i,C_{42}}, \bar{v}_{A_i,C_{43}}, \bar{v}_{A_i,C_{45}})))\}$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \{(min \bar{v}_{lj}^-, j \in J)(max \bar{v}_{lj}^-, j \in J')\}$$

$$\bar{A}^- = \{(min(\bar{v}_{A_i,C_{21}}, \bar{v}_{A_i,C_{23}}, \bar{v}_{A_i,C_{31}}, \bar{v}_{A_i,C_{32}}, \bar{v}_{A_i,C_{33}}, \bar{v}_{A_i,C_{34}}, \bar{v}_{A_i,C_{44}})(max(\bar{v}_{A_i,C_{11}}, \bar{v}_{A_i,C_{12}}, \bar{v}_{A_i,C_{22}}, \bar{v}_{A_i,C_{41}}, \bar{v}_{A_i,C_{42}}, \bar{v}_{A_i,C_{43}}, \bar{v}_{A_i,C_{45}})))\}$$

	A <sup>+</sup>	A <sup>-</sup>
C <sub>11</sub>	0,00365553	0,03920711
C <sub>12</sub>	1,4003·10 <sup>-6</sup>	0,05601484

<b>C<sub>21</sub></b>	0,00445252	0,00352060
<b>C<sub>22</sub></b>	0,00201681	0,00698773
<b>C<sub>23</sub></b>	0,02377475	0,00254729
<b>C<sub>31</sub></b>	0,03105685	0,02028202
<b>C<sub>32</sub></b>	0,02041872	0,00204187
<b>C<sub>33</sub></b>	0,03465211	0,0050053
<b>C<sub>34</sub></b>	0,04878421	0,00816305
<b>C<sub>41</sub></b>	0,02121973	0,13764148
<b>C<sub>42</sub></b>	0	0,05444404
<b>C<sub>43</sub></b>	0,01284719	0,03220517
<b>C<sub>44</sub></b>	0,11080674	0,01943521
<b>C<sub>45</sub></b>	0,01723285	0,102373418

*Tabla 10.59. PIS y NIS*

#### 10.5.4. Cálculo de las medidas de distancia

La separación de cada alternativa de la solución ideal positiva  $A^+$  y negativa  $A^-$  son las que aparecen en la tablas 10.57 y 10.58 respectivamente, como ejemplo calculamos la solución para  $A_1$ .

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{1/2}$$

$$\begin{aligned} \bar{d}_{A_1}^+ = & \{(0,003655-0,003655)^2 + (0,0196051-1,4003 \cdot 10^{-6})^2 + (0,00429720-0,0044525)^2 + \\ & (0,00698773-0,0020168)^2 + (0,00254729-0,02377475)^2 + (0,0291554-0,0310568)^2 + \\ & (0,0038568-0,0204187)^2 + (0,01925117-0,0346521)^2 + (0,00816305-0,0487842)^2 + \\ & (0,03275358-0,0212197)^2 + (0-0)^2 + (0,0242992-0,0128471)^2 + (0,0194352-0,110806)^2 + \\ & (0,0232387-0,0172328)^2\}^{1/2} = \sqrt{0,01167383} = 0,108045505 \end{aligned}$$

<b>d<sub>A1</sub><sup>+</sup></b>	0,108045505
<b>d<sub>A2</sub><sup>+</sup></b>	0,140463028
<b>d<sub>A3</sub><sup>+</sup></b>	0,146037928
<b>d<sub>A4</sub><sup>+</sup></b>	0,108813099
<b>d<sub>A5</sub><sup>+</sup></b>	0,109242630
<b>d<sub>A6</sub><sup>+</sup></b>	0,095133306

*Tabla 10.60. Medida de distancia a la PIS*

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right\}^{1/2}$$

$$\begin{aligned} \bar{d}_{A_1}^+ = & \{(0,003655-0,0392071)^2 + (0,0196051-0,0560148)^2 + (0,00429720-0,0035206)^2 + \\ & (0,00698773-0,0069877)^2 + (0,00254729-0,0025472)^2 + (0,0291554-0,0202820)^2 + \\ & (0,0038568-0,0020418)^2 + (0,01925117-0,0050053)^2 + (0,00816305-0,008160)^2 + \\ & (0,03275358-0,137641)^2 + (0-0,0544440)^2 + (0,0242992-0,0322051)^2 + (0,0194352- \\ & 0,0194352)^2 + (0,0232387-0,1023734)^2\}^{1/2} = \sqrt{0,02316558} = 0,152202435 \end{aligned}$$

$d_{A1}^-$	0,152202435
$d_{A2}^-$	0,115891281
$d_{A3}^-$	0,100454273
$d_{A4}^-$	0,164597747
$d_{A5}^-$	0,159308932
$d_{A6}^-$	0,142647605

*Tabla 10.61. Medida de distancia a la NIS*

### 10.5.5. Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

Ahora calcularemos el índice de similaridad, ya que algunas alternativas disponen de una distancia más corta respecto de la solución ideal positiva pero otras se encuentran más lejos de la solución ideal negativa. Como ejemplo de cálculo volvemos a elegir la primera alternativa, los resultados finales se encuentran en la tabla 10.59.

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, \quad i = 1, \dots, m \quad \text{Si} \begin{cases} \bar{R}_i = 1 \rightarrow A_i = \bar{A}^+ \\ \bar{R}_i = 0 \rightarrow A_i = \bar{A}^- \end{cases}$$

$$\bar{R}_i = \frac{0,152202435}{0,108045505 + 0,152202435} = 0,5848362$$

Tecnologías		$R_i$	Clasificación
Eólica	$R_{A1}$	0,58483627	4°
Solar Fotovoltaica	$R_{A2}$	0,45207463	5°
Solar Termoeléctrica	$R_{A3}$	0,40753530	6°
Micro-Cogeneración	$R_{A4}$	0,60201615	1°
Micro-Trigeneración	$R_{A5}$	0,59321543	3°
Biomasa	$R_{A6}$	0,59991193	2°

*Tabla 10.62. Proximidad relativa de las alternativas*

### 10.5.6. Ordenación de preferencias

Llegamos al último paso de este método, que nos ofrecerá el ranking final de las alternativas. El criterio es ordenar las mejores alternativas de acuerdo con  $R_i$  en orden descendente, ya que cuanto más próximo esté este índice a la unidad, más cercano estará a la solución idónea, así el pre-orden es:

**Micro-Cogeneración > Biomasa > Micro-Trigeneración > Eólica > Solar  
Fotovoltaica > Solar Termoeléctrica**

## 10.6. Aplicación del Método Topsis Fuzzy

### 10.6.1. Estructuración del problema de decisión

Establecer los subcriterios de decisión;

- $C_{11}$ : Emisiones  $CO_2$
- $C_{12}$ : Terreno necesario
- $C_{21}$ : Prejuicios
- $C_{22}$ : Ruido
- $C_{23}$ : Empleo generado
- $C_{31}$ : Madurez
- $C_{32}$ : Proveedores cerca
- $C_{33}$ : Rendimiento
- $C_{34}$ : Disponibilidad de recursos
- $C_{41}$ : Inversión Inicial
- $C_{42}$ : Coste materia prima
- $C_{43}$ : Pay-back
- $C_{44}$ : Ingresos
- $C_{45}$ : Costes

Y las alternativas que tenemos, para nuestro estudio, rechazando la Mini-Hidráulica por no ser realizable para la zona de la Región de Murcia;

- $A_1$ : Eólica
- $A_2$ : Solar Fotovoltaica
- $A_3$ : Solar Termoeléctrica
- $A_4$ : Micro-Cogeneración
- $A_5$ : Micro-Trigeneración
- $A_6$ : Biomasa



- C<sub>23</sub>: Sumamente menos importante [0, 0'15, 0'3]
- C<sub>31</sub>: Algo menos importante [0'25, 0'35, 0'45]
- C<sub>32</sub>: Sumamente menos importante [0, 0'15, 0'3]
- C<sub>33</sub>: Mucho menos importante [0'05, 0'2, 0'35]
- C<sub>34</sub>: Igualmente importante [0'35, 0'5, 0'65]
- C<sub>41</sub>: Absolutamente más importante [0'8, 1, 1]
- C<sub>42</sub>: Igualmente importante [0'35, 0'5, 0'65]
- C<sub>43</sub>: Algo menos importante [0'25, 0'35, 0'45]
- C<sub>44</sub>: Mucho más importante [0'65, 0'8, 0'95]
- C<sub>45</sub>: Mucho más importante [0'65, 0'8, 0'95]

Donde, los pesos los normalizamos (tabla 10.61), aplicando el procedimiento 2, de los métodos de normalización que vimos en el capítulo 6, que es;

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

Y aplicando la propiedad de la división para números difusos;

$$\text{División: } T_1 \oslash T_2 = [a_1, b_1, c_1] \cdot [1/c_2, 1/b_2, 1/a_2]$$

Subcriterios	Pesos	Pesos normalizados	Pesos Lingüística	Pesos C <sub>j</sub>	Pesos C <sub>i</sub> normalizados
Emisiones CO <sub>2</sub>	0'059850	0,3295	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'1189, 0'1911, 0'3196]
Terreno necesario	0'059850	0,3295	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'1189, 0'1911, 0'3196]
Prejuicios	0'009780	0,0538	AmI	[0, 0, 0'2]	[0'0000, 0'0000, 0'1420]
Ruido	0'009780	0,0538	AmI	[0, 0, 0'2]	[0'0000, 0'0000, 0'1420]
Empleo generado	0'029340	0,1615	SmI	[0, 0'15, 0'3]	[0'0000, 0'0819, 0'2130]
Madurez	0'065641	0,3614	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'1189, 0'1911, 0'3196]
Proveedores cerca	0'021879	0,1204	SmI	[0, 0'15, 0'3]	[0'0000, 0'0819, 0'2130]
Rendimiento	0'051053	0,2811	MmI	[0'05, 0'2, 0'35]	[0'0238, 0'1092, 0'2486]
Disponibilidad de recursos	0'087521	0,4819	Igl	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'1665, 0'2730, 0'4616]
Inversión inicial	0'181590	1	AMsI	[0'8, 1, 1]	[0'3805, 0'5459, 0'7102]
Coste materia prima	0'079294	0,4366	Igl	[0'35, 0'5, 0'65]	[0'1665, 0'2730, 0'4616]
Pay-back	0'060530	0,3333	AlmI	[0'25, 0'35, 0'45]	[0'1189, 0'1911, 0'3196]
Ingresos	0'141935	0,7816	MMsI	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'3092, 0'4367, 0'6747]
Costes	0'141935	0,7816	MMsI	[0'65, 0'8, 0'95]	[0'3092, 0'4367, 0'6747]

*Tabla 10.64. Pesos normalizados de la importancia de los criterios*

**Paso 5 y 5b: Construir la matriz de decisión**, correspondiente al conjunto de nueve etiquetas de valoración (tabla 10.63).

Para construir esta matriz, tenemos que normalizar los datos recogidos para cada subcriterio, teniendo en cuenta el objetivo de cada uno, “Minimizar” o “Maximizar”, cuyas formulas a utilizar, son las del procedimiento 3, de métodos de normalización (ver capítulo 6), para que todos los datos estén en las mismas unidades;

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{max}}, j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \text{ en el caso de criterios de beneficio}$$

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}^{min}}{x_{ij}}, j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \text{ en el caso de criterios de coste}$$

En este caso,  $\bar{n}_{ij} = (n_{ij}^a, n_{ij}^b, n_{ij}^c)$  es un número difuso triangular (Tabla 10.62). A la vista de la siguiente tabla, podemos nombrar lingüísticamente a cada alternativa frente a los subcriterios, en iguales condiciones, donde “el mejor” será el cercano a 1, y “el peor” será el cercano a 0.

Alternativas		Eólica A <sub>1</sub>	Solar Fotovoltaica A <sub>2</sub>	Solar Termoeléctrica A <sub>3</sub>	Micro- Cogeneración A <sub>4</sub>	Micro- Trigeneración A <sub>5</sub>	Biomasa A <sub>6</sub>	Objetivo
Criterios								
Medio Ambiente C <sub>1</sub>	Emisiones CO <sub>2</sub> (g/kWh) C <sub>11</sub>	1	0,1732	0,827	0,093	0,093	0,670	Min
	Terreno necesario (m <sup>2</sup> ) C <sub>12</sub>	7,1·10 <sup>-5</sup>	2,5·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	1	0,490	1,7·10 <sup>-3</sup>	Min
Sociedad C <sub>2</sub>	Prejuicios C <sub>21</sub>	0,9651	0,9069	1	0,7906	0,8023	0,8953	Max
	Ruido (dB) C <sub>22</sub>	0,288	1	0,588	0,939	0,743	0,462	Min
	Empleo generado C <sub>23</sub>	0,1071	0,2500	0,2857	0,4285	0,4285	1	Max
Tecnología C <sub>3</sub>	Madurez C <sub>31</sub>	0,9387	0,9081	0,6530	1	0,8469	0,7857	Max
	Proveedores cerca C <sub>32</sub>	0,1888	1	0,2444	0,1222	0,1000	0,1666	Max
	Rendimiento C <sub>33</sub>	0,5555	0,1444	0,2111	1	0,8444	0,2888	Max
	Disponibilidad de recursos C <sub>34</sub>	0,0626	0,3438	0,5182	1	1	0,8965	Max
Economía C <sub>4</sub>	Inversión inicial (M€) C <sub>41</sub>	0,648	0,208	0,154	1	0,832	0,555	Min
	Coste materia prima (€/MWh) C <sub>42</sub>	1	1	1	0,02	0,02	0,05	Min
	Pay-back (años) C <sub>43</sub>	0,528	0,429	0,398	1	0,864	0,467	Min
	Ingresos (c€/kWh) C <sub>44</sub>	0,1753	1	0,6452	0,2382	0,2382	0,2814	Max
	Costes (c€/kWh) C <sub>45</sub>	0,741	0,168	0,217	1	0,909	0,368	Min

**Tabla 10.65. Valoración de las alternativas respecto a los subcriterios, normalizados para**

conjuntos difusos

Pesos	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>				C <sub>4</sub>				
	AMsI	MMsI	AlmI	MMsI	MMsI	AlmI	IgI	SMsI	AlMsI	MMsI	SMsI	MMsI	SMsI	AMsI
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
A <sub>1</sub>	AMsI	AmI	AMsI	AlmI	SmI	SMsI	MmI	IgI	AlMsI	AlMsI	AMsI	IgI	SmI	MMsI
A <sub>2</sub>	SmI	AmI	SMsI	AMsI	MmI	SMsI	AMsI	SmI	AlmI	MmI	AMsI	AlmI	AMsI	SmI
A <sub>3</sub>	SMsI	AmI	AMsI	AlMsI	MmI	AlMsI	MmI	MmI	IgI	SmI	AMsI	AlmI	AlMsI	MmI
A <sub>4</sub>	SmI	AMsI	MMsI	SMsI	AlmI	AMsI	SmI	AMsI	AMsI	AMsI	AmI	AMsI	MmI	AMsI
A <sub>5</sub>	SmI	IgI	MMsI	MMsI	AlmI	SMsI	SmI	SMsI	AMsI	SMsI	AmI	SMsI	MmI	SMsI
A <sub>6</sub>	AlMsI	AmI	SMsI	IgI	AMsI	MMsI	SmI	MmI	SMsI	IgI	AmI	IgI	MmI	AlmI
AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI	AmI
SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI	SmI
MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI	MmI
AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI	AlmI
IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI	IgI
AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI	AlMsI
MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI	MMsI
SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI	SMsI
AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI	AMsI

Tabla 10.66. Información lingüística del problema de decisión

Pesos	C <sub>1</sub>			C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>	
	0'119 0'191 0'319	0'119 0'191 0'319	0 0 0'142	0 0 0'142	0 0'082 0'213	0'119 0'191 0'319	0 0'082 0'213	
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	
A <sub>1</sub>	0'8 1 1	0 0 0'2	0'8 1 1	0'25 0'35 0'45	0 0'15 0'3	0'7 0'85 1	0'05 0'2 0'35	
A <sub>2</sub>	0 0'15 0'3	0 0 0'2	0'7 0'85 1	0'8 1 1	0'05 0'2 0'35	0'7 0'85 1	0'8 1 1	
A <sub>3</sub>	0'7 0'85 1	0 0 0'2	0'8 1 1	0'55 0'65 0'75	0'05 0'2 0'35	0'55 0'65 0'75	0'05 0'2 0'35	
A <sub>4</sub>	0 0'15 0'3	0'8 1 1	0'65 0'8 0'95	0'7 0'85 1	0'25 0'35 0'45	0'8 1 1	0 0'15 0'3	
A <sub>5</sub>	0 0'15 0'3	0'35 0'5 0'65	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'25 0'35 0'45	0'7 0'85 1	0 0'15 0'3	
A <sub>6</sub>	0'55 0'65 0'75	0 0 0'2	0'7 0'85 1	0'35 0'5 0'65	0'8 1 1	0'65 0'8 0'95	0 0'15 0'3	
AmI	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	
SmI	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	
MmI	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	
AlmI	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	
IgI	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	
AlMsI	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	
MMsI	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	
SMsI	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	
AMsI	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	

Tabla 10.67. Matriz de decisión, etiquetado fuzzy (continua)

Pesos	C <sub>3</sub>			C <sub>4</sub>			
	0'024 0'109 0'248	0'166 0'273 0'461	0'381 0'546 0'710	0'166 0'273 0'461	0'119 0'191 0'319	0'309 0'436 0'674	0'309 0'436 0'674
	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
A <sub>1</sub>	0'35 0'5 0'65	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'8 1 1	0'35 0'5 0'65	0 0'15 0'3	0'65 0'8 0'95
A <sub>2</sub>	0 0'15 0'3	0'25 0'35 0'45	0'05 0'2 0'35	0'8 1 1	0'25 0'35 0'45	0'8 1 1	0 0'15 0'3
A <sub>3</sub>	0'05 0'2 0'35	0'35 0'5 0'65	0 0'15 0'3	0'8 1 1	0'25 0'35 0'45	0'55 0'65 0'75	0'05 0'2 0'35
A <sub>4</sub>	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0 0 0'2	0'8 1 1	0'05 0'2 0'35	0'8 1 1
A <sub>5</sub>	0'7 0'85 1	0'8 1 1	0'7 0'85 1	0 0 0'2	0'7 0'85 1	0'05 0'2 0'35	0'7 0'85 1
A <sub>6</sub>	0'05 0'2 0'35	0'7 0'85 1	0'35 0'5 0'65	0 0 0'2	0'35 0'5 0'65	0'05 0'2 0'35	0'25 0'35 0'45
AmI	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2	0 0 0'2
SmI	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3	0 0'15 0'3
MmI	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35	0'05 0'2 0'35
AlmI	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45	0'25 0'35 0'45
IgI	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65	0'35 0'5 0'65
AIMsI	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75	0'55 0'65 0'75
MMsI	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95	0'65 0'8 0'95
SMsI	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1	0'7 0'85 1
AMsI	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1	0'8 1 1

Tabla 10.68. Matriz de decisión, etiquetado fuzzy (continuación)

**Paso 6: Matriz de decisión normalizada (tabla 10.64), por el procedimiento 1, de los métodos de normalización (ver capítulo 6).**

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}$$

Y aplicando la propiedad de la división para números difusos;

$$\text{División: } T_1 \oslash T_2 = [a_1, b_1, c_1] \cdot [1/c_2, 1/b_2, 1/a_2]$$

	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>	
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>
A <sub>1</sub>	0'298 0'429 0'536	0 0 0'119	0'251 0'357 0'440	0'086 0'138 0'222	0 0'070 0'178	0'223 0'311 0'452	0'020 0'095 0'213
A <sub>2</sub>	0 0'064 0'160	0 0 0'119	0'219 0'301 0'440	0'275 0'395 0'494	0'020 0'093 0'208	0'223 0'311 0'452	0'330 0'478 0'609
A <sub>3</sub>	0,261 0'364 0'536	0 0 0'119	0'251 0,354 0'440	0'189 0'257 0'371	0'020 0'093 0'208	0'175 0'238 0'339	0'020 0'095 0'213
A <sub>4</sub>	0 0'064 0'160	0'328 0'472 0'597	0'204 0'283 0'418	0'241 0'336 0'494	0'101 0'163 0'268	0'255 0'366 0'452	0 0'071 0'182
A <sub>5</sub>	0 0'064 0'160	0'143 0'236 0'388	0'204 0'283 0'418	0'223 0'316 0'470	0'101 0'163 0'268	0'223 0'311 0'452	0 0'071 0'182
A <sub>6</sub>	0'205 0'278 0'402	0 0 0'119	0'219 0'301 0'440	0'120 0'197 0'321	0'324 0'467 0'596	0'207 0'293 0'430	0 0'071 0'182
AmI	0 0 0'107	0 0 0'119	0 0 0'088	0 0 0'098	0 0 0'119	0 0 0'090	0 0 0'121
SmI	0 0'064 0'160	0 0'070 0'179	0 0'053 0'132	0 0'059 0'148	0 0'070 0'178	0 0'054 0'135	0 0'071 0'182

MmI	0'018 0'085 0'187	0'020 0'094 0'208	0'015 0'070 0'154	0'017 0'079 0'173	0'020 0'093 0'208	0'015 0'073 0'158	0'020 0'095 0'213
AlmI	0'093 0'150 0'241	0'102 0'165 0'268	0'078 0'124 0'198	0'086 0'138 0'222	0'101 0'163 0'268	0'079 0'128 0'203	0'103 0'167 0'274
IgI	0'130 0'214 0'348	0'143 0'236 0'388	0'109 0'177 0'286	0'120 0'197 0'321	0'141 0'233 0'387	0'111 0'183 0'294	0'144 0'239 0'396
AlMsI	0'205 0'278 0'402	0'225 0'307 0'447	0'172 0'230 0'330	0'189 0'257 0'371	0'223 0'304 0'447	0'175 0'238 0'339	0'227 0'311 0'457
MMsI	0'242 0'343 0'509	0'267 0'378 0'567	0'204 0'283 0'418	0'223 0'316 0'470	0'263 0'374 0'566	0'207 0'293 0'430	0'268 0'382 0'579
SMsI	0'261 0'364 0'536	0'287 0'402 0'597	0'219 0'301 0'440	0'241 0'336 0'494	0'283 0'397 0'596	0'223 0'311 0'452	0'289 0'406 0'609
AMsI	0'298 0'429 0'536	0'328 0'472 0'597	0'251 0'354 0'440	0'275 0'395 0'494	0'324 0'467 0'596	0'255 0'366 0'452	0'330 0'478 0'609

Tabla 10.69. Matriz de decisión normalizada, etiquetado fuzzy (continua)

	C <sub>3</sub>		C <sub>4</sub>				
	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
A <sub>1</sub>	0'298 0'217 0'358	0'188 0'250 0'361	0'200 0'272 0'395	0'292 0'400 0'502	0'127 0'209 0'345	0 0'068 0'173	0'234 0'333 0'496
A <sub>2</sub>	0 0'065 0'165	0'085 0'134 0'217	0'018 0'083 0'184	0'292 0'400 0'502	0'090 0'146 0'239	0'317 0'457 0'578	0 0'062 0'156
A <sub>3</sub>	0'018 0'087 0'192	0'119 0'192 0'313	0 0'062 0'158	0'292 0'400 0'502	0'090 0'146 0'239	0'218 0'297 0'433	0'018 0'083 0'182
A <sub>4</sub>	0'298 0'434 0'550	0'273 0'385 0'482	0'291 0'419 0'527	0 0 0'100	0'290 0'419 0'531	0'019 0'091 0'202	0'289 0'416 0'522
A <sub>5</sub>	0'261 0'369 0'550	0'273 0'385 0'482	0'254 0'356 0'527	0 0 0'100	0'254 0'356 0'531	0'019 0'091 0'202	0'252 0'353 0'522
A <sub>6</sub>	0'018 0'087 0'192	0'239 0'327 0'482	0'127 0'209 0'342	0 0 0'100	0'127 0'209 0'345	0'019 0'091 0'202	0'090 0'145 0'235
AmI	0 0 0'11	0 0 0'096	0 0 0'105	0 0 0'100	0 0 0'106	0 0 0'115	0 0 0'104
SmI	0 0'065 0'165	0 0'057 0'144	0 0'062 0'158	0 0'060 0'150	0 0'062 0'159	0 0'068 0'173	0 0'062 0'156
MmI	0'018 0'087 0'192	0'017 0'077 0'168	0'018 0'083 0'184	0'018 0'080 0'175	0'018 0'083 0'185	0'019 0'091 0'202	0'018 0'083 0'156
AlmI	0'093 0'152 0'247	0'085 0'134 0'217	0'091 0'146 0'237	0'091 0'140 0'226	0'090 0'146 0'239	0'099 0'160 0'260	0'090 0'145 0'235
IgI	0'131 0'217 0'358	0'119 0'192 0'313	0'127 0'209 0'342	0'128 0'200 0'326	0'127 0'209 0'345	0'138 0'228 0'375	0'126 0'208 0'339
AlMsI	0'205 0'282 0'413	0'188 0'250 0'361	0'200 0'272 0'395	0'201 0'260 0'376	0'199 0'272 0'398	0'218 0'297 0'433	0'198 0'270 0'392
MMsI	0'242 0'347 0'523	0'222 0'308 0'458	0'236 0'335 0'500	0'237 0'320 0'477	0'235 0'335 0'504	0'257 0'365 0'549	0'234 0'333 0'496
SMsI	0'261 0'369 0'550	0'239 0'327 0'482	0'254 0'356 0'527	0'256 0'340 0'502	0'254 0'356 0'531	0'277 0'388 0'578	0'252 0'353 0'522
AMsI	0'298 0'434 0'550	0'273 0'385 0'482	0'291 0'419 0'527	0'292 0'400 0'502	0'290 0'419 0'531	0'317 0'457 0'578	0'289 0'416 0'522

Tabla 10.70. Matriz de decisión normalizada, etiquetado fuzzy (continuación)

**Paso 7: Construir la matriz ponderada normalizada.** (Tabla 10.64), asociada;

$$\bar{v}_{ij} = w_j \cdot \bar{n}_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, m$$

Donde  $\bar{v}_{ij} = (v_{ij}^a, v_{ij}^b, v_{ij}^c)$  será un número difuso

	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			C <sub>3</sub>	
	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>
V <sub>A1</sub>	0'035 0'081 0'171	0 0 0'038	0 0 0'062	0 0 0'031	0 0'005 0'038	0'026 0'059 0'144	0 0'007 0'045
V <sub>A2</sub>	0 0'012 0'051	0 0 0'038	0 0 0'062	0 0 0'070	0 0'007 0'044	0'026 0'059 0'144	0 0'039 0'129
V <sub>A3</sub>	0'031 0'069 0'171	0 0 0'038	0 0 0'062	0 0 0'052	0 0'007 0'044	0'020 0'045 0'108	0 0'007 0'045
V <sub>A4</sub>	0 0'012 0'051	0'039 0'090 0'190	0 0 0'059	0 0 0'070	0 0'013 0'057	0'030 0'070 0'144	0 0'005 0'038
V <sub>A5</sub>	0 0'012 0'051	0'017 0'045 0'124	0 0 0'059	0 0 0'066	0 0'013 0'057	0'026 0'059 0'144	0 0'005 0'038
V <sub>A6</sub>	0'024 0'053 0'128	0 0 0'038	0 0 0'062	0 0 0'045	0 0'038 0'127	0'024 0'056 0'137	0 0'005 0'038
V <sub>AmI</sub>	0 0 0'034	0 0 0'038	0 0 0'012	0 0 0'014	0 0 0'025	0 0 0'028	0 0 0'025
V <sub>SmI</sub>	0 0'012 0'051	0 0'013 0'057	0 0 0'018	0 0 0'021	0 0'005 0'038	0 0'010 0'043	0 0'005 0'038
V <sub>MmI</sub>	0'002 0'016 0'060	0'002 0'018 0'066	0 0 0'021	0 0 0'024	0 0'007 0'044	0'001 0'014 0'050	0 0'007 0'045
V <sub>AlmI</sub>	0'011 0'028 0'077	0'012 0'031 0'085	0 0 0'028	0 0 0'031	0 0'013 0'057	0'009 0'024 0'065	0 0'013 0'058
V <sub>IgI</sub>	0'015 0'040 0'111	0'017 0'045 0'124	0 0 0'040	0 0 0'045	0 0'019 0'082	0'013 0'035 0'094	0 0'019 0'084
V <sub>AlMsI</sub>	0'024 0'053 0'128	0'026 0'058 0'143	0 0 0'046	0 0 0'052	0 0'024 0'095	0'020 0'045 0'108	0 0'025 0'097
V <sub>MMsI</sub>	0'028 0'065 0'162	0'031 0'072 0'181	0 0 0'059	0 0 0'066	0 0'030	0'024 0'056 0'137	0 0'031 0'123
V <sub>SMsI</sub>	0'031 0'069 0'171	0'034 0'076 0'190	0 0 0'062	0 0 0'070	0 0'032 0'127	0'026 0'059 0'144	0 0'033 0'129
V <sub>AMsI</sub>	0'035 0'081 0'171	0'039 0'090 0'190	0 0 0'062	0 0 0'070	0 0'038 0'127	0'030 0'070 0'144	0 0'039 0'129

**Tabla 10.71. Matriz ponderada normalizada fuzzy (continua)**

	C <sub>3</sub>		C <sub>4</sub>				
	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
V <sub>A1</sub>	0'003 0'023 0'088	0'031 0'068 0'166	0'076 0'148 0'280	0'048 0'109 0'231	0'015 0'040 0'110	0 0'029 0'117	0'072 0'145 0'335
V <sub>A2</sub>	0 0'007 0'041	0'014 0'036 0'100	0'006 0'045 0'131	0'048 0'109 0'231	0'010 0'028 0'076	0'098 0'199 0'390	0 0'027 0'105
V <sub>A3</sub>	0'0004 0'009 0'047	0'0199 0'052 0'144	0 0'034 0'112	0'048 0'109 0'231	0'010 0'028 0'076	0'067 0'129 0'292	0'005 0'036 0'123
V <sub>A4</sub>	0'007 0'047 0'136	0'045 0'105 0'222	0'110 0'229 0'374	0 0 0'046	0'034 0'080 0'169	0'006 0'039 0'136	0'089 0'181 0'352
V <sub>A5</sub>	0'006 0'040 0'136	0'045 0'105 0'222	0'096 0'194 0'374	0 0 0'046	0'030 0'068 0'169	0'006 0'039 0'136	0'078 0'154 0'352
V <sub>A6</sub>	0'0004 0'009 0'047	0'039 0'089 0'222	0'048 0'114 0'243	0 0 0'046	0'015 0'040 0'110	0'006 0'039 0'136	0'027 0'063 0'158
V <sub>AmI</sub>	0 0 0'027	0 0 0'044	0 0 0'074	0 0 0'046	0 0 0'033	0 0 0'078	0 0 0'070
V <sub>SmI</sub>	0 0'007 0'041	0 0'015 0'066	0 0'034 0'112	0 0'016 0'069	0 0'012 0'050	0 0'029 0'117	0 0'027 0'105
V <sub>MmI</sub>	0'0004 0'009 0'047	0'002 0'021 0'077	0'006 0'045 0'131	0'003 0'021 0'081	0'002 0'016 0'059	0'006 0'039 0'136	0'005 0'036 0'123
V <sub>AlmI</sub>	0'002 0'016 0'061	0'014 0'036 0'100	0'034 0'080 0'168	0'015 0'038 0'104	0'010 0'028 0'076	0'030 0'069 0'175	0'027 0'063 0'158
V <sub>IgI</sub>	0'003 0'023 0'088	0'019 0'052 0'144	0'048 0'114 0'243	0'021 0'054 0'150	0'015 0'040 0'110	0'042 0'099 0'253	0'039 0'090 0'229
V <sub>AlMsI</sub>	0'004 0'030 0'102	0'031 0'068 0'166	0'076 0'148 0'280	0'033 0'071 0'173	0'023 0'052 0'127	0'067 0'129 0'292	0'061 0'118 0'264
V <sub>MMsI</sub>	0'005 0'037 0'130	0'037 0'084 0'211	0'090 0'183 0'355	0'039 0'087 0'220	0'028 0'064 0'161	0'079 0'159 0'370	0'072 0'145 0'335
V <sub>SMsI</sub>	0'006 0'040 0'136	0'039 0'089 0'222	0'096 0'194 0'374	0'042 0'093 0'231	0'030 0'068 0'169	0'085 0'169 0'390	0'078 0'154 0'353
V <sub>AMsI</sub>	0'007 0'047 0'136	0'045 0'105 0'222	0'110 0'229 0'374	0'048 0'109 0'231	0'034 0'080 0'169	0'098 0'199 0'390	0'089 0'181 0'352

**Tabla 10.72. Matriz ponderada normalizada fuzzy (continuación)**

**Paso 8: Determinar la solución ideal positiva y la solución ideal negativa, que se exponen en la (tabla 10.65). Se puede comprobar que se corresponden con las etiquetas: Mucho más importante y Mucho menos importante, respectivamente.**

$$\overline{A}^+ = \{\overline{v}_1^+, \dots, \overline{v}_n^+\} = \left\{ \begin{array}{l} (\max \overline{v}_{ij}, j \in J) \\ (\min \overline{v}_{ij}, j \in J') \end{array} \right\}$$

$$\overline{A}^- = \{\overline{v}_1^-, \dots, \overline{v}_n^-\} = \left\{ \begin{array}{l} (\min \overline{v}_{ij}, j \in J) \\ (\max \overline{v}_{ij}, j \in J') \end{array} \right\}$$

Donde J está asociado con aquellos criterios que indican ganancias o beneficios y J' está asociado con los criterios que indican pérdidas o costes.

	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>
A <sup>+</sup>	0 0 0'034	0 0 0'038	0 0 0'062	0 0 0'014	0 0'038 0'127	0'030 0'070 0'144	0 0'039 0'129
A <sup>-</sup>	0'035 0'081 0'171	0'039 0'090 0'190	0 0 0'012	0 0 0'070	0 0 0'025	0 0 0'028	0 0 0'025

Tabla 10.73. Solución ideal positiva y negativa (continua)

	C <sub>33</sub>	C <sub>34</sub>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub>	C <sub>44</sub>	C <sub>45</sub>
A <sup>+</sup>	0'007 0'047 0'136	0'045 0'105 0'222	0 0 0'074	0 0 0'046	0 0 0'033	0'098 0'199 0'390	0 0 0'070
A <sup>-</sup>	0 0 0'0273	0 0 0'044	0'110 0'229 0'374	0'048 0'109 0'231	0'034 0'080 0'169	0 0 0'078	0'089 0'181 0'352

Tabla 10.74. Solución ideal positiva y negativa (continuación)

**Paso 9: Calcular la distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa que reflejamos en la tabla 10.66**

$$\overline{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j \in J} (\overline{v}_{ij} - \overline{v}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, m$$

$$\overline{d}_i^- = \left\{ \sum_{j \in J} (\overline{v}_{ij} - \overline{v}_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, m$$

en este caso usamos la distancia euclídea, pero podríamos haber tenido en cuenta cualquier otra.

<b>d+A<sub>1</sub></b>	0,5039 0,3106 0,5754	<b>d-A<sub>1</sub></b>	0,5412 0,1652 0,4752
<b>d+A<sub>2</sub></b>	0,4595 0,1520 0,4714	<b>d-A<sub>2</sub></b>	0,6264 0,3458 0,4987
<b>d+A<sub>3</sub></b>	0,4775 0,1781 0,4294	<b>d-A<sub>3</sub></b>	0,6192 0,3033 0,4315
<b>d+A<sub>4</sub></b>	0,5007 0,3571 0,6406	<b>d-A<sub>4</sub></b>	0,5246 0,1919 0,5490
<b>d+A<sub>5</sub></b>	0,5011 0,3099 0,6236	<b>d-A<sub>5</sub></b>	0,5450 0,1974 0,5339
<b>d+A<sub>6</sub></b>	0,5074 0,2238 0,4316	<b>d-A<sub>6</sub></b>	0,5997 0,2529 0,3870

<b>d+AmI</b>	0,5431 0,2471 0,1378	<b>d-AmI</b>	0,6549 0,3447 0,1139
<b>d+SmI</b>	0,5431 0,2163 0,2074	<b>d-SmI</b>	0,6549 0,2953 0,1644
<b>d+MmI</b>	0,5346 0,2093 0,2455	<b>d-MmI</b>	0,6440 0,2801 0,1982
<b>d+AlmI</b>	0,5022 0,2009 0,3244	<b>d-AlmI</b>	0,6010 0,2401 0,2724
<b>d+IglI</b>	0,4871 0,2120 0,4866	<b>d-IglI</b>	0,5799 0,2120 0,4311
<b>d+AlMsI</b>	0,4594 0,2401 0,5688	<b>d-AlMsI</b>	0,5386 0,2009 0,5124
<b>d+MMsI</b>	0,4470 0,2801 0,7339	<b>d-MMsI</b>	0,5185 0,2093 0,6766
<b>d+SMsI</b>	0,4412 0,2953 0,7753	<b>d-SMsI</b>	0,5086 0,2163 0,7178
<b>d+AMsI</b>	0,4304 0,3447 0,7753	<b>d-AMsI</b>	0,4891 0,2471 0,7178

*Tabla 10.75. Valores de las distancias a las alternativas ideal y anti-ideal*

**Paso 10: Calcular el coeficiente de proximidad.** (Tabla 10.67) de cada alternativa a la solución ideal positiva y negativa mediante el índice de proximidad.

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, i = 1, \dots, m$$

- Si  $\bar{R}_i \cong 1 \rightarrow A_i = \bar{A}^+$
- Si  $\bar{R}_i \cong 0 \rightarrow A_i = \bar{A}^-$

Y aplicando la propiedad de la división para números difusos;

$$\text{División: } T_1 \oslash T_2 = [a_1, b_1, c_1] \cdot [1/c_2, 1/b_2, 1/a_2]$$

<b>RA<sub>1</sub></b>	0,5151 0,3471 0,4523
<b>RA<sub>2</sub></b>	0,6457 0,6946 0,4591
<b>RA<sub>3</sub></b>	0,7191 0,6299 0,3934
<b>RA<sub>4</sub></b>	0,4409 0,3496 0,5354
<b>RA<sub>5</sub></b>	0,4708 0,3891 0,5103
<b>RA<sub>3</sub></b>	0,7325 0,5304 0,3495
<b>R<sub>AmI</sub></b>	2,6008 0,5824 0,0951
<b>R<sub>SmI</sub></b>	1,7608 0,5772 0,1372
<b>R<sub>MmI</sub></b>	1,4512 0,5723 0,1681
<b>R<sub>AlmI</sub></b>	1,0069 0,5445 0,2469
<b>R<sub>IglI</sub></b>	0,6318 0,5000 0,4040
<b>R<sub>AlMsI</sub></b>	0,4981 0,4554 0,5134
<b>R<sub>MMsI</sub></b>	0,3676 0,4276 0,7007
<b>R<sub>SMsI</sub></b>	0,3406 0,4227 0,7557
<b>R<sub>AMsI</sub></b>	0,3276 0,4175 0,7805

*Tabla 10.76. Coeficientes de proximidad*

**Pasos 11 y 12: Defuzzificación,** ordenación de las alternativas y salida lingüística de resultados. De entre los muchos métodos posibles existentes, utilizaremos la siguiente

expresión;

$$I_{\beta,\lambda}(A_i) = \beta S_M(A_i) + (1 - \beta)\lambda S_R(A_i) + (1 - \beta)(1 - \lambda)S_L(A_i)$$

Donde;

- $\beta \in [0,1]$  es el índice de modalidad representando la importancia del valor
- $\lambda \in [0,1]$  es el grado de optimismo del decisor

Realizamos el proceso de defuzzificación visto anteriormente, considerando que la tres áreas tienen la misma importancia o peso, correspondiéndose con un decisor neutral y siendo, por tanto,  $\lambda = 1/2$  y  $\beta = 1/3$ .

	Salida defuzzificada	Orden	Salida lingüística	Tecnología
<b>IA<sub>1</sub></b>	0,4382	1°	AMsI	Eólica
<b>IA<sub>2</sub></b>	0,5998	6°	MmI-AlmI	Fotovoltaica
<b>IA<sub>3</sub></b>	0,5808	5°	IgI-AlmI	Termoeléctrica
<b>IA<sub>4</sub></b>	0,4420	2°	AMsI	Micro-Cogeneración
<b>IA<sub>5</sub></b>	0,4568	3°	AMsI	Micro-Trigeneración
<b>IA<sub>6</sub></b>	0,5375	4°	AlmI-IgI	Biomasa
<b>I<sub>AmI</sub></b>	1,0930			
<b>I<sub>SmI</sub></b>	0,8252			
<b>I<sub>MmI</sub></b>	0,7306			
<b>I<sub>AlmI</sub></b>	0,5995			
<b>I<sub>IgI</sub></b>	0,5119			
<b>I<sub>AIMsI</sub></b>	0,4890			
<b>I<sub>MMsI</sub></b>	0,4787			
<b>I<sub>SMsI</sub></b>	0,4664			
<b>I<sub>AMsI</sub></b>	0,4586			

Tabla 10.77. Alternativas y salidas lingüísticas

**Eólica > Micro-Cogeneración > Micro-Trigeneración > Biomasa > Solar  
Termoeléctrica > Solar Fotovoltaica**

## 10.7. Referencias

### 10.7.1.Figuras y Tablas

Figura 10.1. Modelo para la toma de decisiones. Objetivo, criterios, subcriterios y alternativas

Figura 10.2. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones con AHP

Tabla 10.2. Datos de referencia normalizados

Tabla 10.3. Propuestas de escala de asignación directa

Tabla 10.4. Escala fundamental de Saaty, comparación pareada [9]

Tabla 10.5. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO<sub>2</sub>, a Minimizar

Tabla 10.6. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar

Tabla 10.7. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar

Tabla 10.8. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar

Tabla 10.9. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar

Tabla 10.10. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar

Tabla 10.11. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar

Tabla 10.12. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar

Tabla 10.13. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar

Tabla 10.14. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar

Tabla 10.15. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar

Tabla 10.16. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar

Tabla 10.17. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar

Tabla 10.18. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar

Tabla 10.19. Ratios de consistencia de cada criterio

Tabla 10.20. Pesos de los criterios y subcriterios

- Tabla 10.21. Clasificación de las alternativas
- Tabla 10.22. Variables Lingüísticas para Toma de Decisiones
- Tabla 10.23. Pesos de los subcriterios
- Tabla 10.24. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO<sub>2</sub>, a Minimizar
- Tabla 10.25. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar
- Tabla 10.26. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar
- Tabla 10.27. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar
- Tabla 10.28. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar
- Tabla 10.29. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar
- Tabla 10.30. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar
- Tabla 10.31. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar
- Tabla 10.32. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar
- Tabla 10.33. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar
- Tabla 10.34. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar
- Tabla 10.35. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar
- Tabla 10.36. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar
- Tabla 10.37. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar
- Tabla 10.38. Comparación binaria entre alternativas según Emisiones de CO<sub>2</sub>, a Minimizar
- Tabla 10.39. Comparación binaria entre alternativas según Terreno necesario, a Minimizar
- Tabla 10.40. Comparación binaria entre alternativas según Prejuicios, a Maximizar

- Tabla 10.41. Comparación binaria entre alternativas según Ruido, a Minimizar
- Tabla 10.42. Comparación binaria entre alternativas según Empleo generado, a Maximizar
- Tabla 10.43. Comparación binaria entre alternativas según Madurez, a Maximizar
- Tabla 10.44. Comparación binaria entre alternativas según Proveedores cerca, a Maximizar
- Tabla 10.45. Comparación binaria entre alternativas según Rendimiento, a Maximizar
- Tabla 10.46. Comparación binaria según Disponibilidad de recursos, a Maximizar
- Tabla 10.47. Comparación binaria entre alternativas según Inversión inicial, a Minimizar
- Tabla 10.48. Comparación binaria entre alternativas según Coste materia prima, a Minimizar
- Tabla 10.49. Comparación binaria entre alternativas según Pay-back, a Minimizar
- Tabla 10.50. Comparación binaria entre alternativas según Ingresos, a Maximizar
- Tabla 10.51. Comparación binaria entre alternativas según Costes, a Minimizar
- Tabla 10.52. Prioridades locales de las comparaciones binarias de las alternativas, “ $r_{ij}$ ”
- Tabla 10.53. Ratios de consistencia de cada criterio
- Tabla 10.54. Prioridades locales, vector final para el ranqueo (continua)
- Tabla 10.55. Prioridades locales, vector final para el ranqueo (continuación)
- Tabla 10.56. Clasificación de las alternativas
- Tabla 10.57. Matriz de decisión normalizada
- Tabla 10.58. Matriz de decisión normalizada ponderada
- Tabla 10.59. PIS y NIS
- Tabla 10.60. Medida de distancia a la PIS
- Tabla 10.61. Medida de distancia a la NIS

Tabla 10.62. Proximidad relativa de las alternativas

Tabla 10.63. Valores numéricos asociados a las etiquetas lingüísticas de 9 conjuntos difusos

Tabla 10.64. Pesos normalizados de la importancia de los criterios

Tabla 10.65. Valoración de las alternativas respecto a los subcriterios, normalizados para conjuntos difusos

Tabla 10.66. Información lingüística del problema de decisión

Tabla 10.67. Matriz de decisión, etiquetado fuzzy (continua)

Tabla 10.68. Matriz de decisión, etiquetado fuzzy (continuación)

Tabla 10.69. Matriz de decisión normalizada, etiquetado fuzzy (continua)

Tabla 10.70. Matriz de decisión normalizada, etiquetado fuzzy (continuación)

Tabla 10.71. Matriz ponderada normalizada fuzzy (continua)

Tabla 10.72. Matriz ponderada normalizada fuzzy (continuación)

Tabla 10.73. Solución ideal positiva y negativa (continua)

Tabla 10.74. Solución ideal positiva y negativa (continuación)

Tabla 10.75. Valores de las distancias a las alternativas ideal y anti-ideal

Tabla 10.76. Coeficientes de proximidad

Tabla 10.77. Alternativas y salidas lingüísticas

### **10.7.2. Textos**

[94] “Integración de criterios medioambientales en procesos de decisión: una aproximación multicriterio a la planificación integrada de recursos eléctricos”. Pedro Linares Llamas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.

[http://oa.upm.es/766/1/PEDRO\\_LINARES\\_LLAMAS.pdf](http://oa.upm.es/766/1/PEDRO_LINARES_LLAMAS.pdf)

[95] “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica: Aplicando Métodos de Relaciones de Superación”. Proyecto Fin de Carrera. Carlos Baldasquín Cáceres. Universidad Politécnica de Cartagena.

[96] <http://www.revistaespacios.com/a06v27n01/06270142.html>

[97]\_“Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica”. PFC. Mario Bastida Dólera. PFC. Director Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

# Capítulo 11. Código y Conclusiones.

---

Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica

# CAPÍTULO 11: CÓDIGO Y CONCLUSIONES

## 11.1. Código de Excel

### 11.1.1. Código de AHP Fuzzy

Todos los cálculos que se van a desarrollar a continuación corresponden a los realizados para el primer término, por lo tanto de con estos pasos podemos desarrollar los cálculos de los demás términos, para llegar a la clasificación final.

#### Establecimiento de las prioridades entre los criterios

<b>C<sub>11</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>			<b>A<sub>2</sub></b>			<b>A<sub>3</sub></b>		
<b>A<sub>1</sub></b>	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4	I4	J4
<b>C<sub>11</sub></b>	<b>A<sub>4</sub></b>			<b>A<sub>5</sub></b>			<b>A<sub>6</sub></b>		
<b>A<sub>1</sub></b>	K4	L4	M4	N4	O4	P4	Q4	R4	S4

<b>C<sub>11</sub></b>	<b>A<sub>1</sub></b>			<b>A<sub>2</sub></b>			<b>A<sub>3</sub></b>		
<b>A<sub>1</sub></b>	0'35	0'5	0'65	0'65	0'8	0'95	0'55	0'65	0'75
<b>C<sub>11</sub></b>	<b>A<sub>4</sub></b>			<b>A<sub>5</sub></b>			<b>A<sub>6</sub></b>		
<b>A<sub>1</sub></b>	0'8	1	1	0'8	1	1	0'55	0'65	0'75

Tabla 11.1. Prioridades entre los criterios

#### Prioridades locales de las comparaciones binarias de las alternativas

A<sub>1</sub> para C<sub>11</sub>, se calcula como se indica a continuación, y de ese modo calcularemos los demás subcriterios;

$$\text{Autovectores } (\prod_j r_{ij})^{1/n}$$

$$A_1(C_{11}) = (B49 / (\text{SUMA}(\$D\$49:\$D\$54)), (C4 * F4 * I4 * L4 * O4 * R4)^{(1/6)}, (D4 * G4 * J4 * M4 * P4 * S4)^{(1/6)}) = (0'594266, 0'743557, 0'838416)$$

$$\text{Autovectores normalizados: Prioridades locales de los criterios, } r_{ij} \frac{(\prod_j r_{ij})^{1/n}}{\sum_i (\prod_j r_{ij})^{1/n}}$$

$$A_1(C_{11}) = (B49 / (\text{SUMA}(\$D\$49:\$D\$54)), C49 / (\text{SUMA}(\$C\$49:\$C\$54)), D49 / (\text{SUMA}(\$B\$49:\$B\$54))) = (0'168165, 0'310156, 0'486483)$$

$$\text{Índice de consistencia (IC) y Ratio de consistencia (RC); } CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI} < 0,10$$

Para el cálculo del IC, se coge el valor central del intervalo de  $\lambda_{max}$  difuso. Lo calculamos para

$A_1 (W_{11}) = A_1 (C_{11} * r_{i1})$ , y de ese modo calcularemos los demás subcriterios;

$$A_1 (W_{11}) = A_1 (C_{11} * r_{i1}) = ((B4 * B59 + E4 * B60 + H4 * B61 + K4 * B62 + N4 * B63 + Q4 * B64), (C4 * C59 + F4 * C60 + I4 * C61 + L4 * C62 + O4 * C63 + R4 * C64), (D4 * D59 + G4 * D60 + J4 * D61 + M4 * D62 + P4 * D63 + S4 * D64)) = (0'239200, 0'626618, 1'646362)$$

$$\lambda_{\max} (C_{11}) = ((B73/D59 + B74/D60 + B75/D61 + B76/D62 + B77/D63 + B78/D64)/6, (C73/C59 + C74/C60 + C75/C61 + 0 + 0 + C78/C64)/6, (D73/B59 + D74/B60 + D75/B61 + 0 + 0 + D78/B64)/6) = (0'234401, 1'224878, 8'955607)$$

**Vector final para el ranking**  $p_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot r_{ij}) \quad \tilde{A} = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$

Prioridades globales,  $p_i$  para  $A_1$  será;

$$A_1 (p_i) = ((B57 * B59 + E57 * E59 + H57 * H59 + K57 * K59 + N57 * N59 + Q57 * Q59 + T57 * T59 + W57 * W59 + Z57 * Z59 + AC57 * AC59 + AF57 * AF59 + AI57 * AI59 + AL57 * AL59 + AO57 * AO59), (C57 * C59 + F57 * F59 + I57 * I59 + L57 * L59 + O57 * O59 + R57 * R59 + U57 * U59 + X57 * X59 + AA57 * AA59 + AD57 * AD59 + AG57 * AG59 + AJ57 * AJ59 + AM57 * AM59 + AP57 * AP59), (D57 * D59 + G57 * G59 + J57 * J59 + M57 * M59 + P57 * P59 + S57 * S59 + V57 * V59 + Y57 * Y59 + AB57 * AB59 + AE57 * AE59 + AH57 * AH59 + AK57 * AK59 + AN57 * AN59 + AQ57 * AQ59)) = (0'311532, 0'787159, 2'807138)$$

Desfuzzificar pesos (A), para  $A_1$  será;

$A_1 = ((B94 + 2 * C94 + D94)/4) = 1'173247$  en la clasificación ocupa la posición **5º** y se corresponde a la **Eólica**

De la forma que hemos indicado para la primera alternativa ( $A_1$ ), así se calcularán para las demás alternativas, siguiendo los pasos realizados.

### 11.1.2. Código de Topsis Fuzzy

Todos los cálculos que se van a desarrollar a continuación corresponden a los realizados para el primer término, por lo tanto de con estos pasos podemos desarrollar los cálculos de los demás términos, para llegar al clasificación final.

### Matriz de decisión

Pesos  $C_{11}$  (MIN) = (B3, C3, D3) = (0'1189, 0'1911, 0'3196)

$A_1$  ( $C_{11}$ ) = (B6, C6, D6) = (0'8, 1, 1)

### Matriz de decisión normalizada, $n_{ij}$

$n_{ij}$  ( $C_{11}$ ) = ( $n_{11}$ ,  $n_{12}$ ,  $n_{13}$ ) =  
( $B6/(\text{RAIZ}((D6^2)+(D7^2)+(D8^2)+(D9^2)+(D10^2)+(D11^2)+(D12^2)+(D13^2)+(D14^2)+(D15^2)+(D16^2)+(D17^2)+(D18^2)+(D19^2)+(D20^2)))$ ),  
 $C6/(\text{RAIZ}((C6^2)+(C7^2)+(C8^2)+(C9^2)+(C10^2)+(C11^2)+(C12^2)+(C13^2)+(C14^2)+(C15^2)+(C16^2)+(C17^2)+(C18^2)+(C19^2)+(C20^2)))$ ),  
 $D6/(\text{RAIZ}((B6^2)+(B7^2)+(B8^2)+(B9^2)+(B10^2)+(B11^2)+(B12^2)+(B13^2)+(B14^2)+(B15^2)+(B16^2)+(B17^2)+(B18^2)+(B19^2)+(B20^2)))$ ) = (**0'298661, 0'429042, 0'536441**)

### Matriz de decisión normalizada ponderada, $v_{ij}$

$v_{ij}$  ( $C_{11}$ ) = ( $v_{11}$ ,  $v_{12}$ ,  $v_{13}$ ) = ( $\$B\$3*\$B23$ ,  $\$C\$3*\$C23$ ,  $\$D\$3*\$D23$ ) = (**0'035510, 0'081989, 0'171446**)

$(v_{1j}-v_j^+)^2 = ((B39-\$D\$55)^2, (C39-\$C\$55)^2, (D39-\$B\$55)^2) = (1'4920*10^{-6}, 0'006722, 0'029394)$

$(v_{1j}-v_j^+)^2 = ((B39-\$D\$56)^2, (C39-\$C\$56)^2, (D39-\$B\$56)^2) = (0'018478, 0, 0'018478)$

### Solución ideal positiva, $A^+$ y solución ideal negativa, $A^-$

$A^+$  ( $C_{11}$ ) = (MIN(B39:B53), MIN(C39:C53), MIN(D39:D53)) = (**0, 0, 0'034289**)

$A^-$  ( $C_{11}$ ) = (MAX(B39:B53), MAX(C39:C53), MAX(D39:D53)) = (**0'035510, 081989, 0'171446**)

**Proximidad relativa de las alternativas,  $RA_1$**   $R_{A1} = \frac{d-A1}{(d+A1)+(d-A1)}$

**d-A1 (C<sub>11</sub>) =**  
 (RAIZ(SUMA(B90;E90;H90;K90;N90;Q90;T90;W90;Z90;AC90;AF90;AI90;AL90;AO90)),  
 RAIZ(SUMA(C90;F90;I90;L90;O90;R90;U90;X90;AA90;AD90;AG90;AJ90;AM90;AP90)),  
 RAIZ(SUMA(D90;G90;J90;M90;P90;S90;V90;Y90;AB90;AE90;AH90;AK90;AN90;AQ90))) = (0'541222, 0'165218, 0'475218)

**d+A1 (C<sub>11</sub>) =**  
 (RAIZ(SUMA(B58;E58;H58;K58;N58;Q58;T58;W58;Z58;AC58;AF58;AI58;AL58;AO58)),  
 RAIZ(SUMA(C58;F58;I58;L58;O58;R58;U58;X58;AA58;AD58;AG58;AJ58;AM58;AP58)),  
 RAIZ(SUMA(D58;G58;J58;M58;P58;S58;V58;Y58;AB58;AE58;AH58;AK58;AN58;AQ58))) = (0'509399, 0'310670, 0'575458)

**((d+A1) + (d-A1)) (C<sub>11</sub>) = (B74+B106, C74+C106, D74+D106) = (1'050621, 0'475888, 1'050677)**

**RA<sub>1</sub> (C<sub>11</sub>) = (B106/H106, C106/G106, D106/F106) = (0'515117, 0'347178, 0'452321)**

**Defuzzificación, IA<sub>1</sub>**

**IA<sub>1</sub> (C<sub>11</sub>) = ((S117\*L106) + ((1-T117)\*S117\*M106) + ((1-T117)\*(1-S117)\*K106)) = 0'496230** corresponde a la 5º posición de la clasificación, es decir a la **Energía Eólica**

## 11.2. Conclusiones del estudio realizado

En la siguiente tabla 11.1 podemos observar los resultados obtenidos mediante los compañeros Mario y Carlos, en el estudio de años anteriores, para los métodos clásicos que en este estudio aplicamos, además de la ampliación del estudio, viendo el efecto causado mediante métodos fuzzy en el resultado;

	<b>Mario Bastida (Abril de 2011)</b>	<b>Carlos Baldasquín (Septiembre de 2011)</b>	<b>María Jesús Mellinas (Septiembre de 2012)</b>
<b>Método AHP Clásico</b>	1° Micro-Cogeneración 2° Micro-Trigeneración 3° Eólica 4° Biomasa 5° Solar Fotovoltaica		1° Micro-Cogeneración 2° Micro-Trigeneración 3° Solar Fotovoltaica 4° Eólica 5° Biomasa 6° Solar Termoeléctrica
<b>Método Topsis Clásico</b>		1° Biomasa 2° Micro-Cogeneración 3° Micro-Trigeneración 4° Eólica 5° Solar Fotovoltaica 6° Solar Termoeléctrica	1° Micro-Cogeneración 2° Biomasa 3° Micro-Trigeneración 4° Eólica 5° Solar Fotovoltaica 6° Solar Termoeléctrica
<b>Método AHP Fuzzy</b>			1° Micro-Cogeneración 2° Micro-Trigeneración 3° Solar Fotovoltaica 4° Biomasa 5° Eólica 6° Solar Termoeléctrica
<b>Método Topsis Fuzzy</b>			1° Eólica 2° Micro-Cogeneración 3° Micro-Trigeneración 4° Biomasa 5° Solar Termoeléctrica 6° Solar Fotovoltaica

**Tabla 11.1. Comparación de resultados de estudios anteriores con el presente estudio**

Como podemos observar en la tabla 11.1, la actualización de los datos no ha alterado mucho el resultado final, siendo los resultados obtenidos con los métodos clásicos, muy similares a los obtenidos por los compañeros Mario y Carlos en estudios anteriores.

Los resultados obtenidos con los métodos fuzzy, con respecto a los métodos clásicos, como podemos observar en la tabla, curiosamente se obtiene el mismo resultado, por lo que la precisión obtenida por métodos difusos es la misma que por los métodos clásicos, cosa que nos llama la atención curiosamente.

Como conclusión final, como vemos en la tabla 11.1 la Micro-cogeneración ocupa los primeros puestos de la clasificación de tecnologías que proponemos como alternativas de estudio. Esto es debido principalmente a la independencia y autonomía que otorga a la instalación el hecho de que el combustible sea gas natural, de tal manera que la continuidad en el suministro de energía eléctrica a los usuarios está garantizada. Basta con tener almacenado el fuel en un tanque o en un depósito en condiciones adecuadas y prever las reservas.

Además, la micro-cogeneración genera varios puestos de trabajo entre directos e indirectos. También es relevante el hecho de que no genera ruidos y que el espacio que necesita el módulo es muy reducido. La madurez de esta tecnología está probada puesto que la cogeneración lleva ya varios años en funcionamiento en todo el mundo, y concretamente en España.

En cuanto a la energía eólica, cuenta con muchísimos ejemplos locales en la Región. Sin embargo, depende de que la climatología sea favorable, y la zona en la que quiere instalarse el parque no se caracteriza por tener grandes rachas de viento, lo cual le resta enteros. Además, tampoco genera tanto empleo como las otras alternativas, y depende de las subvenciones que el Estado esté en condiciones de otorgar. No llega a ser como en el caso de la energía solar, pero está muy castigada también.

En cuanto a la energía solar térmica, es cierto que es de obligatorio cumplimiento su implementación en los edificios de nueva construcción según el Código Técnico de la Edificación (CTE). Pero en los edificios ya existentes no es así, aunque sea recomendable, por lo que realmente estamos hablando de otro sector perjudicado por la “burbuja inmobiliaria” que también sufrimos en nuestro país.

Otro apunte en contra de la energía solar es el bajísimo rendimiento de las placas solares fotovoltaicas: el 15 % aproximadamente. Es claramente inferior a los de las otras opciones. El segundo rendimiento más bajo es el de la energía eólica, de un 50 %. También es la tecnología que precisa de más tiempo de Pay-back: 9 años.

### **11.3. Líneas de investigación futuras**

Tras el presente estudio, observamos que en el método Topsis Fuzzy, la variación de  $\beta$ , “índice de modalidad que representa la importancia del valor” y  $\lambda$  “grado de optimismo del decisor” para el proceso de defuzzificación, tras hacer diferentes pruebas comprobamos que no alteraba la clasificación obtenida. Así que se convierte en un posible camino de investigación futura, ya que resulta extraño que ambos factores no afecten de ninguna forma al estudio realizado.

Por lo tanto, una línea de investigación que quedaría abierta sería analizar el grado de optimismo de los diferentes expertos, y como podría influir en el resultado. Así como volver a estudiar los pesos iniciales, a partir de los diferentes expertos, ya que en nuestro estudio cogimos los de referencia de estudios anteriores, y un posible camino de investigación podría ser ver su repercusión en el resultado final.

