
Optimización bajo incertidumbre

Andrés Ramos, Antonio Alonso-Ayuso, Gloria Pérez (eds.)

Red Temática de Optimización bajo Incertidumbre (ReTOBI)
<http://www.optimizacionbajoincertidumbre.org/>

Índice general

Prólogo	XIII
I Teoría	1
1. Introducción	3
2. Ejemplos de aplicación	9
2.1. Características de problemas estocásticos multiperiodo	10
2.2. Revisión de carteras	11
2.3. Modelo de bonos	11
2.4. Modelo de gestión de activos y pasivos	12
2.5. Planificación de la producción	13
2.6. Planificación de la expansión de sistemas de generación de energía eléctrica	14
2.7. Planificación de generación de energía hidrotérmica	15
2.8. Control de fundición: optimización de costes	16
3. Modelización estocástica	19
3.1. Problemas lineales deterministas	20
3.2. Problemas lineales estocásticos	21
3.3. Espacios de probabilidad y variables aleatorias	22
3.4. Decisiones y tipos de recurso	24
3.5. Principio de <i>no anticipatividad</i>	25

3.6. Modelo determinista equivalente	28
3.7. Modelos estocásticos y propiedades	32
3.8. Caracterización de las soluciones estocásticas	36
3.9. Introducción al riesgo y sus medidas	41
II Métodos de resolución	43
4. Métodos de resolución para programación lineal	45
4.1. Descomposición de Benders	46
4.2. Descomposición de Dantzig-Wolfe	53
4.3. Relajación lagrangiana	58
4.4. Descomposición Primal-Dual	63
4.5. Descomposición anidada	64
4.6. Descomposición lagrangiana aumentada	69
5. Métodos de resolución para programación entera mixta	73
5.1. Branch-and-Bound	74
5.2. BFC. Definiciones y esquema algorítmico	76
5.3. BFC y descomposición lagrangiana para problemas 0-1 mixtos	79
5.4. Procedimiento heurístico miope	93
5.5. FRC para programación estocástica entera	94
5.6. Metodología heurística de programación dinámica estocástica	101
III Casos de aplicación	113
6. Selección de carteras	115
6.1. Solución no anticipativa. Modelo estocástico	119
6.2. Caso de estudio	121
6.3. Valor de la información perfecta y valor de la solución estocástica	126
6.4. Estrategia de inmunización	130
6.5. Apéndice A	130
6.6. Apéndice B	135
7. Planificación agrícola	139
8. Planificación a medio plazo de la generación eléctrica	149
8.1. Introducción	149
8.2. Planificación de la explotación	150
8.3. Papel de la incertidumbre	153
8.4. Modelo de planificación de la explotación a medio plazo	157
8.5. Caso ejemplo de modelo estocástico	167
8.6. Conclusiones	174
9. Contratación a plazo para productores eléctricos: Ejemplo	177
9.1. Mercados de energía eléctrica y contratación a plazo	177
9.2. Caso ejemplo	180
9.3. Resumen	184

10. Sector químico: problema	187
10.1. Conversaciones con tu jefe	188
10.2. Análisis previo	189
10.3. Modelo utilizado	195
10.4. Representación del modelo en un lenguaje de ordenador	200
10.5. Análisis de los resultados	204
10.6. Planteamientos alternativos	205
IV Aplicaciones prácticas en la industria	207
11. Finanzas. Estructuración de una cartera de títulos financieros	209
11.1. Modelo financiero bajo un escenario	211
11.2. Modelo estocástico bietapa 0–1 mixto	221
11.3. Esquema algorítmico	224
11.4. Caso ilustrativo	243
11.5. Experiencia computacional	248
11.6. Conclusiones	257
11.7. Apéndice 1. Técnica binomial reticular	258
11.8. Apéndice 2. Duración de Macaulay	260
11.9. Apéndice 3. Convexidad	264
12. Problema estocástico de secuenciación y planificación	267
12.1. Definición del problema	269
12.2. Modelo determinista equivalente	271
12.3. Reforzamiento del modelo	276
12.4. Resultados computacionales	278
12.5. Conclusiones	281
13. Planificación de la producción bajo incertidumbre	287
13.1. Definición del problema	287
13.2. Modelo 0-1 mixto desagregado con recurso total	288
13.3. Modelo 0-1 mixto agregado con recurso total	291
13.4. Experiencia computacional	292
13.5. Conclusiones	295
14. Modelo hidrotérmico detallado	307
14.1. Introducción	307
14.2. Descomposición en forma de L	308
14.3. Descomposición de Benders multietapa	310
14.4. Programación dinámica dual estocástica	313
14.5. Resultados numéricos	320
14.6. Conclusiones	327
15. Modelado de la generación eólica en la planificación de la generación a medio plazo en un mercado liberalizado	329
15.1. Introducción	329
15.2. Planificación de la generación eléctrica a medio plazo	331
15.3. Estocasticidad en el medio plazo	339
15.4. Mercado eléctrico	342
15.5. Ejemplo de aplicación	349

15.6. Conclusiones	356
16. Contratación a plazo para productores eléctricos: Modelo detallado	359
16.1. Modelo	359
16.2. Formulación detallada	362
16.3. Caso de estudio	365
16.4. Conclusiones	370
17. Distribución de hidrocarburos	373
17.1. Problema	373
17.2. Datos	374
17.3. Modelo utilizado	377
17.4. Representación del modelo en un lenguaje de ordenador	382
17.5. Análisis de los resultados	387
18. Problema estocástico de rutas de vehículos	389
18.1. Problemas de Rutas de Vehículos Estocásticos	389
18.2. Problema de entregas con demandas estocásticas	393
18.3. Problemas de recogidas y entregas con demandas estocásticas	402
19. Manejo de pesquerías. Cuotas de captura	405
19.1. Introducción.	405
19.2. Pesquería del langostino colorado	406
19.3. Modelo de Programación Estocástica	408
19.4. Resultados	410
19.5. Comentarios finales	412
V Software	415
20. OLE-G: Optimizador Lineal Estocástico orientado a Grid	417
20.1. Entornos grid	418
20.2. Descomposición por escenarios completos	421
20.3. Descripción de la herramienta OLE-G	428
20.4. Caso ejemplo	430
20.5. Conclusiones	434
Bibliografía	437

Índice de figuras

3.1. Árbol de escenarios	23
3.2. Principio de <i>no anticipatividad</i>	26
3.3. Grupos de escenarios	27
3.4. Estructura de la formulación compacta	30
3.5. Estructura de la formulación extendida	31
5.1. Esquema de Ramificación y Fijación Coordinado,BFC	78
5.2. Niveles FR	98
5.3. Árbol de escenarios multi periodo	104
5.4. Curvas <i>EFV</i>	106
5.5. Árbol de escenarios multiperiodo, 3 etapas	110
5.6. Árbol de escenarios multi periodo, etapa $e = 1$	111
6.1. Árbol de escenarios. Selección de carteras	122
8.1. Ejemplo de la curva horaria de la demanda programada y real (www.ree.es).	150
8.2. Ejemplo de árbol de escenarios binario de tres etapas	156
8.3. Demanda horaria de una semana y diferenciación por tipo de hora.	159
8.4. Monótonas de carga de cada subperíodo.	159
8.5. Coherencia de arranques-acoplamiento-paradas en el modelo de medio plazo.	161
8.6. Curva <i>input-output</i> de un grupo térmico que permite obtener el gasto de combustible expresado en termias por hora, en función de la potencia bruta producida.	162

8.7. Modelo agregado de una cuenca hidráulica.	164
8.8. Estructura del árbol de escenarios empleado en el caso ejemplo.	168
8.9. Aportaciones del árbol de escenarios de la hidráulica regulable.	169
8.10. Aportaciones del árbol de escenarios de la hidráulica fluyente.	169
8.11. Gráfico de tecnologías empleadas para cubrir la demanda en el escenario más seco.	170
8.12. Gráfico de tecnologías empleadas para cubrir la demanda en un escenario de aportaciones medias.	171
8.13. Gráfico de tecnologías empleadas para cubrir la demanda en el escenario más húmedo.	171
9.1. Ejemplo de árbol de escenarios.	179
9.2. Marco de decisión bietapa para un productor de energía eléctrica que participa en los mercados a plazo y diario.	180
9.3. Beneficio esperado y variabilidad del mismo.	181
9.4. Ejemplo: frontera eficiente entre el valor esperado y la desviación típica del beneficio.	184
10.1. Superestructura del proceso	190
11.1. Ejemplo con tres variables binarias y dos escenarios	226
11.2. Esquema de Ramificación-y-Fijación Coordinada, BFC	227
11.3. Esquema algorítmico de la Descomposición de Benders	235
11.4. Algoritmo Ramificación-y-Fijación Coordinada, BFC	241
11.5. Tipo de interés r_t^ω	243
11.6. Algoritmo <i>BFC-DB</i> en ejemplo ilustrativo	248
11.7. <i>BFC</i> vs <i>OSL</i> y <i>BFC^B</i> vs <i>OSL</i> , caso P6	255
11.8. <i>BFC</i> vs <i>OSL</i> y <i>BFC^B</i> vs <i>OSL</i> , caso P9	256
11.9. Comparación, en términos de tiempo de CPU, en 15 problemas estocásticos de dos etapas	257
11.10. Comparación, en términos de tiempo de CPU, en 10 problemas estocásticos de dos etapas	258
11.11. Técnica binomial reticular	259
11.12. Relación variación precios-tipos de interés	265
12.1. Árbol de escenarios	270
14.1. Árbol de escenarios.	311
14.2. Árbol de escenarios recombinante.	312
14.3. Árbol de escenarios recombinante.	315
14.4. Árbol de escenarios recombinante.	316
14.5. Escenario resuelto en la pasada hacia adelante de la SDDP.	319
14.6. Nodos resueltos en la pasada hacia atrás de la SDDP.	319
14.7. Árboles recombinantes para 2 y 4 escenarios.	323
14.8. Árboles recombinantes para 8 y 16 escenarios.	323
14.9. Árboles recombinantes para 32 y 64 escenarios.	324
14.10. Evolución SDDP.	324
14.11. Evolución SDDP.	325
14.12. Evolución SDDP.	325
15.1. Embalse de salto constante y red hidráulica replicada equivalente	332
15.2. Carga horaria (arriba) y monótona de cargas (abajo) que es más fácil de predecir	334
15.3. MC (línea punteada) y monótona de generaciones de una semana en un caso real con 32 unidades	337

ÍNDICE DE FIGURAS

15.4. Monótona de generación y generación eólica correspondiente (izquierda) y monótona de generación eólica y estimación de la potencia cuya probabilidad de ser constante es del 10 % (derecha).	338
15.5. Árbol de escenarios completo para un problema con cuatro subperíodos y tres niveles	340
15.6. Carga casada horaria y precio de mercado, y función de precio de mercado según duración de la carga	344
15.7. Función de precio de mercado respecto a duración de la carga para un subperíodo y remuneración de la generación de la unidad j .	345
15.8. Media móvil semanal de precio de mercado (línea) y generación hidráulica (área) durante 2007 en España	346
15.9. Serie de precios ordenada según carga decreciente (MC) y ajuste lineal para cada subperíodo.	351
15.10 Datos usados para generar escenarios hidráulicos.	351
15.11 Árbol completo: 4 subperíodos, 3 niveles y 27 escenarios (nudos hoja).	351
15.12 Monótonas de generación eólica en cada subperíodo y unidad estimada.	352
15.13 Monótonas de carga en cada subperíodo una vez rebajada la parte aleatoria de la generación eólica.	353
15.14 Árbol de escenarios de barras apiladas para cada nudo. Cada fila representa un subperíodo.	354
15.15 Variación de la generación hidráulica según los subperíodos.	355
15.16 Histograma de beneficios y valor de la solución esperada.	355
16.1. Beneficio esperado óptimo en función de su desviación típica	365
16.2. Precios del mercado diario y precios de los contratos a plazo.	368
16.3. Beneficio esperado en función del número de escenarios.	368
16.4. Potencia contratada en el mercado a plazo ($\beta = 0$).	369
16.5. Evolución de la potencia contratada en el mercado a plazo a medida que el riesgo cobra mayor relevancia.	369
16.6. Evolución del beneficio esperado en función de la desviación típica del beneficio.	370
17.1. Mapa de situación de elementos productivos	374
18.1. Ejemplo del Vendedor de Aguas	395
18.2. Solución del Ejemplo del Vendedor de Aguas para el Escenario 1	396
18.3. Solución del Ejemplo del Vendedor de Aguas para el Escenario 2	396
18.4. Solución del Ejemplo del Vendedor de Aguas para el Escenario 3	397
18.5. Solución Estocástica del Ejemplo del Vendedor de Aguas	397
20.1. Descomposición por escenarios completos del árbol de escenarios ejemplo	423
20.2. Aproximación de la función de recurso (1ª etapa)	423
20.3. Aproximación de la función de recurso (2ª etapa)	424
20.4. Propagación de soluciones en la descomposición por escenarios completos	428
20.5. Árbol de 16 escenarios para el problema de coordinación hidrotérmica	430
20.6. Estructura en bloques de la matriz de restricciones (detalle)	431
20.7. Descomposición por escenarios del árbol de escenarios ejemplo	432
20.8. Cronograma de la descomposición por escenarios parciales en el grid con un árbol de ocho escenarios	433
20.9. Cronograma de la descomposición por escenarios completo en el grid con un árbol de ocho escenarios	433
20.10 Cronograma de la descomposición por escenarios parciales en el grid con un árbol de 16 escenarios	434

20.11 Cronograma de la descomposición por escenarios completos en el grid con un árbol de 16 escenarios	435
--	-----

Índice de cuadros

8.1. Decisiones de operación y de mercado para diferentes alcances temporales.	151
8.2. Decisiones de gasto de la hidráulica regulable para el primer período de cada escenario individual y el problema estocástico	172
9.1. Ejemplo: escenarios de precios del mercado diario (€/MWh).	182
9.2. Ejemplo: datos de la unidad de generación.	182
9.3. Ejemplo: datos de los contratos a plazo.	183
9.4. Ejemplo: potencia contratada mediante contratos a plazo (MW).	183
9.5. Ejemplo: energía generada/vendida en el mercado diario (MWh).	183
9.6. Ejemplo: valor esperado y desviación típica del beneficio.	184
10.1. Precios y composiciones de materias primas	191
10.2. Precios, composiciones y límites de ventas	191
10.3. Costes fijos del reactor R1	192
10.4. Costes variables y límites del nivel de funcionamiento del reactor R1	192
10.5. Coeficientes de funcionamiento del reactor R1	193
10.6. Fracción máxima de nivel de funcionamiento convertido en el reactor R1	193
10.7. Costes fijos de la columna de destilación D1	194
10.8. Costes variables y límites del nivel de funcionamiento de la columna de destilación D1	194
10.9. Coeficientes de funcionamiento de la columna de destilación D1	195
10.10 Modos de funcionamiento de las unidades del proceso	204
10.11 Producciones del proceso	205
10.12 Comparación de resultados deterministas y estocásticos	205

11.1. Dimensiones del banco de pruebas	250
11.2. Dimensiones del Modelo Determinista Equivalente	250
11.3. Dimensiones de los modelos por <i>racimos</i> de escenarios	251
11.4. Dimensiones de los modelos por escenario	251
11.5. Solución estocástica	252
11.6. Esfuerzo computacional	253
11.7. Solución inicial alternativa	254
11.8. Ejecución del esquema <i>BFC</i> , caso P6	255
11.9. Ejecución del esquema <i>BFC</i> , caso P9	256
12.1. Dimensiones de las instancias	279
12.2. Dimensiones del Modelo Determinista Equivalente MDE	282
12.3. Solución Estocástica. $q=16$ <i>clusters</i> (<i>racimos</i>) de escenarios	283
12.4. Dimensiones del Modelo por <i>clusters</i> (<i>racimos</i>) de Escenarios	284
12.5. Solución estocástica variando el valor del parámetro q	285
13.1. Dimensiones del problema. Caso estocástico	292
13.2. Dimensiones de los modelos. Caso estocástico	292
13.3. Resultados con CPLEX. Caso estocástico	296
13.4. Dimensiones del problema. Caso determinista.	297
13.5. Dimensiones de los modelos. Caso determinista.	297
13.6. Resultados CPLEX. Caso determinista.	298
13.7. Dimensiones del problema. 1er grupo de instancias	299
13.8. Dimensión MDE. 1er grupo de instancias	300
13.9. Solución. 1er grupo de instancias	301
13.10 Dimensiones subproblemas MIP	302
13.11 Dimensiones del problema. 2ndo grupo de instancias	302
13.12 Dimensión MDE. 2ndo grupo de instancias	303
13.13 Solución. 2ndo grupo de instancias	304
13.14 Dimensiones del problema. 3er grupo de instancias	305
13.15 Dimensión DEM. 3er grupo de instancias	305
13.16 Solución. 3er grupo de instancias	306
14.1. Comparación de los métodos.	326
15.1. Características técnicas de las unidades	350
15.2. Valores de aportaciones naturales de agua en MWh en cada nudo y probabilidad de ocurrencia.	352
15.3. Beneficios esperados y probabilidad en cada escenario (5942010933 €de media).	356
16.1. Tamaño del problema del productor	364
16.2. Características de la unidades térmicas de generación	366
16.3. Precios de los contratos a plazo consistentes en dos bloques de 70 MW cada uno	367
17.1. Capacidad de producción de crudo estimada	375
17.2. Coste variable de extracción de crudo	375
17.3. Productos fabricados (t/t crudo)	375
17.4. Posibles nuevos oleoductos	376
17.5. Coste variable de transporte por oleoducto	376
17.6. Coste variable y duración de transporte por buque	377

ÍNDICE DE CUADROS

17.7. Precios de venta de productos y crudos	377
17.8. Demanda máxima de productos y crudos	378
17.9. Viajes realizados por los buques	387
20.1. Resultado para coord. hidrotérmica (16 esc. agrupados, ocho equipos)	432
20.2. Resultado para coord. hidrotérmica (16 esc. agrupados, diez equipos)	434

Prólogo

La estocasticidad o incertidumbre aparece en todos los sistemas pero hasta ahora no era posible la solución de problemas de optimización de grandes sistemas considerando explícitamente ésta. La incertidumbre puede deberse a carencia de datos fiables, errores de medida o tratarse de parámetros que representan información sobre el futuro. Por ejemplo, en el caso de planificación de sistemas de energía eléctrica la incertidumbre surge principalmente en: la demanda y precios futuros de la electricidad o de los combustibles, las aportaciones hidráulicas o la disponibilidad de los elementos de generación y red. No toda la incertidumbre se encuentra en el mismo horizonte temporal. En optimización determinista se supone que los parámetros del problema son conocidos con certeza, aunque sea a su valor medio. En optimización estocástica (stochastic optimization SP) se relaja esta condición. No se conocen sus valores, sólo sus distribuciones y habitualmente se supone que éstas son discretas con un número finito de estados posibles. La suposición de distribuciones discretas es habitual en los optimizadores de optimización estocástica. Actualmente no existen aplicaciones estándar o comerciales, potentes y fiables, para resolver problemas estocásticos. Todavía no es un campo en desarrollo. Los tipos de modelos que aparecen en programación lineal estocástica son motivados principalmente por problemas con decisiones de tipo aquí y ahora (here and now), decisiones previas bajo futuro incierto. Esto es, decisiones que deben tomarse basándose en información a priori, existente o supuesta, sobre situaciones futuras sin realizar observaciones adicionales. Recurso es la capacidad de tomar una acción correctora después de que haya ocurrido un suceso aleatorio. Por ejemplo, se toman hoy un conjunto de decisiones con

valores de los parámetros conocidos (es decir, deterministas), durante la noche se producen unos sucesos aleatorios (exógenos) y mañana se toman un conjunto de acciones correctoras que mitigan (corrigen) los efectos de los sucesos aleatorios sobre las decisiones de hoy.

Es habitual encontrarse con situaciones en las que se debe abordar un proceso de toma de decisiones en un entorno no totalmente determinista. Son muchos los casos que podrían ser citados a modo de ejemplo: planificación de la producción, distribución de canales de riego, distribución y gestión de la red eléctrica, logística y planificación de comunicaciones, problemas de localización de plantas o determinados recursos económicos, administración de inversiones en carteras de valores financieros, mercados de divisas, etc.

Todos estos problemas podrían ser abordados despreciando la incertidumbre inherente a cada uno de ellos, pero estaríamos asumiendo el cumplimiento de unas hipótesis que podrían ser violadas en la realidad.

En este texto se aborda el entorno de incertidumbre que rodea a dichos problemas, a través de una disciplina dentro de la optimización denominada *Programación Estocástica vía Análisis de Escenarios*.

Bajo dicho análisis, se determinan un número finito de clases representando las componentes estocásticas de aquellos elementos o parámetros aleatorios del proceso de decisión. Estas clases generan diferentes entornos deterministas del problema a los cuales denominaremos *escenarios*.

El objetivo de este texto es entre otros, profundizar en el estudio de los conceptos, tecnologías y desarrollos algorítmicos que permitan introducir un adecuado tratamiento de la incertidumbre en problemas de programación estocástica. En esta terminología, estocástico es opuesto a determinista y significa que algunos datos del problema pueden ser valores de una variable aleatoria, mientras que el término programación se refiere a que algunas partes del problema pueden ser modeladas como programas lineales o no lineales. Este campo, también conocido como *Optimización bajo Incertidumbre*, se ha desarrollado con contribuciones procedentes de la investigación operativa, economía, matemáticas, probabilidad y estadística.

Dada la amplia variedad de problemas de optimización que se enmarcan en un ambiente de incertidumbre, presentaremos a modo de introducción varios ejemplos sencillos. Estos ejemplos nos servirán para mostrar cómo el tratamiento determinista de este tipo de problemas, conduce en general a resultados poco satisfactorios, incluso desastrosos, dada la incertidumbre implícita en los parámetros que definen el modelo.

En cuanto al entorno de incertidumbre, nos ocuparemos de aquellos casos donde la aleatoriedad radica tanto en los coeficientes de la función objetivo como en los coeficientes de la matriz de restricciones y el término independiente.

Un aspecto importante relativo al tratamiento de la incertidumbre es el modelado del problema en términos de la información disponible a lo largo de cada periodo del horizonte de planificación. En algunos casos, todas las decisiones a tomar deben ser fijadas desde un principio manteniéndose invariables a pesar de que en periodos de tiempo posteriores se disponga de más información sobre el escenario que pueda acaecer. Sin embargo, en

muchos otros casos, correspondientes generalmente a aplicaciones multiperiodo, no es preciso adelantar todas las decisiones a un primer periodo, permitiéndose determinar las decisiones en función del escenario acaecido.

Aunque el proceso de toma de decisiones en un entorno probabilista o estocástico es complejo y computacionalmente costoso, en la actualidad se dispone de algoritmos y métodos de solución bien desarrollados. Esta razón hace que la toma de decisiones bajo incertidumbre pueda ser extendida razonablemente al mundo empresarial.

Este libro se ha concebido para que pueda ser utilizado en múltiples contextos dentro del marco de los objetivos de la Red Temática. Por una parte, como libro de texto o de referencia en los diversos cursos de grado o postgrado que algunos de los miembros de la red imparten. Por otra parte, se ha querido favorecer la difusión de las técnicas de decisión mediante optimización bajo incertidumbre y por ello se han dedicado dos partes del libro: una presenta casos de aplicación sencillos que permiten entender los rudimentos básicos del planteamiento y otra recoge aplicaciones prácticas en la industria en sectores muy diversos. Finalmente, se ha incluido una sección dedicada a desarrollos informáticos que hacen que estas técnicas se puedan utilizar en la resolución de problemas de muy gran tamaño.

Este libro es el resultado de la ayuda del Ministerio de Educación y Ciencia, mediante la acción especial MTM2006-26619-E y del esfuerzo de los numerosos autores que han contribuido a la realización de esta obra conjunta. Nuestro sincero agradecimiento a todos ellos.

ANDRÉS RAMOS, ANTONIO ALONSO-AYUSO, GLORIA PÉREZ

Autores

Víctor M. Albornoz. Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).
Antonio Alonso-Ayuso. Universidad Rey Juan Carlos.
Cristian M. Canales. Instituto de Fomento Pesquero (Chile).
Santiago Cerisola. Universidad Pontificia Comillas.
A. J. Conejo. Universidad de Castilla-La Mancha.
R. García Bertrand. Universidad de Castilla-La Mancha.
D. Eager. University of Edinburgh (Reino Unido).
Laureano F. Escudero. Universidad Rey Juan Carlos.
Javier García-González. Universidad Pontificia Comillas.
María Araceli Garín. Universidad del País Vasco.
Jesús María Latorre. Universidad Pontificia Comillas.
María Merino. Universidad del País Vasco.
R. Mínguez. Universidad de Castilla-La Mancha.
Juan Francisco Monge. Universidad Miguel Hernández.
Narcís Nabona. Universitat Politècnica de Catalunya.
Adela Pagès. Universitat Politècnica de Catalunya.
Rafael Palacios. Universidad Pontificia Comillas.

Gloria Pérez. Universidad del País Vasco.
Celeste Pizarro. Universidad Rey Juan Carlos.
Francisco Quintana. Universidad Politécnica de Madrid.
Andrés Ramos. Universidad Pontificia Comillas.
Carmen Elvira Ramos. Universidad de La Laguna.
Juan José Salazar. Universidad de La Laguna.