



Universitat de Girona

# EVALUACIÓN DE LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE EN CATALUÑA

**Sergio MARTÍNEZ LOZANO**

**ISBN: 978-84-692-5161-4**  
**Dipòsit legal: GI-910-2009**

## TESIS DOCTORAL

# Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña

Sergio Martínez Lozano

Director: Dr. Miquel Rigola Lapeña

Girona, Enero 2009









# ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	xviii
<b>1. PRESENTACIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. Estructura de la Tesis y contenido de los capítulos.....	5
<b>2. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	<b>11</b>
2.1. Motivos del estudio.....	11
2.2. La producción de energía a partir de biomasa en España y previsiones según el PER (2005-2010).....	14
2.3. La producción de energía a partir de biomasa en Cataluña y previsiones según el Pla de l'Energia de Catalunya (2006-2015).....	17
2.3.1. Plantas de biomasa en Cataluña.....	19
2.3.2. Actores relevantes en la implantación de sistemas de producción de energía con biomasa en Cataluña.....	20
2.3.3. Proyectos significativos en el avance de la generación de energía con biomasa en Cataluña.....	21
2.4. Referencias.....	23

<b>3. METODOLOGÍA GENERAL Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....</b>	<b>25</b>
3.1. Investigación bibliográfica.....	25
3.2. Consultas con especialistas y expertos.....	25
3.3. Herramienta de análisis ambiental: “Análisis del Ciclo de Vida”.....	26
3.4. Herramienta de análisis de costes: “Análisis del Coste del Ciclo de Vida”.....	26
3.5. Equipos de laboratorio.....	27
3.6. Modelos de cálculo y programas informáticos utilizados.....	27
3.7. Referencias.....	28
<b>4. ANÁLISIS MULTICRITERIO DEL USO DE LA BIOMASA FORESTAL CON FINES ENERGÉTICOS .....</b>	<b>29</b>
4.1. Introducción y objetivos.....	29
4.2. Etapas de la Evaluación Integrada y desarrollo de las sesiones de trabajo.....	30
4.2.1. Etapa 1: Entradas de Información.....	30
4.2.2. Etapa 2. Integración y participación.....	31
4.2.3. Etapa 3: Resultados de las sesiones de trabajo.....	34
4.3. Resultados en el análisis multicriterio del uso de la biomasa forestal con fines energéticos.....	34
4.3.1. Análisis de la situación de la biomasa forestal a Cataluña.....	34
4.3.2. Principales acciones para la solución de los problemas del sector forestal .....	37
4.3.3. Aspectos a considerar en un potencial aprovechamiento energético de la biomasa forestal en Cataluña.....	38
4.3.4. Análisis categórico sobre los impactos asociados a la implantación de nuevas plantas de producción de energía con biomasa.....	44
4.4. Conclusiones.....	50
4.5. Referencias.....	51

<b>5. CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA DISPONIBLE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN CATALUÑA.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1. Introducción y objetivos.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2. Metodología del estudio.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3. Cuantificación de la biomasa disponible para la generación de energía en Cataluña.....</b>	<b>55</b>
5.3.1. Existencias de biomasa forestal.....	55
5.3.2. Residuos de origen forestal.....	57
5.3.2.1. Residuos susceptibles de aprovechamiento energético en la explotación forestal.....	57
5.3.2.2. Residuos forestales generados en la explotación actual de los bosques.....	58
5.3.2.3. Residuos generados en las industrias forestales.....	59
5.3.3. Residuos de origen agrícola.....	60
5.3.3.1. Residuos generados en la explotación agrícola.....	60
5.3.3.2. Residuos agroindustriales.....	62
5.3.4. Cultivos Energéticos.....	62
5.3.5. Otros residuos industriales.....	62
5.3.5.1. Residuos de instalaciones agropecuarias.....	62
5.3.5.2. Residuos de la industria textil y de la piel.....	63
5.3.5.3. Desechos de carne (harinas).....	64
5.3.6. Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	64
5.3.6.1. Fracción orgánica de los RSU.....	64
5.3.6.2. Residuos de poda y jardinería.....	65
5.3.6.3. Residuos voluminosos de madera.....	65
5.3.6.4. Fracción papel del Combustible Derivado de Residuo (CDR).....	65
5.3.7. Fangos de Depuradora.....	67
<b>5.4. Esquema sobre las rutas de reciclaje/reutilización y disposición de los residuos de biomasa.....</b>	<b>67</b>
<b>5.5. Producción de energía a partir de los residuos de biomasa.....</b>	<b>69</b>
<b>5.6. Conclusiones.....</b>	<b>70</b>

<b>5.7. Referencias.....</b>	<b>73</b>
<b>6. TECNOLOGÍAS PARA EL CULTIVO Y LA COSECHA DE LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS DE COLZA ETÍOPE Y CHOPO.....</b>	<b>75</b>
<b>6.1. Introducción y objetivos.....</b>	<b>75</b>
<b>6.2. Situación de los cultivos energéticos.....</b>	<b>75</b>
6.1.1. Experiencias recientes en el cultivo de la colza etíope.....	76
6.1.2. Experiencias recientes en el cultivo del chopo.....	78
<b>6.2. Operaciones para el cultivo de colza e. y costes asociados.....</b>	<b>79</b>
<b>6.3. Operaciones para el cultivo de colza e. y costes asociados.....</b>	<b>79</b>
<b>6.4. Estado de la tecnología para la cosecha de cultivos energéticos.....</b>	<b>82</b>
6.4.1. Métodos para la cosecha de cultivos energéticos.....	82
6.4.2. Cosechadoras de cultivos energéticos leñosos.....	83
<b>6.5. Conclusiones.....</b>	<b>86</b>
<b>6.6. Referencias.....</b>	<b>88</b>
<b>7. TECNOLOGÍAS PARA LA TRANSFORMACIÓN Y APLICACIONES DE LA BIOMASA.....</b>	<b>91</b>
<b>7.1. Introducción y objetivos.....</b>	<b>91</b>
<b>7.2. Metodología del estudio.....</b>	<b>92</b>
<b>7.3. Tecnologías para la transformación física de la biomasa como combustible.....</b>	<b>92</b>
7.3.1. El astillado.....	92
7.3.2. El peletizado.....	93
7.3.3. El briquetado.....	94
7.3.4. El empacado.....	95
<b>7.4. Valorización directa de la biomasa como combustible.....</b>	<b>95</b>
7.4.1. El proceso de combustión.....	96

7.4.2.	Aplicaciones principales de la combustión de la biomasa.....	97
7.4.3.	Sistemas de almacenado: Plantas de transferencia y silos de biomasa.....	98
7.4.4.	Tecnologías de combustión de pequeña escala.....	99
7.4.5.	Tecnologías de combustión de mediana escala.....	100
7.4.6.	Tecnologías de combustión de gran escala .....	101
7.4.7.	Sistemas de limpieza de gases de combustión.....	103
7.4.7.1.	Sistemas convencionales para el tratamiento de partículas en los gases de combustión	104
7.4.7.2.	Sistemas avanzados para el tratamiento de gases de SO <sub>2</sub> .....	107
7.4.8.	Control de las emisiones atmosféricas .....	109
7.4.8.1.	La simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos.....	109
7.4.8.2.	Administraciones para el control atmosférico de las actividades industriales.....	109
<b>7.5.</b>	<b>Principios y aplicaciones de la gasificación y la pirólisis.....</b>	<b>111</b>
7.5.1.	La gasificación.....	111
7.5.2.	La pirólisis.....	112
<b>7.6.</b>	<b>Tecnologías para la producción de biocombustibles .....</b>	<b>113</b>
7.6.1.	Producción de bioetanol .....	114
7.6.2.	Producción de metanol .....	114
7.6.3.	Producción de biogás.....	114
7.6.4.	Producción de biodiesel .....	116
7.6.5.	Producción de otros biocombustibles líquidos.....	116
<b>7.7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>118</b>
<b>7.8.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>119</b>
<b>8.</b>	<b>ANÁLISIS DE VIABILIDAD DEL SISTEMA DE BIOENERGÍA A PARTIR DE LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS DE COLZA ETÍOPE Y CHOPO.....</b>	<b>123</b>
<b>8.1.</b>	<b>Introducción y objetivos.....</b>	<b>123</b>
<b>8.2.</b>	<b>El sistema de Bioenergía .....</b>	<b>124</b>
<b>8.3.</b>	<b>Escenarios evaluados .....</b>	<b>128</b>
8.3.1.	Escenarios evaluados anteriores a la aprobación de las nuevas tarifas eléctricas...128	

8.3.2.	Escenarios evaluados después de la aprobación de las nuevas tarifas eléctricas....	130
<b>8.4.</b>	<b>Obtención y suministro de la biomasa al punto de consumo .....</b>	<b>131</b>
8.4.1.	Área de cultivo necesaria para el suministro de biomasa.....	131
8.4.2.	Transporte necesario para el suministro de biomasa.....	132
8.4.3.	Costes unitarios para el transporte de biomasa.....	132
8.4.4.	Costes de las operaciones de carga, transporte y descarga.....	133
<b>8.5.</b>	<b>Coste final de la biomasa de colza e. suministrada a una planta de generación eléctrica.....</b>	<b>135</b>
8.5.1.	Coste de producción agrícola y cosecha de colza e. ....	135
8.5.2.	Coste de las operaciones de carga, transporte y descarga de colza e. ....	137
<b>8.6.</b>	<b>Coste final de la biomasa de chopo suministrada a una planta de generación eléctrica.....</b>	<b>138</b>
8.6.1.	Coste de producción agrícola y cosecha de chopo.....	138
8.6.2.	Coste de las operaciones de carga, transporte y descarga de chopo.....	140
<b>8.7.</b>	<b>Inversiones y costes O+M en plantas de generación eléctrica con biomasa</b>	<b>141</b>
8.7.1.	Inversiones .....	141
8.7.2.	Costes O+M y otros costes .....	143
8.7.3.	Generación y disposición de las cenizas .....	144
<b>8.8.</b>	<b>Análisis de viabilidad en la generación eléctrica con cultivos energéticos considerando las tarifas eléctricas del año 2006.....</b>	<b>144</b>
8.8.1.	Ingresos por la venta de la electricidad producida .....	144
8.8.2.	Indicadores económicos .....	145
8.8.3.	Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de colza e.....	145
8.8.3.1.	Costos de explotación de las plantas eléctricas con colza e.....	145
8.8.3.2.	Discusión de los resultados.....	145
8.8.4.	Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de chopo.....	146
8.8.4.1.	Costos de explotación de las plantas eléctricas con chopo.....	146
8.8.4.2.	Discusión de los resultados.....	146

<b>8.9. Análisis de viabilidad en la generación eléctrica con cultivos energéticos considerando las tarifas eléctricas del año 2007</b> .....	148
8.9.1. Ingresos por la venta de la electricidad producida.....	148
8.9.2. Indicadores económicos .....	148
8.9.3. Análisis de sensibilidad.....	149
8.9.4. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de colza e. ....	149
8.9.4.1. Costos de explotación de las plantas eléctricas con colza e. ....	149
8.9.4.2. Discusión de los resultados.....	149
8.9.4.3. Análisis de sensibilidad: Variación de la productividad agrícola de colza e. ....	151
8.9.4.4. Análisis de sensibilidad: Variación de la inversión en planta.....	153
8.9.5. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de chopo.....	153
8.9.5.1. Costos de explotación de las plantas eléctricas con chopo.....	153
8.9.5.2. Discusión de los resultados.....	154
8.9.5.3. Análisis de sensibilidad: Variación de la productividad agrícola de chopo.....	154
8.9.5.4. Análisis de sensibilidad: Variación de la inversión en planta.....	157
<b>8.10. Conclusiones</b> .....	157
<b>8.11. Referencias</b> .....	159
<b>9. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIOMASA DE ELEVADO CONTENIDO EN AZUFRE. ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO RELATIVO A LA EMISIÓN DE SO<sub>2</sub></b> .....	161
<b>9.1. Introducción y objetivos</b> .....	161
<b>9.2. Metodología del estudio</b> .....	163
9.2.1. Co-combustión de carbón con biomasa en la generación eléctrica.....	164
9.2.1.1. Características de las plantas eléctricas con quema de carbón.....	164
9.2.1.2. Características y costes de los combustibles intervenidos en el análisis.....	165
9.2.1.3. Ingresos obtenidos por la venta de electricidad producida.....	165
9.2.1.4. Indicadores económicos.....	166

9.2.2.	La mezcla de combustibles de biomasa en la generación eléctrica.....	166
9.2.2.1.	Mezcla de cultivos energéticos necesaria para evitar un sistema de desulfuración.....	166
9.2.2.2.	Suministro de biomasa en las plantas eléctricas.....	166
9.2.2.3.	Inversiones y costes O+M de las plantas eléctricas con biomasa analizadas.....	167
9.2.2.4.	Ingresos obtenidos por la venta de electricidad producida.....	167
9.2.2.5.	Indicadores económicos.....	168
<b>9.3.</b>	<b>Análisis de viabilidad de las alternativas de combustión en la generación eléctrica con combustibles con alto contenido en azufre.....</b>	<b>168</b>
9.3.1.	Co-combustión de carbón con biomasa .....	168
9.3.1.1.	Costes de explotación de las plantas de co-combustión de carbón y colza e.....	168
9.3.1.2.	Discusión de los resultados.....	168
9.3.2.	La mezcla de combustibles de biomasa .....	170
9.3.2.1.	Costes de explotación de las plantas eléctricas de 25 y 50 MW con biomasa.....	171
9.3.2.2.	Discusión de los resultados.....	172
9.3.3.	Comparación de resultados entre las alternativas propuestas para la combustión...172	
<b>9.4.</b>	<b>Análisis Coste-Beneficio de la desulfuración de los gases de combustión...173</b>	
<b>9.5.</b>	<b>Conclusiones.....175</b>	
<b>9.6.</b>	<b>Referencias.....175</b>	
<b>10.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA BIOMASA DE COLZA</b>	
	<b>(<i>Brassica napus</i>).....177</b>	
<b>10.1.</b>	<b>Introducción y objetivos.....177</b>	
<b>10.2.</b>	<b>Metodología experimental.....179</b>	
10.2.1.	Obtención y preparación de las muestras de biomasa de colza.....	179
10.2.2.	Métodos estandarizados para la caracterización de la biomasa .....	181
10.2.3.	Técnicas y dispositivos experimentales para la caracterización físico-química de la biomasa de colza.....	181
10.2.3.1.	Caracterización elemental (C,H,N,S) .....	181

10.2.3.2. Análisis de elementos: Espectrometría de masas en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) .....	183
10.2.3.3. Análisis de elementos: Espectrometría de emisión atómica en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES) .....	184
10.2.3.4. Análisis Térmico de la biomasa: Termogravimetría (TG) y Análisis Térmico Diferencial (ATD) .....	185
10.2.3.5. Análisis térmico de la biomasa: Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	187
10.2.3.6. Análisis del poder calorífico.....	188
10.2.3.7. Determinación del contenido de cenizas.....	189
10.2.4. Técnicas y dispositivos experimentales para la caracterización físico-química de las cenizas .....	190
10.2.4.1. Análisis elemental (C,H,N,S) .....	190
10.2.4.2. Análisis aproximado de carbonatos: Termogravimetría en cenizas de biomasa.....	190
10.2.4.3. Análisis de elementos: Espectrometría de emisión atómica en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES) .....	191
10.2.4.4. Análisis estructural de las cenizas: Difractómetro de Rayos X de Polvo (DRX) .....	191
10.2.5. Técnicas y dispositivos experimentales para la determinación de la humedad en la biomasa de colza.....	193
<b>10.3. Resultados</b> .....	<b>195</b>
10.3.1. Análisis físico-químico y calorimétrico de la biomasa de colza.....	195
10.3.1.1. Análisis físico-químico de la biomasa de colza .....	195
10.3.1.2. Análisis térmico de la biomasa.....	196
10.3.2. Análisis de las cenizas.....	199
10.3.2.1. Análisis físico-químico y estructural .....	199
10.3.2.2. La gestión eficiente de las cenizas de la biomasa.....	203
10.3.3. Análisis del secado de la biomasa de colza.....	204
10.3.3.1. Estado del estudio del secado de la biomasa residual.....	204
10.3.3.2. Evolución del secado natural del montículo de colza .....	207
10.3.3.3. El secado de la colza en la termobalanza.....	208
<b>10.4. Conclusiones</b> .....	<b>211</b>
<b>10.5. Referencias</b> .....	<b>213</b>

<b>11. USOS ALTERNATIVOS DE LA BIOMASA: CULTIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA. EL CASO PRÁCTICO DEL RICINO.....</b>	<b>217</b>
11.1. Introducción y objetivos.....	217
11.2. Características de la planta del ricino y de su cultivo.....	220
11.3. Proceso y propiedades del aceite de ricino.....	222
11.4. Aplicaciones industriales .....	223
11.5. Mercado del ricino.....	224
11.6. Conclusiones .....	228
11.7. Referencias .....	229
<b>12. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>231</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla II.1.</b> Objetivos energéticos relativos a la biomasa según el PER 2005-2010.....	16
<b>Tabla II.2.</b> Previsiones sobre consumos de energía primaria según el <i>Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015</i> .....	17
<b>Tabla II.3.</b> Organismos y empresas catalanas referentes en el aprovechamiento energético de la biomasa.....	21
<b>Tabla IV.1.</b> Código de puntuación para el análisis categórico .....	44
<b>Tabla V.1.</b> Categorías de biomasa definidas según su origen.....	54
<b>Tabla V.2.</b> Existencias de bosques en Cataluña según el Inventario Forestal Nacional.....	55
<b>Tabla V.3.</b> Superficie forestal de Cataluña según el mapa de cubiertas del suelo empleado en la superposición.....	56
<b>Tabla V.4.</b> Aumento teórico de la biomasa forestal debido al crecimiento arbóreo en los últimos 10 años.....	56
<b>Tabla V.5.</b> Residuos agrícolas herbáceos generados en Cataluña en el 2005.....	61
<b>Tabla V.6.</b> Residuos agrícolas leñosos generados en Cataluña en el 2005.....	61
<b>Tabla V.7.</b> Composición media de los Residuos Sólidos Urbanos .....	66
<b>Tabla V.8.</b> Tratamientos y destinos de los fangos de depuradora generados en Cataluña en el año 2004.....	67
<b>Tabla V.9.</b> Residuos de biomasa disponibles en Cataluña para su valorización energética mediante combustión directa.....	69
<b>Tabla VI.1.</b> Calendario de operaciones agrícolas para el cultivo de colza e.....	79
<b>Tabla VI.2.</b> Coste producción y cosecha de colza e. (€/Mg b.s.).....	79

<b>Tabla VI.3.</b> Calendario de operaciones agrícolas para el chopo.....	80
<b>Tabla VI.4.</b> Contribución de las labores agrícolas sobre el coste final de la biomasa de chopo.....	80
<b>Tabla VI.5.</b> Coste de producción y cosecha del chopo (€/Mg b.s.).....	80
<b>Tabla VI.6.</b> Cosechadoras de cultivos energéticos leñosos de corta rotación utilizadas en Europa...	83
<b>Tabla VI.7.</b> Productividad en la cosecha de cultivos energéticos leñosos con la cosechadora Austoft.....	84
<b>Tabla VI.8.</b> Productividad en la cosecha de cultivos energéticos leñosos con la cosechadora Class Jaguar.....	85
<b>Tabla VII.1.</b> Clasificación de las astilladotas.....	93
<b>Tabla VII.2.</b> Procesos, productos y aplicaciones de la biomasa mediante procesos térmicos.....	96
<b>Tabla VII.3.</b> Características de los sistemas de combustión de pequeña escala.....	100
<b>Tabla VII.4.</b> Características de los ciclones.....	105
<b>Tabla VII.5.</b> Focos emisores y señales recibidas por XEAC.....	110
<b>Tabla VII.6.</b> Principales características de los simuladores de modelos de dispersión atmosférica.....	110
<b>Tabla VII.7.</b> Agentes de gasificación.....	111
<b>Tabla VIII.1.</b> Cálculo de la emisión de SO <sub>2</sub> en la combustión de la colza e. y desulfuración necesaria.....	129
<b>Tabla VIII.2.</b> Costes sobre sistemas de desulfuración de gases de combustión (US\$, 2001).....	129
<b>Tabla VIII.3.</b> Variables analizadas en los escenarios para el cultivo de colza e.....	130
<b>Tabla VIII.4.</b> Variables analizadas en los escenarios para el cultivo de chopo.....	130
<b>Tabla VIII.5.</b> Características principales de los escenarios evaluados en el nuevo análisis de viabilidad.....	131
<b>Tabla VIII.6.</b> Características físico-químicas de los cultivos energéticos analizados.....	131
<b>Tabla VIII.7.</b> Expresiones para el cálculo del área de cultivo necesaria en el suministro de biomasa de una planta eléctrica.....	131
<b>Tabla VIII.8.</b> Capacidad de transporte de biomasa para camiones de 26 t PMA (16Mg carga útil)...	132
<b>Tabla VIII.9.</b> Ecuaciones para el cálculo de camiones necesarios para el suministro de biomasa...	133
<b>Tabla VIII.10.</b> Evaluación de costes en la logística de carga, transporte y descarga de Colza e.....	136

<b>Tabla VIII.11.</b> Análisis de sensibilidad en el transporte de colza e. (Variación del coste del gasóleo).....	138
<b>Tabla VIII.12.</b> Evaluación de costes sobre la carga, transporte, descarga y triturado de haces de chopo.....	139
<b>Tabla VIII.13.</b> Evaluación de costes sobre la carga, transporte y descarga de astillas de chopo.....	139
<b>Tabla VIII.14.</b> Suministro de biomasa de chopo en plantas de generación eléctrica de 1, 2 y 5MW.	139
<b>Tabla VIII.15.</b> Análisis de sensibilidad en el transporte de chopo (Variación del coste del gasóleo).	141
<b>Tabla VIII.16.</b> Costes laborales de las plantas eléctricas.....	143
<b>Tabla VIII.17.</b> Energía producida e ingresos por la venta de la electricidad para cada planta eléctrica.....	145
<b>Tabla VIII.18.</b> Análisis de viabilidad de plantas eléctricas con colza e. como combustible (tarifas eléctricas vigentes en el año 2006).....	146
<b>Tabla VIII.19.</b> Análisis de viabilidad de plantas eléctricas con chopo como combustible (tarifas eléctricas vigentes en el año 2006).....	147
<b>Tabla VIII.20.</b> Energía total producida e ingresos obtenidos en las plantas de generación eléctrica analizadas.....	149
<b>Tabla VIII.21.</b> Análisis de viabilidad de las plantas eléctricas con colza e. como combustible (tarifas eléctricas del RD 661/2007).....	150
<b>Tabla VIII.22.</b> Análisis de sensibilidad (colza e.): productividad agrícola .....	152
<b>Tabla VIII.23.</b> Análisis de sensibilidad (colza e.): inversión de la planta eléctrica.....	152
<b>Tabla VIII.24.</b> Análisis de viabilidad de las plantas eléctricas chopo como combustible (tarifas eléctricas del RD 661/2007).....	155
<b>Tabla VIII.25.</b> Análisis de sensibilidad (chopo): productividad agrícola.....	156
<b>Tabla VIII.26.</b> Análisis de sensibilidad (chopo): inversión de la planta eléctrica.....	156
<b>Tabla IX.1.</b> Análisis elemental de la biomasa.....	162
<b>Tabla IX.2.</b> Parámetros operativos de la planta de 300 MW con carbón.....	165
<b>Tabla IX.3.</b> Características físico-químicas del carbón bituminoso.....	165
<b>Tabla IX.4.</b> Análisis económico y financiero de la generación eléctrica en una planta térmica de carbón y de co-combustión de carbón con biomasa de 300 MW.....	169

<b>Tabla IX.5.</b> Análisis de viabilidad de la generación eléctrica de biomasa con los cultivos energéticos de colza e. y chopo.....	171
<b>Tabla IX.6.</b> Resultados económicos entre las alternativas de combustión propuestas para la colza e.....	173
<b>Tabla IX.7.</b> Análisis Coste-Beneficio relativo al tratamiento de emisiones de SO <sub>2</sub> en la combustión de Colza e. en plantas de generación eléctrica de 25 y 50 MW.....	174
<b>Tabla X.1.</b> Métodos estandarizados para la caracterización de la biomasa .....	182
<b>Tabla X.2.</b> Caracterización físico-química de la biomasa de colza .....	196
<b>Tabla X.3.</b> Composición elemental de los elementos minerales presentes en la biomasa de colza.....	196
<b>Tabla X.4.</b> Degradación térmica en la primera y segunda zonas de reacción.....	197
<b>Tabla X.5.</b> Caracterización química de las cenizas de biomasa de colza.....	199
<b>Tabla X.6.</b> Caracterización química de los elementos seleccionados en las cenizas de la biomasa de colza.....	200
<b>Tabla X.7.</b> Balance de elementos presentes en las cenizas de biomasa de colza.....	200
<b>Tabla X.8.</b> Distribución de los elementos inorgánicos en las diversas fracciones de cenizas en una planta de combustión de biomasa.....	204
<b>Tabla XI.1.</b> Cultivos para la producción industrial de materias y productos químicos.....	218
<b>Tabla XI.2.</b> Ácidos grasos en el aceite de ricino .....	222
<b>Tabla XI.3.</b> Situación del mercado internacional del aceite de ricino .....	225

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura II.1.</b> Centrales eléctricas con biomasa forestal y agrícola instaladas en España (Abril 2008).	16
<b>Figura II.2.</b> Diagrama de los flujos energéticos de Cataluña previstos para el año 2015 en el escenario (en ktps).....	18
<b>Figura II.3.</b> Plantas de la generación de energía con biomasa en Cataluña.....	20
<b>Figura III.1.</b> Fases del Análisis del Ciclo de Vida.....	27
<b>Figura IV.1.</b> Etapas de un proceso de Evaluación Integrada.....	30
<b>Figura IV.2.</b> Imágenes del transcurso de las Jornadas de Análisis Multicriterio (UAB Bellaterra-Barcelona, Marzo-Abril 2004).....	33
<b>Figura IV.3.</b> Relaciones causa-efecto de la biomasa forestal en Cataluña .....	37
<b>Figura V.1.</b> Destinos finales de los residuos generados en Cataluña (1995-2004).....	66
<b>Figura V.2.</b> Principales rutas de reciclaje, disposición y valorización de los residuos de biomasa generados en Cataluña.....	68
<b>Figura VI.1.</b> <i>Brassica carinata</i> en floración .....	77
<b>Figura VI.2.</b> Cultivo de chopo: (1) 2 semanas, (2) 6 meses, (3) 2 años. Parcelas de cultivo en Mas Badia (Girona).....	78
<b>Figura VI.3.</b> Cosechadora Austoft 7700.....	84
<b>Figura VI.4.</b> Cosechadora Claas Jaguar .....	85
<b>Figura VII.1.</b> Astilladoras móviles: alimentación manual y mecánica.....	93

<b>Figura VII.2.</b> Mecanismo de peletizado.....	94
<b>Figura VII.3.</b> Calderas de biomasa para calefacción de edificios.....	99
<b>Figura VII.4.</b> Tipos de hogares y quemadores de parrilla en los sistemas de combustión de mediana escala.....	102
<b>Figura VII.5.</b> Balance de energía en la generación térmica/eléctrica a partir de la combustión de biomasa.....	103
<b>Figura VII.6.</b> Tipos de hornos de combustión de lecho fluidizado.....	104
<b>Figura VII.7.</b> Dispositivos de limpieza de gases por lavado (“Scrubbers”) .....	101
<b>Figura VII.8.</b> Clasificación de los sistemas de desulfuración de gases de combustión.....	107
<b>Figura VII.9.</b> Aplicaciones principales del gas obtenido en la gasificación de la biomasa.....	112
<b>Figura VII.10.</b> Producción de biocombustibles de primera generación a partir de biomasa vegetal: bioetanol, metanol y biodiesel.....	115
<b>Figura VIII.1.</b> Esquema del sistema de bioenergía .....	125
<b>Figura VIII.2.</b> Planta de generación eléctrica con biomasa de Sangüesa (25 MW).....	126
<b>Figura VIII.3.</b> Inversiones en plantas eléctricas de biomasa .....	142
<b>Figura IX.1.</b> Diagrama de proceso de una planta termoeléctrica de carbón de 300MW (IECM).....	164
<b>Figura IX.2.</b> Emisión teórica de SO <sub>2</sub> en la combustión de la mezcla de colza e. y chopo .....	170
<b>Figura X.1.</b> Cultivo y cosecha de colza. Preparación de la de biomasa para el secado natural.....	180
<b>Figura X.2.</b> Distinción del tipo de muestra según el tamaño del diámetro de la colza.....	181
<b>Figura X.3.</b> Analizador elemental (C,H,N y S), EuroEA Elemental Analyzer.....	183
<b>Figura X.4.</b> Esquema del funcionamiento de un (ICP-MS) .....	183
<b>Figura X.5.</b> Dispositivo ICP-AES empleado en el estudio y esquema de su funcionamiento.....	185
<b>Figura X.6.</b> Dispositivo TG-DTA Mettler Toledo.....	186
<b>Figura X.7.</b> Dispositivo DSC Mettler Toledo.....	187
<b>Figura X.8.</b> Bomba Calorimétrica Adiabática (IKA C4000).....	189
<b>Figura X.9.</b> Dispositivo DRX.....	192

<b>Figura X.10.</b> Análisis del contenido de humedad de colza mediante Termobalanza (Sartorius Moisture Analyser).....	194
<b>Figura X.11.</b> Termogravimetría (TG) y análisis térmico diferencial (dTG) de la biomasa de colza...	197
<b>Figura X.12.</b> Calorimetría Diferencial de Barrido de la biomasa de colza (0% humedad).....	198
<b>Figura X.13.</b> Análisis de termogravimetría de las cenizas de biomasa de colza (100-1200°C).....	200
<b>Figura X.14.</b> Difractograma de la ceniza de colza.....	202
<b>Figura X.15.</b> Fracciones de ceniza producidas en plantas de combustión de biomasa.....	203
<b>Figura X.16.</b> Evolución del secado natural de la biomasa de colza .....	207
<b>Figura X.17.</b> Análisis del contenido de humedad (TG) y de su pérdida (dTG) en muestras de colza.....	209
<b>Figura X.18.</b> Análisis del contenido de humedad (TG) y de su pérdida (dTG) en muestras de chopo.....	209
<b>Figura XI.1.</b> Planta de ricino.....	220
<b>Figura XI.2.</b> Ciclo de cultivo del ricino.....	221
<b>Figura XI.3.</b> Esquema de proceso del grano de ricino.....	222
<b>Figura XI.4.</b> Aplicaciones industriales del aceite de ricino.....	224
<b>Figura XI.5.</b> Reacciones de pirólisis y fusión cáustica del ácido ricinoleico .....	224
<b>Figura XI.6.</b> Producción mundial de ricino .....	225
<b>Figura XI.7.</b> Comparativa de precios del ricino con otras especies de interés industrial.....	226

## ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACCV	<b>A</b> nálisis del <b>C</b> oste del <b>C</b> iclo de <b>V</b> ida
ACV	<b>A</b> nálisis del <b>C</b> iclo de <b>V</b> ida
AERMET	<b>A</b> ermod <b>M</b> eteorological Preprocessor
AERMOD	<b>A</b> MS (American Meteorologica Society) / <b>E</b> PA (Environmental Protection Agency) <b>R</b> egulatory <b>M</b> odel
AGROSOST	Evaluación de la <b>S</b> ostenibilidad Medio Ambiental de Cultivos Energéticos mediante el <b>A</b> nálisis del <b>C</b> iclo de <b>V</b> ida
ASTM	<b>A</b> merican <b>S</b> ociety for <b>T</b> esting and <b>M</b> aterials
ATD	<b>A</b> nálisis <b>T</b> érmico <b>D</b> iferencial
AVEBIOM	<b>A</b> sociación Española de <b>V</b> alorización <b>E</b> nergética de la <b>B</b> iomasa
B.	<b>B</b> rassica
BioPlat	<b>P</b> lataforma Tecnológica Española de la <b>B</b> iomasa
b.s.	<b>B</b> ase <b>s</b> eca (0% humedad)
BtL	<b>B</b> iomass to <b>L</b> iquid
Calmet	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>L</b> earning in <b>M</b> eteorology
Calpuff	<b>C</b> alifornia <b>P</b> uff Model
CAPCA	<b>C</b> atálogo de <b>A</b> ctividades <b>P</b> otencialmente <b>C</b> ontaminantes de la <b>A</b> tmosfera
CDR	<b>C</b> ombustible <b>D</b> erivado de <b>R</b> esiduo
CE	<b>C</b> omisión <b>E</b> uropea
CECAM	<b>C</b> entre d'Estudis de la <b>C</b> onstrucció i <b>A</b> nàlisi de <b>M</b> aterials
CEN/TS	<b>C</b> omité <b>E</b> uropeén de <b>N</b> ormalisation / <b>T</b> echnical <b>S</b> pecification
CFC	<b>C</b> onsorci <b>F</b> orestal de <b>C</b> atalunya
CHP	<b>C</b> ombined <b>H</b> eat and <b>P</b> ower
CIEMAT	<b>C</b> entro de <b>I</b> nvestigaciones <b>E</b> nergéticas, <b>M</b> edioambientales y <b>T</b> ecnológicas

COD	<b>C</b> arrier <b>O</b> nboard <b>D</b> elivery
Colza e.	<b>Colza</b> etiòpe
COM	<b>Com</b> mission
CPF	<b>C</b> entre de la <b>P</b> ropietat <b>F</b> orestal
CREAF	<b>C</b> entre de <b>R</b> ecerca <b>E</b> cològica i <b>A</b> plicacions <b>F</b> orestals a Catalunya
CTDMPLUS	<b>C</b> omplex <b>T</b> errain <b>D</b> ispersion <b>M</b> odel <b>P</b> lus Algorithms for Unstable Situations
CTE	<b>C</b> ódigo <b>T</b> écnico de <b>E</b> dificación
CTFC	<b>C</b> entre <b>T</b> ecnològic i <b>F</b> orestal de <b>C</b> atalunya
CTP	<b>C</b> oste <b>T</b> otal de <b>P</b> lanta
DARI	<b>D</b> eclaració <b>A</b> nual de <b>R</b> esidus <b>I</b> ndustrials
DCT	<b>D</b> etector de <b>C</b> onductividad <b>T</b> érmica
DIN	<b>D</b> eutshes <b>I</b> nstitut für <b>N</b> ormung
DRX	<b>D</b> ifractómetro de <b>R</b> ayos <b>X</b>
DSC	<b>D</b> ifferential <b>S</b> canning <b>C</b> alorimetry
E4	Plan de Acción de la <b>E</b> strategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012
EBB	<b>E</b> uropean <b>B</b> iodiesel <b>B</b> oard
eBIO	<b>E</b> uropean <b>B</b> ioethanol Fuel Association
EDAR	<b>E</b> stación <b>D</b> epuradora de <b>A</b> guas <b>R</b> esiduales
EDER	<b>E</b> strategia per al <b>D</b> esenvolupament de les <b>E</b> nergies <b>R</b> enovables
EQATA	<b>E</b> nginyeria <b>Q</b> uímica <b>A</b> grària i <b>T</b> ecnologia <b>A</b> groalimentaria
ESP	<b>E</b> lectrostatic <b>P</b> recipitator (Precipitador electrostático)
EU	<b>E</b> uropa
EUA	<b>E</b> stados <b>U</b> nidos de <b>A</b> merica
ExternE	<b>E</b> xternalities of <b>E</b> nergy
FAO	<b>F</b> ood and <b>A</b> griculture <b>O</b> rganization of the United Nations
FCC	<b>F</b> racció de <b>C</b> abida de <b>C</b> ubierta
FT	<b>F</b> isher- <b>T</b> rops
GEI	<b>G</b> ases de <b>E</b> fecto <b>I</b> vernadero
ICAEN	<b>I</b> nstitut <b>C</b> atalà de l' <b>E</b> nergia
ICP-AES	<b>I</b> nductively <b>C</b> oupled <b>P</b> lasma – <b>A</b> tomically <b>E</b> mission <b>S</b> pectrophotometry

ICP-MS	Inductively <b>C</b> oupled <b>P</b> lasma – <b>M</b> ass <b>S</b> pectrometry
IDAE	Instituto para la <b>D</b> iversificación y <b>A</b> horro de la <b>E</b> nergía
IEA	<b>I</b> nternational <b>E</b> nergy <b>A</b> gency
IECM	<b>I</b> ntegrated <b>E</b> nvironmental <b>C</b> ontrol <b>M</b> odel
IEFC	<b>I</b> nventario <b>E</b> cológico y <b>F</b> orestal de <b>C</b> ataluña
IFN	<b>I</b> nventario <b>F</b> orestal <b>N</b> acional
IMA	<b>I</b> nstitut de <b>M</b> edi <b>A</b> mbient
IRTA	<b>I</b> nstitut de <b>R</b> ecerca i <b>T</b> ecnologies <b>A</b> groalimentaries
ISCST	<b>I</b> ndustrial <b>S</b> ources <b>C</b> omplex <b>S</b> hort <b>T</b> erm
ISO	<b>I</b> nternational <b>O</b> rganization for <b>S</b> tandardization
ITC	<b>I</b> nstrucción <b>T</b> écnica <b>C</b> omplementaria
LB	<b>L</b> echo <b>B</b> urbujeante
LC	<b>L</b> echo <b>C</b> irculante
LEQUIA	<b>L</b> aboratori d'Enginyeria <b>Q</b> ímica i <b>A</b> mbiental
LSFO	<b>L</b> imestone <b>F</b> orced <b>O</b> xidation
m.f.	<b>m</b> ateria <b>f</b> resca
Mg	<b>M</b> egagramos
MP	<b>M</b> ateria <b>p</b> articulada
MPTER	<b>M</b> ultiple <b>P</b> oint Source Model with <b>T</b> errain
NETBIOCOF	<b>I</b> ntegrated European <b>N</b> etwork for <b>B</b> iomass <b>C</b> o-firing
NETL	<b>N</b> ational <b>E</b> nergy <b>T</b> echnology <b>L</b> aboratory
O+M	<b>O</b> peración + <b>M</b> antenimiento
PCI	<b>P</b> oder <b>C</b> alorífico <b>I</b> nferior
PCS	<b>P</b> oder <b>C</b> alorífico <b>S</b> uperior
PER	<b>P</b> lan de las <b>E</b> nergías <b>R</b> enovables 2005-2010
PMA	<b>P</b> eso <b>M</b> áximo <b>A</b> utorizado
PNA	<b>P</b> lan <b>N</b> acional de <b>A</b> signación de emisiones de CO <sub>2</sub> 2008-2012
PRI	<b>P</b> eriodo de <b>R</b> etorno de la <b>I</b> nversión
PRIME	<b>P</b> lume <b>R</b> ise <b>M</b> odel <b>E</b> nhancements
PROGREMIC	<b>P</b> rograma de <b>G</b> estión de <b>R</b> esiduos <b>M</b> unicipales de <b>C</b> ataluña

p.s.a.	<b>Peso seco ambiente</b>
p.s.e.	<b>Peso seco estufa</b>
PSE-cultivos	<b>Proyecto Singular Estratégico de cultivos energéticos</b>
PSR	<b>Planta de Separación de Residuos</b>
RAMnet	<b>Remote Access Metropolitan Network</b>
RD	<b>Real Decreto</b>
Res.	<b>Residuo</b>
RSU	<b>Residuos Sólidos Urbanos</b>
SA	<b>Sociedad Anónima</b>
SEC	<b>Section</b>
SIG	<b>Sistemas de Información Geográfica</b>
SL	<b>Sociedad Limitada</b>
Subsist.	<b>Subsistema</b>
TG	<b>Termogravimetría</b>
tep	<b>tonelada equivalente de petróleo</b>
TIR	<b>Tasa Interna de Rentabilidad</b>
TR	<b>Tarifa de Referencia</b>
UAB	<b>Universitat Autònoma de Barcelona</b>
UdG	<b>Universitat de Girona</b>
UE	<b>Unión Europea</b>
UEPA	<b>European Union of Ethanol Producers</b>
URV	<b>Universitat Rovira i Virgili</b>
VAN	<b>Valor Actual Neto</b>
XEAC	<b>Xarxa d'Emissions Atmosfèriques de Catalunya</b>



Capítulo 1.

## **Presentación y Objetivos**





## 1. PRESENTACIÓN Y OBJETIVOS

El aprovechamiento energético de los residuos de biomasa se ha incrementado a lo largo de los últimos años en España y Cataluña. El principal motivo de este incremento es la necesidad de cumplir los objetivos energéticos a nivel regional y estatal, especificados en el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015* para Cataluña, y en el *Plan Nacional de Energías Renovables 2005-2010* para España. Estos objetivos están directamente relacionados con las limitaciones sobre la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que se derivan del Protocolo de Kyoto.

Otros factores externos como la tendencia en el consumo internacional de recursos de origen fósil, el incremento de precios de las materias primas y la aparición de una nueva legislación europea favorable al desarrollo de las energías renovables, y en concreto, al fomento de la energía generada a partir de biomasa, promueven el aprovechamiento energético de este recurso de diversos orígenes (forestal, industrial, agrícola y cultivos energéticos) para la producción de electricidad y/o calor en España y Cataluña.

En España, a diferencia de otros países europeos, la biomasa no ha sido valorada y explotada del mismo modo que el resto de energías renovables hasta hace muy pocos años debido a los siguientes factores:

- La falta de un mercado de combustibles de biomasa;
- El requerimiento de importantes inversiones y de una garantía de suministro a medio y largo plazo para la implantación de nuevas experiencias;
- La falta de un consenso entre los diferentes agentes que intervienen en la valorización energética de la biomasa (propietarios forestales, productores de biomasa, empresarios y administración);
- La insuficiencia en los incentivos económicos para el desarrollo de nuevas experiencias de producción de energía con biomasa;
- Insuficiencia en las tarifas eléctricas pagadas por la electricidad producida a partir de biomasa.

Durante la elaboración de la presente tesis, la aprobación del Real Decreto 661/2007 ha comportado un aumento significativo de las tarifas eléctricas pagadas por la energía producida con biomasa. Esta norma promueve la creación y el desarrollo de nuevos proyectos basado en la

producción de energía a partir de biomasa y la creación de nuevas empresas especializadas en este sector. La mayoría de las iniciativas actuales están basadas en la valoración energética de residuos agro-industriales. El Real Decreto 661/2007 debe impulsar el funcionamiento de nuevas plantas de valorización energética de otros tipos de biomasa como los residuos forestales y los cultivos energéticos. Las limitaciones tecnológicas y la falta de estudios de viabilidad justifican la dificultad en la implantación de estos nuevos sistemas de producción de energía a escala regional y nacional.

En Cataluña, el conocimiento existente sobre este recurso renovable ha ido aumentando en función de la implantación de experiencias piloto sobre producción de energía con biomasa a escala local, y del trabajo conjunto entre distintas entidades que han evaluado la viabilidad del aprovechamiento energético de este recurso bajo criterios de sostenibilidad.

La Universidad de Girona ha participado a lo largo del período 2004-2008 en diversos proyectos de investigación junto con otras universidades y entidades especializadas en el sector de la biomasa. Estos proyectos son los siguientes:

- Proyecto de la Fundación Abertis: *“La biomassa com a font de matèries primeres i d'energia: estudi de viabilitat al Montseny i Montnegre-Corredor”* (Años 2004-2005).

Entidades participantes:

- Universidad Autónoma de Barcelona (UAB)
- Universidad de Girona (UdG).

Temáticas tratadas:

- Cuantificación de la biomasa forestal susceptible de aprovechamiento energético en Cataluña.
- Estudio de las técnicas de extracción de biomasa forestal.
- Revisión de las tecnologías para la modificación física y conversión energética de la biomasa.
- Estudio de las experiencias sobre aprovechamiento energético de biomasa en España y Cataluña
- Evaluación económica y ambiental de la extracción y el transporte de la biomasa para su valorización energética.
- Análisis multicriterio del uso de la biomasa forestal con fines energéticos mediante el debate entre agentes especializados en el sector de la biomasa.

- Proyecto de la Fundación Abertis: “*Recerca i desenvolupament sostenible dels boscos mediterranis. Centre d’Aprentatge Forestal*” (Años 2006-2007).

Entidades participantes:

- Universidad Autónoma de Barcelona (UAB)
- Universidad de Girona (UdG).

Temáticas tratadas:

- Análisis DAFO para la creación de un Centro del Sector Forestal en Sant Celoni (Barcelona).
  - Cuantificación del potencial de biomasa susceptible de aprovechamiento energético en Cataluña y España.
  - El ricino como una alternativa para mantener el mosaico del paisaje.
  - Parte experimental: Disolución y fraccionamiento de los componentes de la biomasa forestal para una posible obtención de productos químicos y pre-pirólisis de la biomasa forestal.
- Proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología: “Evaluación de la Sostenibilidad Medio Ambiental de Cultivos Energéticos mediante el Análisis de Ciclo de Vida (AGROSOST)”. CTM 2004-05800-C03-01/TECNO (Años 2004-2008).

Entidades participantes:

- Universidad Autónoma de Barcelona (UAB)
- Universidad Rovira y Virgili (URV)
- Instituto de Recerca y Tecnologías Agroalimentarias (IRTA)
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
- Universidad de Girona (UdG).

Temáticas tratadas:

- Análisis del Ciclo de Vida de los cultivos energéticos de colza etíope (colza e.) y chopo para la producción de energía.
- Análisis de la viabilidad económica de la producción de energía a partir de los cultivos energéticos de colza e. y chopo.
- Análisis económico sobre el impacto de eliminación de los gases de SO<sub>2</sub>.

- Análisis económico relativo a la mezcla de biocombustibles de colza e. y chopo.

A lo largo de la realización de los proyectos mencionados se consiguió la colaboración de distintas empresas (fabricantes de calderas, suministro de biomasa) y entidades públicas (IRTA - Mas Badia), abriendo nuevas líneas de investigación que han permitido evaluar la biomasa en otras áreas con información insuficiente:

- Estudio del secado natural de la biomasa de los cultivos energéticos de colza y chopo.
- Caracterización físico-química del residuo agrícola de la colza como combustible para la producción de energía.
- Caracterización de las cenizas de la combustión de la colza para su uso como fertilizante en el cultivo.
- Análisis del Ciclo de Vida del carbón activo de origen mineral y vegetal, orientado al impacto sobre el Cambio Climático.
- Simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una planta de valorización energética de residuos (incineradora de Campdorà, en el municipio de Girona).

La presente tesis doctoral presenta parte de los resultados obtenidos en los proyectos de investigación en los que la Universidad de Girona ha participado durante el período 2004-2008.

El **objetivo principal** de esta tesis doctoral es la evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña, y el análisis de los diversos factores que contribuyen a la viabilidad de la producción de energía a partir de este recurso.

El alcance de este objetivo ha requerido el estudio de las siguientes temáticas, planteadas en presente tesis doctoral como **objetivos específicos**:

- Evaluar desde los puntos de vista tecno-económico y socio-político el aprovechamiento energético de la biomasa forestal mediante los resultados obtenidos en grupos de discusión formados por actores especializados en el sector de la biomasa.
- Cuantificar los recursos de biomasa disponibles para usos energéticos en Cataluña.
- Estudiar las tecnologías para el cultivo y la cosecha de los cultivos energéticos de colza etíope y chopo.

- Revisar las tecnologías para la transformación y las aplicaciones de la biomasa.
- Analizar la viabilidad de la generación eléctrica a partir de los cultivos energéticos de colza etíope (*Brassica carinata*) y chopo (*Populus X euroamericana*).
- Analizar la viabilidad económica de la generación eléctrica con biomasa de elevado contenido en azufre. Analizar la relación Coste-Beneficio de la emisión de SO<sub>2</sub>.
- Caracterizar física y químicamente la biomasa de colza (*Brassica napus*) para su uso como combustible en la producción de energía complementario al actual aprovechamiento del grano para la producción de biodiesel. Analizar los mecanismos de secado natural de la biomasa de colza en el campo.
- Caracterizar física y químicamente las cenizas de colza para su uso como fertilizante en el cultivo después de efectuar la valorización energética de la biomasa residual después de cada cosecha.
- Estudiar el uso de cultivos como fuente de materias alternativas a la producción de energía. Como caso práctico, estudiar el ricino (*Ricinus communis*) como cultivo de interés industrial.

La investigación del doctorante se ha desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería Química y Ambiental (LEQUIA-UdG), como miembro del Instituto de Medio Ambiente (IMA) y parte del Departamento de Ingeniería Química Ambiental y Tecnología Agroalimentaria (EQATA) de la Universidad de Girona (UdG). La investigación ha sido posible gracias a la financiación del trabajo realizado por la Universidad de Girona mediante una “Beca de Recerca”.

A continuación se describen brevemente los contenidos de los Capítulos que forman parte de la presente Tesis Doctoral.

## **1.1. Estructura de la Tesis y contenido de los capítulos**

La presente Tesis se divide en 12 capítulos, cada uno complementado con su respectiva información bibliográfica. Los contenidos que se incluyen en cada capítulo son los siguientes:

### **CAPÍTULO 1. Presentación y objetivos**

Es el presente capítulo, en el que se realiza una breve presentación del trabajo realizado, la descripción de los objetivos a alcanzar en la Tesis Doctoral y la estructura de la misma.

### CAPÍTULO 2. Introducción General

En el Capítulo 2 se realiza una revisión de los motivos por los que se justifica el estudio realizado en la presente tesis. En concreto se describen los siguientes conceptos: **(a)** El contexto internacional y nacional que favorece el uso de la biomasa, **(b)** Las directivas europeas y los planes de la energía que tratan la biomasa como una forma de energía renovable necesaria para alcanzar los objetivos energéticos planteados, **(c)** El estado y las previsiones sobre producción de energía con biomasa en España y Cataluña, y **(d)** los actores principales y los proyectos más destacados sobre producción de energía con biomasa en Cataluña.

### CAPÍTULO 3. Metodología y herramientas utilizadas

En el Capítulo 3 se indica la metodología general utilizada para la realización de la presente Tesis. Se indican las herramientas, bases de datos y programas informáticos que se han utilizado para la resolución de los objetivos planteados en el Capítulo 1.

### CAPÍTULO 4. Análisis multicriterio del uso de la biomasa forestal con fines energéticos

El Capítulo 4 muestra un análisis multicriterio sobre el aprovechamiento de los recursos forestales como fuente de energía. El análisis parte de los resultados obtenidos en dos sesiones de trabajo realizadas en el año 2004 con diversos expertos del área de la biomasa donde se analizaron desde los puntos de vista social, económico, tecnológico y ambiental los siguientes aspectos: **(a)** la situación del uso de la biomasa forestal como fuente de energía en Cataluña, **(b)** la necesidad de la gestión forestal para fines energéticos, y **(c)** los impactos relacionados con la explotación forestal, el transporte y la generación de energía. Los resultados obtenidos conforman el punto de partida de la investigación desarrollada por el doctorante y mostrada a lo largo de los capítulos de la presente tesis.

### CAPÍTULO 5. Cuantificación del potencial de biomasa disponible para la generación de energía en Cataluña

El Capítulo 5 cuantifica las existencias de biomasa y los residuos de biomasa potencialmente disponibles para la producción de energía en Cataluña. La cuantificación se ha realizado diferenciando diversas categorías de residuos de biomasa en función de su origen. Los datos son

finalmente expresados en unidades de electricidad generable y toneladas de CO<sub>2</sub> evitables de ser emitidas a la atmósfera mediante la sustitución de combustibles fósiles por biomasa en los actuales sistemas de generación eléctrica.

#### CAPÍTULO 6. Tecnologías para el cultivo y la cosecha de los cultivos energéticos de colza etíope y chopo

El Capítulo 6 presenta el estado del estudio de los cultivos energéticos de colza etíope y chopo en España, las operaciones para su cultivo, y los costes asociados a su producción en el campo. Finalmente se describen los métodos y tecnologías disponibles para su cosecha. Ambos cultivos serán considerados en la evaluación de la viabilidad económica de la producción de energía a partir de sus biomásas, mostrada en posteriores apartados.

#### CAPÍTULO 7. Tecnologías para la transformación y aplicaciones de la biomasa

El Capítulo 7 presenta una revisión de las tecnologías para: **(a)** la modificación física de la biomasa a una forma estándar de combustible, **(b)** la combustión en la generación de energía, y **(c)** el control para la dispersión de las emisiones producidas en la combustión de la biomasa. De forma más breve se resumen **(d)** las tecnologías de la gasificación y la pirólisis, y sus aplicaciones, y **(e)** las tecnologías para la producción de biocombustibles.

Parte de los resultados mostrados en este capítulo han sido objeto de publicación en la revista *Residuos*.

- **M. Serra, X. Ubach, S. Martínez, M. Rigola** (2009). Estudio de la evolución de los niveles de inmisión de los contaminantes PST, HCl y NO<sub>2</sub> emitidos por la incineradora de Campdorà (Girona). *Residuos: revista bimestral de residuos urbanos e industriales*. Marzo 2009. nº 110. Págs.: 18-23.

#### CAPÍTULO 8. Análisis de viabilidad del sistema de bioenergía a partir de los cultivos energéticos de colza etíope y chopo.

El Capítulo 8 muestra un análisis de viabilidad de la generación eléctrica para distintos tamaños de planta eléctrica, utilizando los cultivos energéticos de colza etíope y chopo, tratados en el Capítulo

6. El análisis de viabilidad considera las tarifas eléctricas vigentes antes y después de la aprobación del Real Decreto 661/2007.

La mayoría de los resultados que se exponen en este capítulo han sido objeto de publicación en la revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Otro artículo se encuentra en fase de revisión en la revista *Renewable Energy Journal*:

- **Carles M. Gasol, S. Martínez, M. Rigola, J. Rieradevall, A. Antón, J. Carrasco, P. Ciria, X. Gabarrell** (2009) Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the Southern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13, págs.: 801-812.
- **S. Martínez, Carles M. Gasol, M. Rigola, J. Rieradevall, A. Antón, J. Carrasco, P. Ciria, X. Gabarrell** (2008) Feasibility assessment of Brassica carinata bioenergy systems in Southern Europe. (En revisión) *Renewable Energy Journal*.

### CAPÍTULO 9. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica con biomasa de elevado contenido en azufre. Análisis Coste-Beneficio relativo a la emisión de SO<sub>2</sub>.

El Capítulo 9 muestra un análisis de viabilidad donde se comparan dos estrategias de combustión para la valorización energética de cultivos energéticos con un elevado contenido en azufre. Las estrategias de combustión analizadas son: **(a)** la co-combustión de colza e. con carbón en una central eléctrica convencional de 300 MW de potencia, y **(b)** la mezcla de combustibles de biomasa en plantas de generación eléctrica convencionales. Finalmente, se presenta un análisis Coste-Beneficio en el que se compara el coste de desulfuración de gases al coste de la externalidad provocada por la emisión de gases de SO<sub>2</sub> en la generación eléctrica.

La mayoría de los resultados que se exponen en este capítulo han sido objeto de publicación en la revista *Biomass and Bioenergy*, en fase de revisión:

- **S. Martínez, Carles M. Gasol, J. Rieradevall, X. Gabarrell, M. Rigola** (2008). Prospects for sulphur-containing energy crops. (En revisión) *Biomass & Bioenergy*.

CAPÍTULO 10. Caracterización físico-química de la biomasa de colza (*Brassica napus*)

El Capítulo 10 presenta la parte experimental realizada para esta tesis. Esta se basa en la caracterización físico-química y del secado natural de la biomasa de colza para la producción de energía, como estrategia complementaria al actual aprovechamiento del grano para la producción de biodiesel. El Capítulo 10 se divide en tres grandes bloques. El primer bloque muestra el diseño del trabajo experimental para la caracterización físico-química y el secado natural de la biomasa de colza. Se describe el método para el muestreo, los métodos estandarizados utilizados, y el conjunto de técnicas y dispositivos de laboratorio utilizados en la caracterización de la biomasa y de sus cenizas. El segundo bloque muestra los resultados obtenidos en la caracterización físico-química y calorimétrica de la biomasa de colza y de sus cenizas, y finalmente, la evolución de la humedad de la biomasa de colza al haber sido expuesta a las condiciones meteorológicas del territorio.

CAPÍTULO 11. Usos alternativos de la biomasa: Cultivos para la producción de materias primas de la industria química. El caso práctico del ricino

El Capítulo 11 hace referencia a la valorización de cultivos, alternativos a los implantados para la producción de energía, que por sus propiedades físico-químicas tienen interés para la industria química en Europa. Estos cultivos son valorados en el mercado internacional según su potencial suministro y cotización de las materias primas obtenidas.

Como caso práctico se presenta el cultivo del ricino, un vegetal de importante valor comercial debido a las numerosas aplicaciones contenidas en la composición química de su grano. Se describe su cultivo, composición química, aplicaciones industriales y su valorización y demanda en el mercado internacional.

Algunos de los resultados de este capítulo han sido objeto de publicación en la revista *Ingeniería Química*:

- **S. Martínez Lozano, E. Julià, N. Puy, J. Bartrolí Almera, J. Bartrolí Molins, M. Rigola.** (2009) El ricino, una especie de interés industrial. *Ingeniería Química*. nº 466, págs.: 188-192.

CAPÍTULO 12. Conclusiones generales

El Capítulo 12 recoge las principales conclusiones extraídas del trabajo realizado y presentadas en los capítulos centrales de la tesis doctoral.

Capítulo 2.

## **Introducción General**





## 2. INTRODUCCIÓN GENERAL

### 2.1. Motivos del estudio

La biomasa es toda aquella fracción biodegradable de los productos, los desechos y los residuos procedentes de la agricultura, de la silvicultura y de las industrias conexas (incluidas las sustancias de origen animal), así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales [1]. Por sus características físico-químicas y caloríficas, la biomasa puede ser una materia primera para la producción de energía (calor y electricidad), de biocombustibles y de productos químicos alternativos a los producidos a partir recursos no-renovables (petróleo, gas y carbón).

Históricamente, la biomasa forestal y los residuos de los cultivos agrícolas, han sido extensamente utilizados para la producción de calor (como combustible para hogares residenciales, panaderos, herreros, etc.). Más recientemente durante el siglo XX, ha sido fuente de materias primas para la industria química a partir de la destilación de la madera. La biomasa también es un componente importante para la construcción, y es un material de elevado interés económico para la industria del mueble.

En la actualidad existen una serie de factores de naturaleza internacional que justifican la necesidad del avance tecnológico hacia el uso sostenible de la biomasa como energía renovable:

- El compromiso en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ratificado internacionalmente en el Protocolo de Kyoto. El objetivo internacional es alcanzar una emisión de GEI para el 2010 equivalente al 5% sobre el nivel emitido en el año 1990 (año base). En la Unión Europea (UE), se debe alcanzar una emisión media del 8% contando con el conjunto de países miembros. España se comprometió inicialmente con un incremento limitado al 15%. Este objetivo se ha visto superado y fue modificado hasta un 37%, que se cubriría teniendo en cuenta la absorción por sumideros como los bosques (2%) y la adquisición de créditos de carbono procedentes de los mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kyoto (20%) [2,3].

El nivel de emisiones de GEI en España ha sido largamente superado, alcanzando un valor del 52,3% sobre el año base en el año 2007 [4].

- La dependencia de la sociedad de los recursos fósiles. La dependencia mundial a los recursos fósiles es muy elevada, alcanzando un valor del 80% de la energía primaria consumida en el año 2004. En Europa y España, este consumo es del 79% y del 83% para el año 2006, respectivamente [5,6].
- La tendencia al ascenso del precio del barril de petróleo y otros combustibles fósiles [7]. La elevada demanda de recursos fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón por países como China y India, la disminución de las reservas de combustibles fósiles [8] y las restricciones en el suministro de estos recursos por los principales países productores repercuten en el mercado internacional hacia el alza de precios [9]. Este hecho ha abierto el debate de la autosuficiencia energética respecto a la dependencia de los recursos petrolíferos de los países cuya economía históricamente ha dependido del uso de esta forma de energía mineral.

El conjunto de factores mencionados justificó la redacción del *Libro Blanco de las Energías Renovables* (1997) en la UE. Su objetivo es general el aumento de la contribución de las energías renovables sobre el consumo de energía primaria total hasta el 12% para el 2010 [10]. Con este propósito se aprobó la Directiva 2001/77/CE relativa a la producción de electricidad de origen renovable [1] y la Directiva 2003/30/CE relativa a la producción de biocombustibles [11], que especifican como objetivos para el año 2010, la producción del 21% de electricidad de origen renovable y del 5,75% de biocarburantes sobre el total de combustible utilizado para el transporte.

El *Plan de Acción de la Biomasa*, aprobado en el año 2005, especificó que para llegar a estos objetivos, el consumo anual de biomasa debía alcanzar los 150Mteps para el conjunto de la UE en el año 2010, a través del consumo de 55 Mteps de biomasa para la producción de electricidad, 75 Mteps para la producción de calor y 19 Mteps para la producción de biocarburantes [12].

La Propuesta de Directiva 2008/0016 COD presentada por la Comisión Europea en el año 2008 pretende la promoción de la energía renovable a un nivel más ambicioso al actual. Los objetivos indicados en esta propuesta son el consumo de un 20% de energías renovables y el consumo de un 20% de biocombustibles sobre el total de carburantes para el transporte, ambos objetivos para el año 2020 [13].

La realidad de España en cuanto a sus emisiones de GEI y su actual dependencia a los combustibles fósiles hace que sea necesario el funcionamiento de diversas herramientas para

alcanzar un nivel energético-tecnológico más sostenible y competitivo a nivel europeo. Estas herramientas vienen enfocadas a la generación de energías renovables (*Plan de Fomento de las Energías Renovables 2005-2010 (PER)*, *Revisión 2007-2016 de la Planificación de los Sectores de Electricidad y Gas*, el *Plan nacional de Asignación de emisiones de CO<sub>2</sub> 2008-2012 (PNA)* y *Real Decreto 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de electricidad en régimen especial*), y a la eficiencia energética (*Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012 (E4)*, la *Estrategia española de Cambio Climático y Energía Limpia. Horizonte 2007-2012-2020*, y el *Código Técnico de Edificación (CTE)*) [4].

La biomasa destaca respecto al resto de energías renovables en los siguientes aspectos:

- Debido a su origen fotosintético es una energía de disponibilidad “ilimitada” y puede ser transformada en todo momento sin depender del estado meteorológico;
- El aprovechamiento energético de este recurso comporta la generación de numerosos puestos de trabajo y el consecuente incentivo a la economía local y regional.

La biomasa residual generada en explotaciones forestales, agrícolas, industriales, municipales y los cultivos energéticos tienen características físico-químicas y energéticas que permiten su mezcla en sistemas de producción de energía descentralizados. La planificación estratégica del suministro de biomasa puede determinar la viabilidad económica de nuevas experiencias de valorización energética de media y gran envergadura.

Paralelamente a la combustión conjunta de diversos combustibles de biomasa en una única instalación, la combinación de sistemas energéticos renovables y la sustitución parcial de los combustibles fósiles (co-combustión con biomasa), son estrategias que permiten la adecuación de la biomasa como fuente de energía renovable en el actual modelo de producción de energía a nivel nacional y regional.

Por otro lado, la biomasa es también objeto de investigación en la industria química. La biomasa de ciertas especies vegetales como el ricino (*Ricinus communis*) es actualmente tratada para la extracción de materias primas de interés industrial, alternativas a las obtenidas a partir de recursos no-renovables. En otros tipos de biomasa (lignocelulósica), a partir de la aplicación de tratamientos térmicos y físico-químicos, se pueden obtener compuestos que pueden ser la base química de nuevas sustancias. La producción de nuevos bioplásticos y biocombustibles son ejemplos de

experiencias actuales en Europa y otros países industrializados.

La investigación se puede considerar relacionada con la **Química Verde** o **Química Sostenible**, concepto que, sin embargo, fue inicialmente desarrollado por la American Chemical Society [14] en el año 1990, refiriéndose al diseño, desarrollo e implementación de productos y procesos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias peligrosas para la salud humana o el medio ambiente [14].

El concepto de **biorefinería**, análogo a las refinerías convencionales de petróleo, se concibe como la instalación que integra procesos de conversión de biomasa para la producción de biocombustibles, energía y productos químicos [15].

Cataluña, a diferencia de otras comunidades autónomas, presenta un elevado potencial en recursos forestales debido a su extensión forestal, dispone de agua en zonas agrícolas actualmente en desuso y genera elevadas cantidades de residuos de biomasa de origen industrial. Sus características territoriales permiten el aprovechamiento de la biomasa de diversos orígenes, no sólo para la producción de energía sino también para la producción de materias primas de interés industrial.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo central el análisis de los factores que contribuyen a la mejora de la viabilidad en la producción de energía utilizando la biomasa como combustible renovable. Estos factores serán evaluados mediante el estudio del potencial de generación de residuos de biomasa en Cataluña y el análisis de diversos escenarios para la evaluación de los aspectos tecnológicos, ambientales, económicos y sociales de la producción de energía con este combustible renovable.

## **2.2. La producción de energía a partir de biomasa en España y previsiones según el *PER (2005-2010)*.**

Según el *Plan Nacional de Energías Renovables 2005-2010 (PER)*, la contribución de las energías renovables en el consumo total de energía primaria debe alcanzar un 12% en el año 2010, a través de la generación eléctrica con fuentes renovables en una proporción del 29,4% sobre el total producido y de la producción del 5,75% de biocarburantes calculado sobre la base del contenido

energético, de toda la gasolina y gasóleo comercializados con fines de transporte [6,16].

Para alcanzar estos objetivos, la biomasa es destacada en el *PER 2005-2010* como la fuente de energía primaria más importante sobre el resto de energías renovables (45,5%). A su vez, se prevé que los cultivos energéticos sean el tipo de biomasa más consumido sobre el resto de tipos de biomasa (37,9% sobre el total de biomasa) [16]. La Tabla II.1 muestra los consumos de biomasa y producciones de energía que se planean alcanzar para el año 2010.

Hasta la aparición del Real Decreto 661/2007, la insuficiencia en las primas para la venta de electricidad generada con biomasa hizo que el fomento de este tipo de energía fuera inviable. La actual garantía de una tarifa regulada a medio-largo plazo promueve el desarrollo de nuevos proyectos sobre producción de energía térmica y/o eléctrica con biomasa de diversa potencia.

A fecha de Abril del 2008, la potencia total instalada en plantas de generación eléctrica con biomasa en España es de 833MW [17]. La mayoría de estas experiencias utilizan biomasa de origen industrial. Ver Figura II.1. Para alcanzar los objetivos energéticos planteados en el *PER-2005-2010*, es necesaria la instalación de 484MW durante el período 2008-2010.

La *Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM)* y el *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)* promueven el desarrollo de nuevos proyectos sobre generación eléctrica con biomasa en España.

La creación de la "Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa (BioPlat)" [18] en diciembre del 2006, tiene como objetivo proporcionar un marco en el que todos los sectores implicados en el desarrollo de la biomasa, incluidos los cultivos energéticos, trabajen conjunta y coordinadamente para conseguir que la implantación comercial de la biomasa en España tenga un crecimiento continuo, de forma competitiva y sostenible [18]. Sin embargo, como en otras circunstancias del país, busca centralizar la actividad en perjuicio de estimular otras iniciativas particulares.

La sustitución parcial del carbón utilizado en las centrales térmicas convencionales por biomasa es contemplada en el PER como un mecanismo necesario para la reducción de la dependencia a los recursos fósiles y de las emisiones de GEI. La co-combustión de carbón con biomasa se estima que contribuya en un 35% (722 MWe) en la potencia eléctrica con biomasa instalada en el año 2010 (2039 MW) [6,16]. Según los objetivos especificados en este plan, las instalaciones eléctricas deben generar 14,0 TWh/año a partir de biomasa.

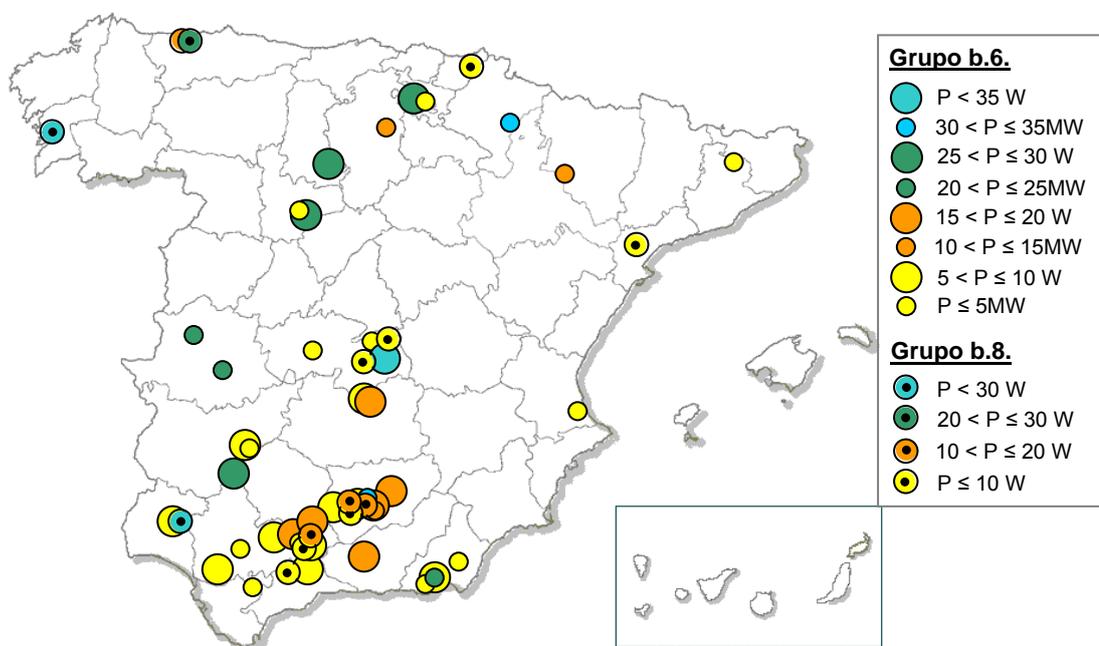
**Tabla II.1. Objetivos energéticos relativos a la biomasa según el PER 2005-2010**

	Situación 2004		Objetivo 2010		Incremento necesario	
	Potencia (MW)	Energía primaria (ktep)	Potencia (MW)	Energía primaria (ktep)	Potencia (MW)	Energía primaria (ktep)
Centrales de biomasa	344	680	1.317	3.586	973	2.905
Co-combustión	0	0	722	1.552	722	1.552
<b>TOTAL Eléctrica biomasa</b>	<b>344</b>	<b>680</b>	<b>2.039</b>	<b>5.138</b>	<b>1.695</b>	<b>4.458</b>
<b>TOTAL Térmicas biomasa</b>	<b>-</b>	<b>3.487</b>	<b>-</b>	<b>4.070</b>	<b>-</b>	<b>583</b>
TOTAL Energía Primaria biom.	-	4.167	-	9.208	-	5.041
TOTAL Biocarburantes*	-	228	-	2.200	-	1.972

RECURSOS (ktep)		
		Residuos forestales
		Residuos agrícolas leñosos
		Residuos agrícolas herbáceos
		Residuos industrias forestales
		Residuos industrias agrícolas
		Cultivos energéticos
		462
		670
		660
		670
		670
		1.908

\* Biocarburantes pueden ser producidos a partir de biomasa u otros residuos, como el aceite de cocina. Fuente: Adaptado de [16].



**Figura II.1. Centrales eléctricas con biomasa forestal y agrícola instaladas en España (Abril 2008).**

Nota: Se ha contabilizado la potencia eléctrica de las instalaciones registradas según las categorías especificadas en el RD 436/2004 (b.6, b.8), y RD 661/2007 (B, b.6, b.8, b.8.1.). Fuente: Adaptado de [17].

La co-combustión es fomentada y promovida por los siguientes organismos internacionales:

- La Agencia Internacional de la Energía, mediante la Tarea 32 [19].
- La Red Europea Integrada sobre co-combustión con biomasa (NETBIOCOF). Fundada mediante el Proyecto SES6-CT-020007-(SES6), co-financiado por la Comisión Europea mediante el “Sixth Framework Programme” (2002-2006) [20].

### 2.3. La producción de energía a partir de biomasa en Cataluña y previsiones según el *Pla de l'energia de Catalunya (2006-2015)*

Cataluña contribuye en el 18,8% del PIB español, contiene el 15,8% de la población nacional y ocupa el 6,8% del territorio [21]. Se caracteriza por ser una de las comunidades autónomas de más consumo energético y de mayor producción industrial en España [22].

El plan estratégico de la energía en Cataluña (*Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015* [21]), en acorde con el plan estratégico español (*PER 2005-2010* [16]), contiene unos objetivos ambiciosos en cuanto a eficiencia energética y producción de energía renovable (Tabla II.2).

El consumo de energía de origen renovable se prevé que aumente hasta un 6,9% para el año 2010, y un 9,5% para el año 2015 (Figura II.2). La biomasa, en sus diferentes formas y productos (forestal, agrícola, residuos renovables, biogás y biocarburantes) representa la primera forma de energía renovable de mayor consumo (seguida de la energía eólica e hidráulica), necesaria para alcanzar los objetivos energéticos especificados en el citado plan [21].

En cuanto a la generación eléctrica, la potencia instalada en plantas eléctricas de biomasa debe alcanzar los 26 MW en el año 2010 y los 64 MW en el año 2010, valores muy superiores a la potencia existente a principios del año 2008 (0,5 MW) [23].

El análisis de la situación actual en relación a las previsiones sobre consumos y energía producida con biomasa según el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2012*, permite detectar la necesidad en cuanto a un mayor incremento en consumos de biomasa como estrategia de sustitución

**Tabla II.2. Previsiones sobre consumos de energía primaria según el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015***

	2003		2006		2010		2015	
	ktep	%	ktep	%	ktep	%	ktep	%
TOTAL	25.954,5	100,0	26.514,9	100,0	30.352,1	100,0	30.961,1	100,0
No renovables	25.128,5	96,8	25.884,6	97,6	28.269,8	93,1	28.011,8	90,5
Renovables	826,0	3,2	630,3	2,4	2.082,3	6,9	2.949,3	9,5
Biomasa forestal y agrícola*	93,9	11,4	92,6	9,9	180,9	8,7	306,6	10,4
Residuos renovables*	147,7	17,9	117,6	18,7	166,7	8,0	198,8	6,7
Biogas*	22,7	2,7	40,8	6,5	162,6	7,8	205,6	7,0
Biocarburantes*	25,3	3,1	37,6	6,0	377,7	18,1	844,1	28,6

% calculado sobre el total de energías renovables. Fuente: Adaptado de [21,23].

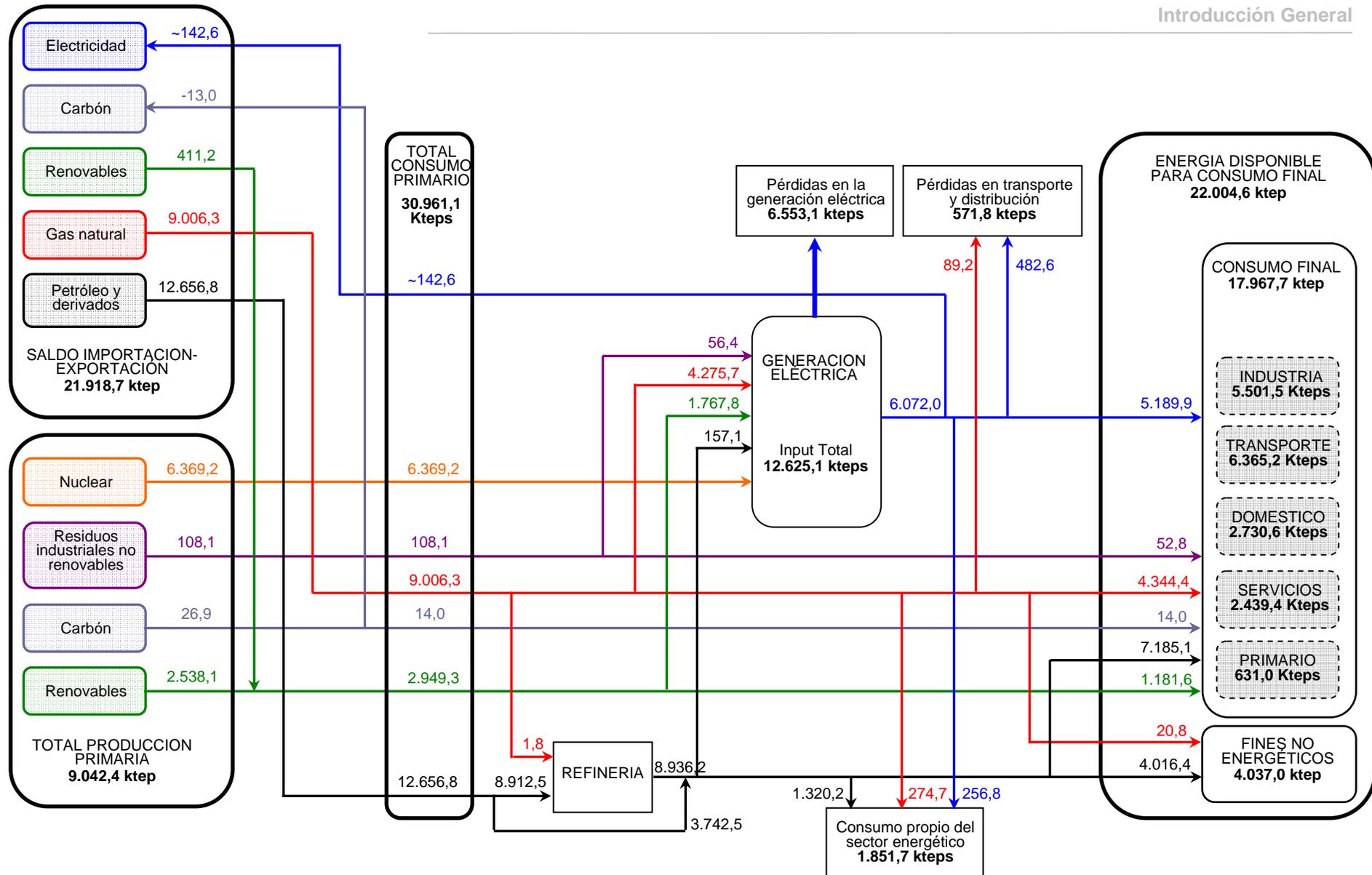


Figura II.2. Diagrama de los flujos energéticos de Cataluña previstos para el año 2015 en el escenario (en ktps)

Fuente: Adaptado de [21].

de los combustibles fósiles como el carbón, y la implantación de energía térmica y eléctrica, para alcanzar los objetivos energéticos planteados a medio y largo plazo. Los incentivos económicos señalados en el Real Decreto 661/2007 pueden contribuir a este necesario avance [24].

### 2.2.1. Plantas de biomasa en Cataluña

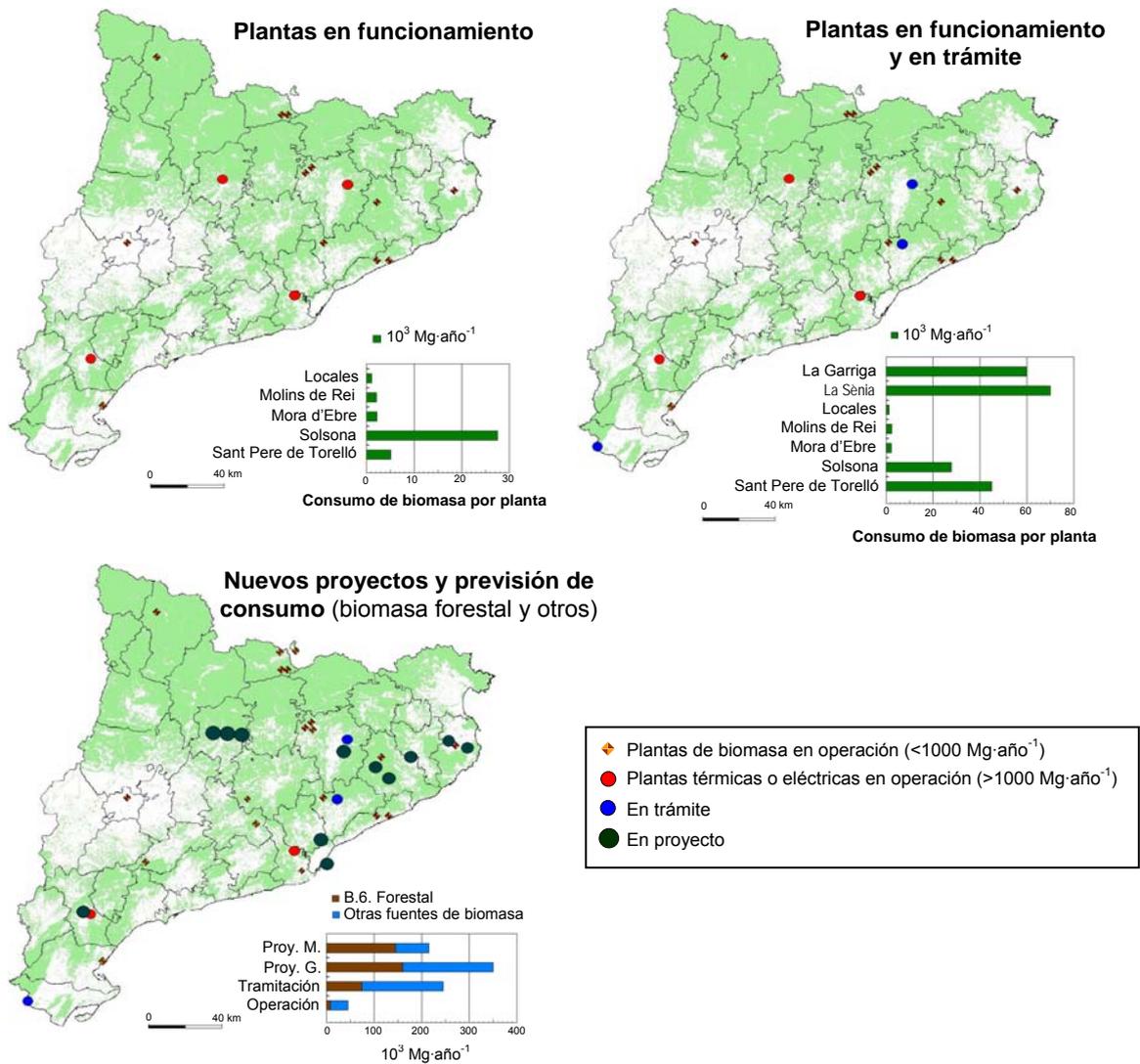
Cataluña contiene en operación 16 instalaciones de producción de energía con biomasa, en su mayoría de producción térmica. La mayoría de calderas instaladas consumen menos de mil toneladas al año de combustible y se destinan a la calefacción residencial [25]. Solamente cuatro instalaciones mantienen consumos de biomasa mayores (Figura II.2). Éstas vienen descritas a continuación.

En *Móra d'Ebre* (provincia de Tarragona) se encuentra en funcionamiento la única planta de gasificación con producción de electricidad a partir de cáscaras de almendras (500 kWe). La instalación consume 2.150 toneladas de biomasa, consumo similar al producido en la planta de calefacción centralizada localizada en el municipio de *Molins de Rei* (provincia de Barcelona), en la urbanización "La Granja".

La planta térmica de *Sant Pere de Torelló* (Provincia de Barcelona) consume 5.000 Mg/año de biomasa, en vistas de ampliar su producción de calor y consumo de biomasa hasta 45000 Mg/año (aún en trámite).

Finalmente, en *Solsona* (provincia de Lleida) destaca la planta de producción de calor más importante de Cataluña, con un consumo anual de residuos de proceso de madera de casi 30.000 Mg [25].

Próximamente pueden entrar en funcionamiento nuevas plantas de producción de energía con biomasa que en la actualidad se hallan en trámite administrativo. Entre ellas destacan la planta de producción de energía de La Sènia (provincia de Tarragona) que prevé un consumo anual aproximado de 70.000 Mg de residuos de madera y otros. En La Garriga se prevé el funcionamiento de otra planta de biomasa con un consumo de 60.000 Mg de residuos forestales al año (Figura II.3) [25].



**Figura II.3. Plantas de la generación de energía con biomasa en Cataluña.**

Fuente: Adaptado de [25].

## 2.2.2. Actores relevantes en la implantación de sistemas de producción de energía con biomasa en Cataluña

La viabilidad del uso de la biomasa como fuente de energía es el objetivo de numerosos organismos dedicados a la adaptación y el desarrollo de experiencias europeas basadas en la explotación, suministro y generación de energía a partir de biomasa residual forestal, agrícola e industrial.

**Tabla II.3. Organismos y empresas catalanas referentes en el aprovechamiento energético de la biomasa.**

<b>Entidades públicas</b>		
Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge		
Generalitat de Catalunya, Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural		
Generalitat de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques		
Diputació de Barcelona, Xarxa de Municipis		
Institut Català de l'Energia (ICAEN)		
Centre Tecnològic i Forestal de Catalunya (CTFC)		
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)		
Consorci Forestal de Catalunya (CFC)		
<b>Entidades privadas</b>		
Recuforest S.L.	Ecoenergia S.A.	Ambigest
Grup Cassà	Molins Energia S.A.	Termisa Energia S.A.
Tradema, Grup Tafisa	Energia Natural de Móra S.L.	Nova Energia, S.L.
Calderas, L.Solé-S.A.	Tratamiento y Valorización de Residuos S.A.	Avamsolar Biomassa
Construccions Corma S.A.	Tractament y revalorització de residus del Maresme, S.A.	Energrup Bio-renovables S.L.
Piobloc S.A.	Trama Tecno Ambiental S.A.	Gahelios
Grefer, S.L.	Recalor S.A.	Sapre, Energies Renovables
Ibersilva	Serinsa energia i mediambient S.A.	SoliClima

Fuente: Elaboración propia.

En Cataluña existe un gran número de agentes públicos y privados que intervienen en el estudio, control, promoción y venta de servicios basados en la generación de energía con biomasa. Estos agentes conforman una red de actores relevantes para el funcionamiento de experiencias actuales y futuras con biomasa (Tabla II.3). Los resultados divulgados a partir de las experiencias promovidas por empresas y entidades públicas facilitan la generación de nuevas iniciativas con los mismos objetivos.

### 2.2.3. Proyectos significativos en el avance de la generación de energía con biomasa en Cataluña

Durante la realización de la tesis, en Cataluña se han realizado diversas iniciativas dirigidas a la promoción y desarrollo de experiencias sobre aprovechamiento energético de la biomasa forestal. Los proyectos más destacados son los siguientes:

- **Proyecto Enersilva:** Duración del proyecto, del año 2004 al 2007. Financiado por el programa Interreg III B Sudoe con un presupuesto de 1 millón de euros. Participaron diversas organizaciones provenientes de seis regiones del sur-oeste de Europa (España, Francia y Portugal), en el cual se incluye el CTFC como representante de la región catalana. Los objetivos del proyecto fueron: (a) Involucrar a los propietarios forestales en el aprovechamiento

de la biomasa; (b) Difundir técnicas y tecnologías apropiadas para el aprovechamiento; (c) Contribuir al desarrollo rural mediante la creación de nuevos empleos; (d) Contribuir a la capitalización y sostenibilidad de los bosques mediante la gestión integral de los recursos forestales y valorización de los residuos; (e) Disminuir el riesgo de incendios y ataques de plagas y enfermedades en los bosques; y (f) Cooperar en la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles en la producción de energía [26].

- **Proyecto 5-Eures:** Duración del proyecto, del año 2005 al 2007. Financiado por la Comisión Europea mediante el programa Altener, participaron expertos forestales y en bioenergía de diversas regiones de Alemania, España, este de Lituania, Finlandia y Portugal. El *Departament de Medi Ambient i Habitatge*, de la Generalitat de Catalunya participó como entidad representante de España. El proyecto se basó en el trabajo conjunto de los diferentes miembros en la preparación de proyectos de demostración de plantas de bioenergía, iniciativas desarrolladas en las 5 regiones que conforman el equipo de trabajo. Los objetivos principales fueron: (a) Desarrollar del conocimiento a través de la comunicación entre grupos; (b) Desarrollar y promover modelos operacionales y técnicos de las plantas; (c) Desarrollar modelos empresariales, y (d) Diseminar los resultados en otras regiones de la Unión Europea [27].
- **Proyecto Rebrot-e:** Proyecto de 24 meses iniciado en el 2004. Presentado para el programa LIFE de la Unión Europea, participaron diversas empresas e instituciones de Catalunya y Valencia. El proyecto tenía como objetivo la demostración de la viabilidad técnico-económica del aprovechamiento de la biomasa forestal residual como materia primera para la industria del tablón y para la producción de biocombustible. Los objetivos específicos del proyecto fueron: (a) Realizar trabajos de campo para analizar la idoneidad de diversos tipos de máquinas en operaciones silvícolas, aplicando mejoras técnicas en función de la adaptabilidad requerida mejorando el rendimiento; (b) Implantar un sistema de gestión de las áreas de trabajo mediante herramientas de SIG; (c) Estudiar las repercusiones ambientales del aprovechamiento de la biomasa forestal; (d) Demostrar la compatibilidad del uso de la biomasa forestal para la fabricación de tablonos de partículas y la producción de biocombustibles, y (e) Difundir los resultados del proyecto para fomentar el uso de la biomasa para fines energéticos [28].

## 2.3. Referencias

- [1] Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de setiembre, relativa a la promoción de la electricidad generada apartir de fuetes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. L283/33 (2001).
- [2] Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. BOE núm. 282 (2006)
- [3] Naciones Unidas (1998). Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html> (Consulta: Octubre 2006).
- [4] Confederación Sindical de Comisiones Obreras (2008). Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007). Mayo 2008 [En línea]. Disponible en: <http://www.ccoo.es> (Consulta: Agosto 2008).
- [5] Comisión Europea. Eurostat. [En línea] Disponible en: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/> (Consulta: Abril 2008)
- [6] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2007). La energía en España 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.mityc.es/> (Consulta: Abril 2008).
- [7] Cámara de Diputados, Estados Unidos Mexicanos (2008). Precios Internacionales del Petróleo en el Mercado de América. [En línea]. Disponible en: <http://www3.diputados.gob.mx/> (Consulta: Marzo 2008).
- [8] International Energy Agency (2007). World Energy Outlook 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.iea.org> (Consulta: Abril 2008).
- [9] British Petroil (2007). BP Statistical Review of World Energy June 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.bp.com> (Consulta: Marzo 2008)
- [10] Comisión Europea (1997). Energía para el futuro, fuentes de energía renovables: Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitarios. COM (1997) 599. Bruselas.
- [11] Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de biocarburentes u otros combustibles renovables en el transporte. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. L123/42 (2003).
- [12] Comisión Europea (2005). Plan de acción sobre la biomasa. COM (2005) 628 final. Bruselas.
- [13] Comisión Europea (2005). Propuesta de Directiva para la promoción del uso de la energía a partir de fuentes renovables. COM (2008) 19 final. Bruselas.
- [14] Varsavsky, A. (2004). Química Verde y Prevención de la contaminación. Fundación Nexus, Buenos Aires. [En línea] Disponible en: <http://www.aqa.org.ar> (Consulta: Julio 2008).
- [15] National Renewable Energy Laboratory (2008). Biomass Research. [En línea] Disponible en: <http://www.nrel.gov/> (Consulta: Julio 2008)
- [16] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) (2005). Plan de Energías Renovables 2005-2010 [En línea] Disponible en: <http://www.mityc.es> (Consulta: Octubre 2008).
- [17] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (Mityc). Productores en Régimen Especial. Base de Datos. [En línea]. Disponible en: <http://www.mityc.es> (Consulta: Abril 2008).

- [18] Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa (BIOplat). [En línea] Disponible en: <http://www.bioplat.org> (Consulta: Agosto 2008).
- [19] IEA Bioenergy (2007). IEA Bioenergy Annual Report 2007. [En línea] Disponible en: <http://www.ieabioenergy.com> (Consulta: Diciembre 2008).
- [20] Project SES6-CT-020007-(SES6). Integrated European Network for Biomass Co-firing (NETBIOCOF). Proyecto co-financiado por la Comisión Europea mediante el "Sixth Framework Programme" (2002-2006). [En línea] Disponible en: <http://www.netbiocof.net> (Consulta: noviembre 2008).
- [21] Generalitat de Catalunya (2005). Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015. Generalitat de Catalunya. Barcelona
- [22] INEbase. Encuesta de consumos energéticos 2005, Consumos energéticos por comunidad autónoma y producto consumido. Instituto nacional de Estadística (INE). [En línea] Disponible en: <http://www.ine.es> (Consulta: Diciembre 2008).
- [23] Institut Català de l'Energia (ICAEN) (2008). Full mensual dels principals indicadors de l'energia a Catalunya. Desembre 2007. Generalitat de Catalunya (2008) Barcelona.
- [24] Institut Català de l'Energia (ICAEN), Generalitat de Catalunya (2008). Balanç energètic de Catalunya 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.icaen.net> (Consulta: Abril 2008)
- [25] Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya (2008). Estat de la valorització energètica de biomassa forestal a Catalunya, perspectives d'implantació i aspectes ambientals. Jornades EDER. Estratègies per al desenvolupament de les energies renovables a la comarca de la Selva. Sta. Coloma de Farners. 22 Febrer 2008.
- [26] Proyecto Enersilva (2007). Enersilva – Promoción del uso de la biomasa forestal con fines energéticos en el suroeste de Europa (2004-2007). ISBN: 978-972-96003-7-1.
- [27] 5 Eures (2007). [En línea]. Disponible en: <http://www.5eures.eu.com> (Consulta: Junio 2008).
- [28] Rebrot-e (2008). Projecte Rebrot-e: Demostració de mètodes innovadors en la valorització de biomassa de residus forestals mitjançant la gestió ambientalment sostenible de les muntanyes mediterrànies. [En línea]. Disponible en: <http://www.paisatge.net> (Consulta: Junio 2008).

Capítulo 3.

**Metodología General  
y Herramientas Utilizadas**

---



### 3. METODOLOGÍA GENERAL Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

El Capítulo 3 describe la metodología general empleada para el alcance de los objetivos indicados al inicio del documento.

#### 3.1. Investigación bibliográfica

Una vez han sido planteados los objetivos, la primera etapa ha sido la investigación bibliográfica en libros especializados, publicaciones en revistas, publicaciones de congresos e información relacionada con el campo de la biomasa por Internet. Por Internet, se han consultado bases de datos de tipo oficial procedente de empresas y de administraciones/organismos europeos (Comunidad Europea, Eurostat) e internacionales (FAO, Agencia Internacional de la Energía, Agencia de la Energía de Estados Unidos), nacionales (*Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto Nacional de Estadística*, y el *Instituto para el Desarrollo y el Ahorro de Energía*, entre otros del *Gobierno de España*) y regionales (*Agència de Residus de Catalunya, Institut d'Estadística de Catalunya, Institut Català de l'Energia*, entre otros de la *Generalitat de Catalunya*)

La información obtenida ha sido valorada, aceptada o descartada en función de la rigurosidad y origen de los datos, así como de la actualización de éstos.

#### 3.2. Consultas con especialistas y expertos

La realización de diversas consultas a expertos mediante entrevistas, y las visitas a empresas e instituciones relacionadas con el sector de la biomasa han aportado datos actualizados y de primera mano, esencialmente útiles en la determinación de la certeza de los datos obtenidos previamente.

La participación en congresos y seminarios sobre biomasa ha aportado la posibilidad de contrastar y ampliar el conocimiento en temas específicos mediante la comunicación directa con el autor de los datos publicados.

### **3.3. Herramienta de análisis ambiental: “Análisis del Ciclo de Vida”**

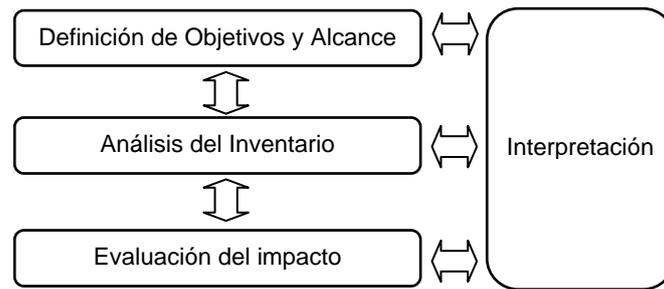
El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta para la evaluación ambiental que tiene como objetivo la evaluación de la carga ambiental o huella ecológica asociadas al consumo de energía y de materias para la fabricación de un producto, proceso o servicio, considerando todas las etapas de su ciclo de vida.

El ACV se estructura en cuatro etapas fundamentales (Figura III.1), definidas y desarrolladas mediante la norma internacional ISO (serie ISO 14040:1997 hasta ISO 14043:1997) para su uso en estudios de impacto ambiental. En la actualidad se disponen de diversos soportes informáticos que permiten el análisis cuantitativo de los impactos ambientales de multitud de procesos y productos siguiendo el procedimiento estandarizado. Los soportes informáticos más destacados son: SimaPro Pre-Consultants (Ecobilan group), Gabi (*Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde*, IKP), LCAiT (*Chalmers Industriteknik*) y Humberto (*Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg Ltd.*, IFEU).

Estos programas contienen bases de datos sobre consumos de energía y materia de los procesos y productos, que posibilitan el cálculo de sus impactos asociados. En la presente Tesis se han consultado y utilizado datos procedentes de la base de datos del Instituto Suizo de Investigación en ACV, Ecoinvent [1]. Se ha elegido debido a la representatividad, número y aplicabilidad de sus datos, procedentes de experiencias europeas e internacionales.

### **3.4. Herramienta de análisis de costes: “Análisis del Coste del Ciclo de Vida”**

El Análisis del Coste del Ciclo de Vida (ACCV) es una herramienta definida para el análisis del coste de un producto durante todo su ciclo de vida, el cual incluye su investigación y desarrollo, construcción, operación y mantenimiento, y disposición final [2]. El ACCV incluye los costes cubiertos por uno o más actores en el ciclo de vida del producto (proveedor, productor, consumidor y gestor de residuos) [3]. Esta herramienta permite detectar las etapas o componentes clave que puedan repercutir en el abaratamiento o encarecimiento de un producto, permitiendo la evaluación de alternativas para la optimación del producto.



**Figura III.1. Fases del Análisis del Ciclo de Vida.**

Fuente: Adaptado de [4].

La herramienta ACCV está a la expectativa de ser añadida en un futuro próximo a las normas estandarizadas del ACV, con la intención de conseguir una base metodológica que permita analizar las implicaciones económicas del ciclo de vida de los productos [5].

La aplicación de esta herramienta en la evaluación de la viabilidad económica de los sistemas de generación eléctrica con cultivos energéticos permite analizar el peso económico de cada etapa del ciclo de vida (cultivo, transporte, generación eléctrica en planta, disposición de residuos). El análisis de los datos por etapas permite detectar qué componentes resultan críticos en la viabilidad del sistema.

### 3.5. Equipos de laboratorio

Para el análisis de las características físico-químicas y calorimétricas de la biomasa de colza (*Brassica napus*) se han utilizado diferentes dispositivos y aparatos de laboratorio. El conjunto de métodos y técnicas para el análisis, y de los dispositivos de laboratorio utilizados se describen en el apartado 10.2. *Metodología experimental*, del Capítulo 10.

### 3.6. Modelos de cálculo y programas informáticos utilizados

El uso de modelos matemáticos requiere la adaptación de las unidades de éste a las definidas en el propio estudio mediante el uso de factores de conversión. Se han utilizado los siguientes modelos y programas informáticos para las siguientes áreas de estudio:

- **Integrated Environmental Control Model (IECM):** Modelo elaborado por *National Energy Technology Laboratory* (NETL). Herramienta de cálculo de costes para plantas eléctricas con carbón.
- **Modelo sobre control de emisiones de SO<sub>2</sub>, EPA/600/R-00/093:** Modelo elaborado por *Environmental Protection Agency* (EPA). Herramienta de cálculo de costes para sistemas de desulfurización de gases de combustión.
- **Mirabosc:** Modelo elaborado por el *Centre de Recerca Ecològica y Aplicacions Forestals* (CREAF). Programa utilizado para el cálculo de la superficie forestal de Cataluña.
- **ISC-Aermod View:** Simulador de modelos de dispersión elaborado por *Lakes Environmental Software Inc.* Herramienta utilizada para el cálculo de los niveles de inmision de los contaminantes emitidos por una instalacion de combustión (Incineradora de Campdorà, Girona).

### 3.7. Referencias

- [1] Ecoinvent Centre (2003). Ecoinvent data v1.01. Final reports ecoinvent 2000. nº 1-15. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2003. CD-ROM.
- [2] Kawauchi, Y.; Rausand, M. (1999) Life Cycle Cost (LCC) Analysis for oil and chemical process industries. [En línea]. Disponible en: <http://www.ntnu.no/ross/reports/lcc.pdf> (Consulta: Mayo 2008).
- [3] Rebitzer, G.; Hunkeler D. (2003). Life Cycle Costing in LCM – Ambitions, Opportunities, and Limitations, Discussing a Framework. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (2), pp.253-256.
- [4] Rieradevall, J. et al (2001). Aplicació de l'ACV als envasos plàstics i metàl·lics de mida petita del sector industrial català. Rang de Grup, Elisaga, UAB. Barcelona (inédito)
- [5] Guineé, J. B. et al. (2002). Life Cycle Assessment. An operational guide to ISO standards. Volumen 1,2,3. Centre of Environmental Science, Leiden University (CML), The Netherlands.

Capítulo 4.

**Análisis multicriterio del uso de la  
biomasa forestal con fines energéticos**

---



## 4. ANÁLISIS MULTICRITERIO DEL USO DE LA BIOMASA FORESTAL CON FINES ENERGÉTICOS

### 4.1. Introducción y objetivos

Cataluña, además de contener superficies agrícolas con disponibilidad de agua para la producción de cultivos energéticos de biomasa, se diferencia de algunas comunidades autónomas por su elevada superficie forestal. Dentro de un sistema integral de aprovechamiento de la biomasa, Cataluña, por sus relativamente elevados recursos forestales, debe considerar la biomasa forestal como parte importante de los recursos que contribuyen a los fines energéticos de la biomasa y a la producción de energía renovable. En otras regiones de España, en cambio, los cultivos energéticos pueden ser una solución más apropiada, teniendo además un impacto socio-económico favorable.

La realidad de Cataluña muestra como los residuos obtenidos en la explotación forestal solamente son aprovechados en algunas experiencias de producción de energía térmica a escala local, siendo los residuos industriales (los residuos agroindustriales y los residuos de la industria del conglomerado) los tipos de biomasa con menos problemas de suministro para su aprovechamiento energético en plantas de producción de energía de mediana y gran escala. Cualquier cambio en el tipo de combustible de biomasa utilizado para la producción de energía contiene consecuencias socio-económicas asociadas, como la generación o pérdida de puestos de trabajo que afecta a la economía territorial local y/o regional. Por este motivo, junto a la viabilidad tecno-económica de la explotación de la biomasa para fines energéticos conviene analizar los beneficios socio-económicos del sistema de bioenergía a escala regional y local.

El presente Capítulo 4 muestra un análisis multicriterio sobre el aprovechamiento de los recursos forestales como fuente de energía realizado antes de la aprobación del RD 661/2007. El análisis parte de los resultados obtenidos en dos sesiones de trabajo realizadas en la Universidad Autónoma de Barcelona, en el marco de las Jornadas de Análisis Multicriterio. Estas sesiones de trabajo reunieron a diversos expertos del área de la biomasa, que analizaron desde los puntos de vista social, económico, tecnológico y ambiental los siguientes aspectos: **(a)** la situación del uso de la biomasa forestal como fuente de energía en Cataluña, **(b)** la necesidad de la gestión forestal para

finés energéticos, y (c) los impactos relacionados con la explotación forestal, el transporte y la generación de energía. A continuación se muestra la metodología utilizada para el análisis y los resultados obtenidos en las sesiones de trabajo [1].

## 4.2. Etapas de la Evaluación Integrada y desarrollo de las sesiones de trabajo

La “Evaluación Integrada” [2] aspira a recoger, ordenar, sintetizar y presentar un conocimiento interdisciplinar sobre un problema complejo con el objetivo de que pueda servir de soporte a la toma de decisiones políticas. La Evaluación Integrada, mediante procesos de participación, busca la mejora de la equidad (distribución social) y factibilidad de las propuestas obtenidas, así como favorecer la comunicación y transparencia en la toma de estas decisiones. La metodología utilizada en una Evaluación Integrada se estructura en 3 etapas (Figura IV.1).

### 4.2.1. Etapa 1: Entradas de Información

Se elaboró un dossier de trabajo a partir de la información recopilada mediante una revisión bibliográfica, entrevistas a expertos, consulta de bases de datos, trabajo en modelos, etc. El dossier estaba compuesto por artículos de prensa, preguntas para la consulta y escenarios definidos sobre generación de energía con biomasa. El objetivo del dossier era el de exponer y comunicar las ideas clave del trabajo realizado que serviría de base para la discusión y trabajos en grupos.

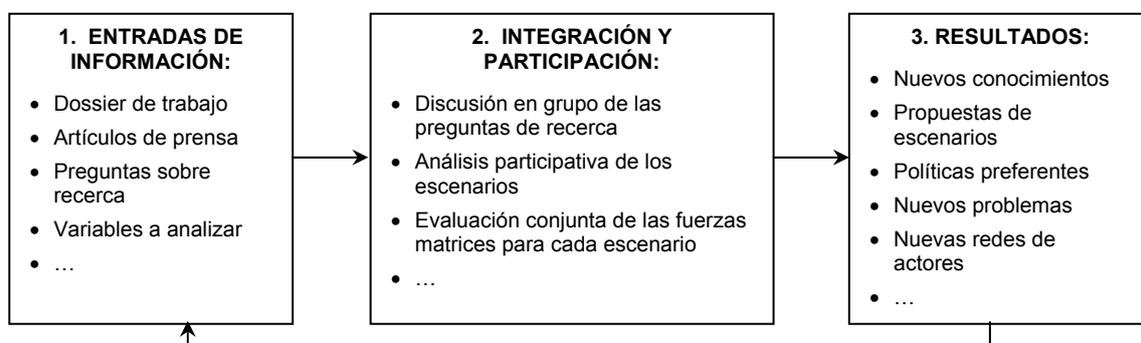


Figura IV.1. Etapas de un proceso de Evaluación Integrada

Fuente: Adaptado de [2].

## 4.2.2. Etapa 2. Integración y participación

Esta etapa incluye la formación de las 2 sesiones de trabajo con dos grupos de discusión “Integrated Assessment Focus Group”. Éstas fueron compuestas por un total de 22 expertos (empresarios forestales, promotores/inversores, políticos, propietarios forestales, técnicos forestales, usuarios, ecologistas, científicos, etc.) relevantes en la materia, procedentes de las siguientes instituciones:

### **SESIÓN DE TRABAJO 1**

#### ADMINISTRACIÓN

- Diputación de Barcelona. Oficina Técnica de Prevención Municipal de Incendios Forestales.
- Diputación de Barcelona, *Àrea d’Espais Naturals*. Dirección del Parque Natural del Montseny.

#### EMPRESAS

- *Rebrot i Paisatge, S.L.* (aprovechamientos forestales)

#### CENTROS TECNOLÓGICOS FORESTALES

- *Centre Tecnològic i Forestal de Catalunya* (CTFC).

#### INSTITUTOS DE INVESTIGACIÓN Y UNIVERSIDADES

- Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental. Universidad Autónoma de Barcelona. (UAB-ICTA).
- Instituto de Medio Ambiente. Universidad de Girona

### **SESIÓN DE TRABAJO 2**

#### ADMINISTRACIÓN

- Generalitat de Catalunya (Asesor de políticas ambientales y de sostenibilidad).
- Diputación de Barcelona. Oficina Técnica de Prevención Municipal de Incendios Forestales.
- Ayuntamiento de Sant Celoni.

#### EMPRESAS

- Grupo Comsa (Construcción y servicios)
- Recuforest (Aprovechamientos forestales)
- Ciaries S.A. (Fabricación y comercialización de compuestos de cal)

#### CENTROS DE INVESTIGACIÓN Y UNIVERSIDADES

- *Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals* (CREAF)

- Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental. Universidad Autónoma de Barcelona. (UAB-ICTA).
- Instituto de Medio Ambiente. Universidad de Girona

### PROPIETARIOS FORESTALES

- Asociación de Propietarios Forestales del Montnegre-Corredor.
- Centre de la Propietat Forestal (CPF).

### ECOLOGISTAS

- Liga para la Defensa del Patrimonio Natural (DEPANA)

Los expertos fueron escogidos bajo un criterio de máxima representatividad en la diversidad de intereses, conocimientos, posiciones y valores. Cada sesión tuvo una duración aproximada de 3 horas. Ver Figura IV.2.

#### o 1ª parte de la sesión: Debate entorno a preguntas clave

En base al trabajo preliminar realizado se pretendió profundizar en las siguientes preguntas clave:

1. ¿Es adecuada la caracterización de la problemática de la biomasa forestal en Cataluña presentada?
2. ¿Cuales son las consecuencias ambientales y sociales más probables de no intervenir en la dinámica actual?
3. ¿Qué papel representa la seguridad en el suministro de biomasa para la posible evolución del escenario actual? ¿Qué prácticas se requieren por parte de los diferentes agentes para asegurar el suministro de biomasa forestal?
4. ¿Qué posibles repercusiones tendría el uso de la biomasa forestal como fuente de energía en el actual mercado de la madera? ¿Como se debería vertebrar el nuevo mercado de la madera? ¿Qué papel debe adoptar la administración como propietario forestal?



**Figura IV.2. Imágenes del transcurso de las Jornadas de Análisis Multicriterio (UAB Bellaterra-Barcelona, Marzo-Abril 2004)**

○ 2ª Parte de la sesión: discusión en grupos sobre los escenarios de generación energética

A partir del planeamiento estratégico de una apuesta para el aprovechamiento energético de la biomasa forestal en Cataluña y mediante la información obtenida, se desarrollaron tres estrategias para la valorización energética de la biomasa definidas en tres escenarios. Los escenarios planteados y discutidos por los grupos de discusión, descritos en el dossier, son:

- Plantas de producción térmica con calderas de 0,1 - 0,5 MW.
- Plantas de producción térmicas con calderas de 0,5 - 2 MW
- Plantas de cogeneración de 5 MW

Durante la sesión de trabajo se procedió al análisis comparativo de las variables tecnológicas, económicas, políticas y sociales para tres tipos de planta definidos en los tres escenarios sobre producción de energía con biomasa forestal.

○ 3ª Parte de la sesión: Conclusión y evaluación del proceso

Se intenta ordenar, integrar y sintetizar las discusiones realizadas para cada uno de los grupos.

### 4.2.3. Etapa 3: Resultados de las sesiones de trabajo

En base a las discusiones realizadas, el material obtenido corresponde a los resultados mostrados a continuación.

## 4.3. Resultados en el análisis multicriterio del uso de la biomasa forestal con fines energéticos

### 4.3.1. Análisis de la situación de la biomasa forestal a Cataluña

Los principales obstáculos para la implantación de tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa forestal son: la falta de rentabilidad económica y la existencia de problemas logísticos y en el suministro.

#### ► Falta de rentabilidad económica

- *“En este momento es más económico importar madera del extranjero que extraerla de los bosques cercanos. Cataluña consume 6 millones de m<sup>3</sup> de madera y sólo se producen 500.000 m<sup>3</sup>.”*
- *“La limpieza del sotobosque o de la madera de mala calidad es económicamente poco viable. Se trata de una operación compleja, difícil de mecanizar y se produce en lugares de muy difícil acceso”*

#### ► Problema de la logística y garantía del suministro

- *“Actualmente no existe prácticamente en Cataluña nadie que tenga un procedimiento que permita transformar la biomasa forestal en un producto que sea consumible por las instalaciones, ni que pueda dar una garantía de suministro”*

La falta de rentabilidad económica de la explotación forestal provoca la acumulación de la biomasa en los bosques de Cataluña. La acumulación de biomasa puede incrementar el riesgo y peligrosidad de los incendios.

#### ► Acumulación de biomasa en el bosque

- *“La acumulación actual tiene unas características específicas, que da como resultado una acumulación de madera de baja calidad (árboles pequeños) y de un soto monte denso. En este momento, muchos de los bosques catalanes están preparados para el aprovechamiento de madera”*

- *“La acumulación de biomasa puede ser considerada como positiva o negativa, dependiendo de los factores considerados. Entre los positivos se encuentran la protección del suelo o la acumulación de carbono. Entre los negativos podemos encontrar el potencial de incremento del riesgo y peligrosidad de los incendios o la falta de valorización de un recurso”.*
- *“Según un estudio realizado por el CREAF (Pla de Biomasa, Àmbit Forestal), donde se aplican criterios sobre copas y accesibilidad por pendientes, el recurso de biomasa para el aprovechamiento energético no es tan significativo, y además estás situado en determinadas zonas del territorio”*

► **Potencial incremento de la peligrosidad y riesgo de incendios**

- *“Una elevada cantidad de biomasa en el bosque no tiene por qué suponer un riesgo elevado de incendio. El riesgo y peligrosidad de los incendios depende en gran medida de la estructura y formato en que se encuentra la biomasa. En este sentido, la biomasa fina incrementa mucho el riesgo y la peligrosidad”*

La falta de rentabilidad económica de los bosques para la producción de energía es debida a la existencia de ineficacias en el mercado de la madera, el alto grado de fragmentación de la propiedad forestal (falta de asociaciones) y a la existencia de una Política Forestal poco efectiva.

► **Ineficacias en el Mercado Actual de la Madera**

- *“El mercado de la madera en Cataluña se encuentra en manos, prácticamente, de una sola empresa”*
- *“El mercado es ineficaz puesto que el precio viene condicionado por unas pocas empresas. La inexistencia de un mercado real hace que no exista, ni se pueda desarrollar, un sector forestal fuerte en Cataluña.*

► **Alto grado de fragmentación de la propiedad forestal**

- *“La división de la propiedad forestal es un problema importante. Dificulta la mecanización de la actividad, la negociación de los precios, la garantía de suministro,...”*
- *La Diputació de Barcelona está promoviendo la creación de asociaciones locales de propietarios forestales para coordinar la gestión y la comercialización de productos forestales”.*

► **Planificación Forestal poco efectiva**

- *“La planificación actual de la gestión forestal es poco efectiva. No existen subvenciones a largo plazo, lo que resulta en una falta de seguridad sobre el modelo de gestión forestal que se pretende en un*

*futuro. Esta inseguridad sobre el modelo futuro dificulta las inversiones económicas y el establecimiento de estrategias por parte de los propietarios y de las empresas del sector”.*

- *“Existen políticas contradictorias con el mercado actual. Los incentivos de la Generalitat vienen encaminados hacia un incremento del tamaño de los árboles, es decir, el uso de los árboles para producir madera de calidad. El mercado actual de la encina es la leña, y existe poca seguridad que en un futuro esta madera de encina de calidad tenga mercado. Se requiere, entonces, investigar más sobre sus posibles usos”*

En Cataluña existe un Sector Forestal débil debido a la falta de una Política Forestal efectiva y a la poca inversión, debido en parte a la edad avanzada de los propietarios forestales.

► Edad avanzada del propietario forestal. Dificultad en la innovación.

- *“La representación del propietario forestal supera la media de los 70 años. Este hecho dificulta la introducción de cambios y de la innovación en general”.*

La existencia de una Política Forestal poco efectiva es motivada por la falta de definición de una política por parte de la administración competente. Actualmente, la Generalitat está creando expectativas a los propietarios forestales respecto al posible aprovechamiento de la biomasa forestal para uso energético.

► Política de la administración pública definida

- *“No existe una política definida sobre los diversos usos potenciales de las masas forestales: política de madera de calidad, de estructuración de bosques para afrontar los incendios, de bosques para aprovechamiento energético, de usos recreativos y educativos,..”*
- *“La administración no ha internalizado el uso de la biomasa en instalaciones públicas, como una opción de energía renovable a considerar”.*

► Posibles nuevas ayudas de la Generalitat:

- *“Las expectativas que está creando la Generalitat a los propietarios forestales respecto al posible aprovechamiento de la biomasa forestal para uso energético no se entiende sin la intervención de ayudas”.*

- “La Generalitat no quiere dar dinero público directamente para la instalación de una planta. Se prevé que las ayudas a los promotores se realice mediante las tarifas eléctricas del régimen especial”.

La Figura IV.3 muestra un esquema sobre las relaciones causa-efecto detectadas en el transcurso de la discusión en grupos y que permiten ayuda a explicar la situación de la biomasa forestal en Cataluña.

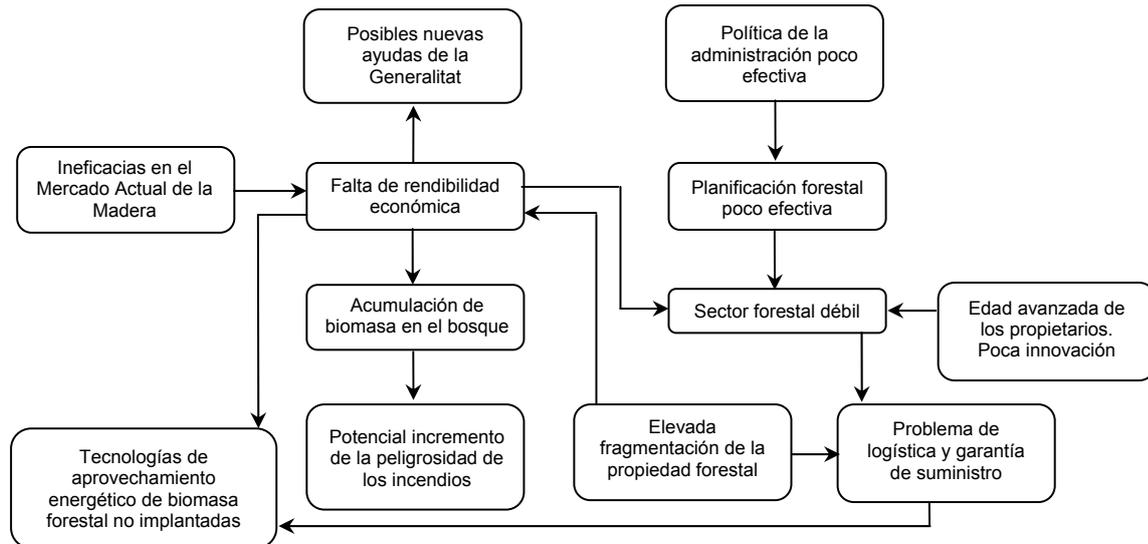


Figura IV.3. Relaciones causa-efecto de la biomasa forestal en Cataluña

#### 4.3.2. Principales acciones para la solución de los problemas del sector forestal

##### 1. PLANIFICACIÓN FORESTAL CONSENSUADA Y EFECTIVA

Los agentes consultados creen oportuna la realización de una política de planificación forestal consensuada entre todos los actores implicados (empresarios forestales, propietarios, administración, centros de investigación, usuarios, etc.)

- “No sólo se trata de aprovechar los excedentes de la biomasa existentes actualmente en los bosques, si no de realizar una planificación a largo plazo. Se debe planificar como conjugar todos los posibles usos que tiene la madera”.

## 2. ACTUACIONES EN EL ÁMBITO DE LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS

**2.1.** La limpieza de los bosques es una de las acciones que se debe abordar en la política para prevenir los incendios forestales.

- *“En las limpiezas, se debe pensar a qué escala se puede actuar. No es factible pensar que podemos o debemos actuar mediante la limpieza forestal sobre todas las 1.500.000 ha forestales de Cataluña situadas en zonas de elevado riesgo de incendio”.*

**2.2.** Para realizar una política forestal de prevención de incendios, se debe actuar sobre la estructura.

- *“No es suficiente con las limpiezas. Se deben realizar mejoras estructurales de las masas boscosas que permitan auto-denderse de los incendios, rebajando el riesgo y peligrosidad.”*

## 3. CREACIÓN DE UN MERCADO REAL DE LA MADERA.

Se deben buscar acciones y alternativas que ayuden a la creación de un mercado real de la madera.

### 4.3.3. Aspectos a considerar en un potencial aprovechamiento energético de la biomasa forestal en Cataluña

#### ASPECTOS GENERALES

► Complementariedad con otras energías renovables

**A)** La biomasa forestal es una energía renovable que puede interactuar y complementarse fácilmente con otras energías renovables. Es una apuesta interesante, debido a que puede ayudar a sustituir otras fuentes de energía como los combustibles fósiles.

- *“La biomasa forestal es una energía más fácilmente almacenable que otras renovables”.*
- *“La biomasa forestal presenta unas dificultades en la logística de suministro y en los procesos de transformación que no existen en la energía solar y eólica”*

**B)** El balance de CO<sub>2</sub> para esta energía se considera neutro en el proceso de transformación del recurso a energía. En el balance global se deberían considerar las emisiones durante la

extracción, transporte y gestión de los residuos, así como la potencial fijación del carbono en el suelo.

► Adaptación de las estrategias de gestión forestal y de aprovechamiento en el territorio

**A)** Las áreas forestales de Cataluña son ambiental y socialmente diversas. Su diversidad hace que cosas factibles en un área determinada, sean completamente diferentes en otra. Los actores sociales y las características del territorio determinan cuál es el modelo y la opción más adecuada.

- *“Existen territorios que contienen características naturales bien definidas para la producción de madera de calidad. A la vez, existen espacios periurbanos donde se dan otras sinérgias: los bosques tienen otros usos y las realidades sociales están más ligadas a la protección y uso recreativo del bosque”.*
- *Experiencias como Sant Pere de Torelló y Molins de Rei, sirven para ver qué ha fallado y qué no. Se deben conocer los aspectos negativos para no volver a caer en los mismo”.*

**B)** Es importante adaptar el tipo de energía producida (calor y/o electricidad) al tipo de demanda del territorio.

**C)** El acceso a la red eléctrica en condiciones de absorber la energía generada, es una variable que restringe la ubicación de las plantas que generan electricidad.

- *“No todos los emplazamientos son aptos para el suministro en una red de 5MM. La red debe tener capacidad para evacuar esta entrada de electricidad”.*

## ASPECTOS ECONÓMICOS

► Coexistencia con el mercado actual

**A)** Se debe considerar las posibles competencias que puedan haber en los usos actuales de la biomasa forestal. Existe una industria de la madera con la que se deben buscar sinergias comunes.

- *“Una planificación de la gestión forestal enfocada al aprovechamiento energético podría ser nefasta por la poca industria de la madera que existe actualmente”*

**B)** Lo que se debe aprovechar, básicamente, son los productos que ahora tienen menos mercado, como las maderas de segunda calidad y los residuos que se dejan en el bosque. Para conseguirlo, se requiere una definición/regulación de qué tipo de biomasa forestal es aprovechable energéticamente. Se debe acotar el término.

- *“Si se puede controlar lo que va a una planta habría menos oposición por parte de las empresas del sector forestal. Por otro lado si quien lo acaba determinando es el mercado, las empresas del sector producirán una fuerte oposición”.*

► Generación de un mercado de biomasa forestal para energía

**A)** El aprovechamiento energético es potencialmente posible (tecnología, economía, recurso, etc.) pero aun no sabemos qué mercado tiene este producto. Es necesario avanzar en el estudio y concreción de la demanda de biomasa forestal por parte de las industrias, así como en la posible oferta de subproductos de biomasa forestal.

- *“Según datos de estudios realizados en la época de los 80, para que una empresa se plantee el cambio de combustible, el coste de la biomasa debe situarse entre un 20-25% menor que el coste del combustible actual”.*

**B)** Un sector como el forestal donde la administración tendrá que poner dinero, el mercado final existente será siempre un mercado tutelado/intervenido por la administración.

- *“Si se subvenciona el uso de la madera para producir energía, los competidores se quejarán porque ellos tienen derecho a recibir la subvención. Una posibilidad de salvar esta situación es no subvencionar la industria generadora de energía y subvencionar la extracción, es decir, a las asociaciones productoras de madera. En este caso sería estas asociaciones las que decidirían el destino de la madera”.*
- *“Un campo interesante a contemplar es la posibilidad que el sector público incorpore el uso de un recurso endógeno local como es la biomasa forestal en los equipamientos. Es necesario que la administración promueva que determinados equipamientos incorporen biomasa como energía renovable complementaria a la térmica solar”.*
- *“Es necesario estudiar el papel que debe desarrollar la administración como propietario forestal, por tal de impulsar el aprovechamiento de la biomasa en la creación de un mercado”*

- *“Las ayudas económicas de la administración no pueden ir solamente ligadas a los kW generados si no a que se debe contemplar una componente de hectárea limpia. Si no se realizara de este modo, solamente se explotaran las zonas que obtengan un mayor beneficio energético con menores costes económicos”.*

► Costes de extracción y transporte

Los costes de extracción varían según la tipología de biomasa extraída y el sistema mecánico utilizado. Por razones de rentabilidad económica, la biomasa solamente es utilizable a una cierta distancia del lugar de producción. Esta distancia se sitúa entre los 30 y 50 km. Los costes aumentan significativamente para distancias superiores

### ASPECTOS TECNOLÓGICOS

► Proyectos tecnológicamente posibles a corto plazo

La tecnología contrastada a corto plazo es la combustión directa. Tecnologías más sofisticadas como la gasificación y la pirólisis necesitan aun más tiempo para su investigación.

- *“Los proyectos de cogeneración son la mejor solución desde el punto de vista técnico, pero presenta dificultades desde el punto de vista económico y de complejidad en su gestión”.*

► Tecnología de extracción de biomasa

Es necesaria la normalización y caracterización de los productos procedentes de la biomasa forestal antes de su comercialización.

- *“Es necesario regular las condiciones del combustible en términos de humedad, ya que la humedad puede variar mucho y eso afecta directamente al precio que paga, o puede pagar, una planta”.*
- *“Las copas y ramas del pino piñonero son un producto de alta calidad y de buen uso para el aprovechamiento energético”.*
- *“En un estudio de las diferentes tecnologías disponibles, lo que se observó es que lo que ofrecía más versatilidad en el formato de combustible de biomasa forestal era el horno de parillas con combustión”*

### ► Evacuación de la electricidad

Es necesario garantizar el suministro de combustible, pero también garantizar la evacuación de la electricidad generada. No todos los puntos de la red eléctrica están preparados para poder absorber la electricidad generada.

## ASPECTOS POLÍTICOS

### ► Papel de la administración pública

**A)** La posible valorización energética de la biomasa forestal debe responder a una estrategia global, no sólo energética, sino también de tipo ambiental y social.

- *“Existen incentivos de tipo ambiental locales como la prevención de incendios, y globales, como los sumideros de carbono. También se deben considerar los beneficios sociales como el desarrollo rural y la generación de puestos de trabajo”.*

**B)** La viabilidad económica de los proyectos de aprovechamiento de biomasa forestal debe contemplar los costes sociales y ambientales de no hacer nada.

- *“Es necesario analizar las consecuencias ambientales y sociales de no intervenir”*
- *“Dejar la biomasa en el bosque tiene unas consecuencias sociales, ambientales y económicas. La combustión descontrolada en un incendio provoca unas emisiones contaminantes graves e impide el uso de un recurso”*
- *“Por qué no plantear el invertir menos en extinción de incendios e invertir más en la prevención, es decir, en la estructuración, explotación y limpieza de bosques”.*

## ASPECTOS AMBIENTALES

### ► Qué supone la explotación sostenible del bosque

Si se realiza una explotación sostenible de los bosques, la cantidad de biomasa disponible se reduce. No se puede extraer toda la biomasa, ya que se debe tener en cuenta conceptos como la pérdida de nutrientes o la protección del suelo.

► Problemática ambiental de las emisiones

Durante la combustión de la madera, se emiten diversas sustancias (hidrocarburos aromáticos, compuestos de nitrógeno, partículas, emisiones de carbono, emisiones de azufre, etc.) que se deben tener en consideración.

- *“Se debe tener en cuenta que lo que se emite en un incendio es una combustión descontrolada y lo que se emite en una planta es una combustión controlada”.*
- *“Las emisiones finales dependen de la tecnología utilizada. Los proyectos existentes contemplan todas las medidas correctoras necesarias asociadas a la combustión. Estas medidas están reguladas según el tipo de instalación”*
- *“Hay un tema normativo que se debe tener en cuenta: según el tipo de combustible el proceso se llama incineración o valorización energética”.*
- *“El impacto de las emisiones se debe analizar tanto a nivel local como a nivel global”*

► Mosaico del paisaje y cultivos energéticos

Una de las posibilidades a explorar es la alternativa de dedicar zonas del territorio a cultivos energéticos o a explotaciones forestales con finalidades energéticas. Estas alternativas podrían actuar como fuentes complementarias de biomasa para las plantas de valorización de biomasa.

- *“El uso de antiguos campos agrícolas con finalidades energéticas permitiría la confección de un mosaico en el paisaje que tendría diversos efectos ambientales positivos”.*

## ASPECTOS SOCIALES

► Problemática en el suministro y en la logística

Un factor crítico es conseguir implicar a los actores que puedan hacer posible el aprovechamiento de la biomasa.

- *“Es necesario el establecimiento de acuerdos entre pequeñas empresas que se dediquen a las tareas de limpieza y mejora forestal, y de los actores implicados en general, para poder garantizar el suministro a una planta de cierto tamaño”.*

- “Se plantea la posibilidad de realizar un modelo de relaciones de los propietarios con las plantas de generación eléctrica, donde los propietarios fueran partícipes de los proyectos. La participación de los propietarios forestales en la inversión puede ayudar a dar estabilidad en los proyectos”.

► Percepción social negativa

La problemática asociada a las emisiones y a otros potenciales impactos no solamente ambientales de las plantas, es un tema que puede generar rechazo social hacia un proyecto. Se debe tener en consideración y gestionar el tema adecuadamente.

- “Hay que tener cuidado con el rechazo social. Este aparece, por ejemplo, cuando se utiliza la palabra residuo o incineración”.

#### 4.3.4. Análisis categórico sobre los impactos asociados a la implantación de nuevas plantas de producción de energía con biomasa

Los resultados de la evaluación de los escenarios vienen representados mediante el código cromático mostrado en la Tabla IV.1.

**Tabla IV.1. Código de puntuación para el análisis categórico**

Puntuación	Grado	Código Cromático
Positivo	Mucho	
	Poco	
Neutro	-	
Negativo	Poco	
	Mucho	

#### CONSIDERACIONES GENERALES

- Plantear escenarios de implantación de plantas de biomasa desde el punto de vista de la tecnología se ha visto que era insuficiente.
- Los impactos positivos y negativos parecen ser dependientes de la regulación/control que haga la administración.

- La ambivalencia respecto si los potenciales impactos serán positivos o negativos, es más grande a medida que las plantas son de mayor magnitud.

### VALORACIÓN AMBIENTAL

- Dificultad en la gestión de los residuos producidos durante el proceso (cenizas, peletizado, trituración, etc.)

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- La problemática de la gestión de residuos se percibe como neutra o ligeramente positiva.
- Cuanto mayor es el tamaño de la planta, mayor será el control de residuos y, por lo tanto, será menor el impacto generado.

- Impacto de las emisiones en la planta (emisiones/tonelada de biomasa)

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- La afectación potencial de las emisiones puede ser bastante negativa. Se prevé que las plantas, sobretodo en las grandes, tengan unos sistemas de tratamientos y control de emisiones efectivos, aunque los costes de gestión sean elevados.
- En el escenario de calderas de menor potencia existe una contaminación difusa, mientras que en medias y grandes plantas la contaminación es puntual.
- Las emisiones dependen del tipo de combustible quemado.

- Impacto de las emisiones en el transporte de biomasa

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Siempre existe un impacto negativo por el transporte. El impacto crece con el tamaño de planta debido a la distancia de transporte y la cantidad de combustible requerida.

- La logística empleada en el suministro es diferente según el escenario.

► Impacto de las infraestructuras (accesos, usos del suelo, red térmica/eléctrica, etc.)

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Las plantas pequeñas se adecuan a la situación y no requieren de infraestructuras importantes. Las otras plantas tienen un impacto negativo, pero muy dependiente de la ubicación planteada de la instalación.
- Dependiendo de si la ubicación de la instalación se encuentra en lugares comunicados, el impacto es mayor o menor.

► Impacto sobre el calentamiento global o efecto invernadero debido a la sustitución de combustibles fósiles

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- El impacto positivo crece cuanto mayor es la planta.

VALORACIÓN ECONÓMICA Y TECNOLÓGICA

► Rendibilidad económica del escenario actual:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- La rentabilidad económica a corto plazo se cree mayor en las plantas pequeñas y medianas, debido en parte a los perímetros de protección o a las podas de los árboles de la vía pública.
- Actualmente sin la prima energética las plantas de media y elevada potencia son poco rentables (afirmación realizada antes de la aprobación del RD 661/2007).

- La integración del efecto del Protocolo de Kyoto podría hacer variar la rentabilidad de estos escenarios, sobretodo del escenario 3.

► Sinergias con otras actividades económicas:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Actualmente existe un rechazo por parte de ciertas partes del sector forestal cuando las sinergias potenciales podrían ser positivas. Las plantas pequeñas no tendrían tanto rechazo.
- Se considera que una planta grande puede tener una afectación más negativa sobre las actividades de la zona, debido a que se afecta la movilidad industrial.

► Requerimientos de la planta en cuanto a formato del combustible:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Supone una dificultad dependiendo del tamaño de planta.
- Se considera que las plantas grandes son más flexibles.
- Se debe obtener una garantía de: el tamaño del combustible, el contenido de humedad y el poder calorífico.
- La tecnología debe buscar la compatibilidad entre diferentes fuentes de biomasa leñosa.

► Efecto de los potenciales incendios forestales sobre la garantía del suministro de estas plantas.

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Se cree que las plantas pequeñas y medianas tendrían una menor adaptabilidad delante de un incendio de grandes dimensiones, ya que las fuentes de biomasa próximas quedarían agotadas.

VALORACIÓN SOCIAL Y POLÍTICA

► Beneficios para la economía local:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Todas las plantas tienen un impacto positivo para la economía.
- Los impactos indirectos en el desarrollo del territorio parecen más positivos y diversificados en una planta de medio tamaño (según los evaluados).
- Los beneficios directos son mayores en una planta grande.

► Creación de puestos de trabajo directos e indirectos:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Las plantas pequeñas casi no generarían puestos de trabajo. Se considera que la planta de tipo 2 generaría más puestos de trabajo directos e indirectos que la planta de tipo 3.
- Hay una incertidumbre sobre los posibles puestos de trabajo indirectos creados.
- Mientras que una planta grande permite la creación de puestos de trabajo a escala regional, una planta más pequeña genera puestos de trabajo en el territorio.
- Existe una dificultad para encontrar profesionales calificados para trabajar en el bosque.

► Posibilidad de sinergias con el planeamiento urbanístico:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Cuanta más pequeña es la planta, más fácil es integrarla y encontrar sinergias en el planeamiento.
- Es necesario que se integren estos proyectos dentro de un planeamiento de los municipios.
- Se requieren herramientas como ordenanzas municipales que impulsen estas posibles sinergias.

- La garantía de suministro de servicios como Calor (Plantas de tipo 1 y 2) hace que sea necesario disponer de gas natural en caso de emergencia.

► Impacto de la fragmentación de la propiedad forestal y de las empresas de suministro:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- Es más difícil asegurar el suministro en plantas grandes que en pequeñas.
- La fragmentación tiene consecuencias más negativas en las plantas grandes y medianas.
- Se plantea la posibilidad de realizar un modelo de relaciones de los propietarios con las plantas de generación eléctrica, donde los propietarios sean partícipes del proyecto.

► Importancia y necesidad de comunicar a la sociedad sobre el proceso de implantación y explotación de las plantas:

	<b>PLANTA TIPO 1:</b> Térmica, consumo energético bajo (0,1 - 0,5 MW)	<b>PLANTA TIPO 2:</b> Térmica, consumo energético medio (0,5 - 2 MW)	<b>PLANTA TIPO 3:</b> Planta de cogeneración (5 MW)
<b>Categoría de impacto</b>			

- La información es necesaria en todos los casos. Sin embargo, esta información se debe dar de distinto modo según el escenario.
- Cuanto más pequeña es la planta, más fácil es comunicar-lo a la población y más fácil es que esta sea partícipe del proyecto.
- En el caso de grandes plantas, es necesaria la comunicación, ya que los beneficios son menos tangibles para la población. Una planta grande suele estar asociada a actores exteriores del territorio, hecho que se valora negativamente por la población.
- Las barreras sociales hacia la instalación de una planta crecen a medida que aumenta la media y potencia de ésta.

## 4.4. Conclusiones

Las conclusiones que se derivan de las sesiones de trabajo para el análisis multicriterio del aprovechamiento de la biomasa forestal son las siguientes:

- Los principales obstáculos en la implementación de las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa forestal son la incierta y limitada rentabilidad económica y las problemáticas en la logística y garantía del suministro.
- La acumulación de biomasa en los bosques de Cataluña puede incrementar el riesgo y peligrosidad de incendios, que deben ser tenidos en cuenta en los estudios de valorización energética.
- Existen ineficacias en el mercado de la madera, un alto grado de fragmentación de la propiedad forestal (falta de asociaciones) y una Política Forestal poco efectiva.
- En Cataluña existe un Sector Forestal débil, que se atribuye en parte a la edad avanzada de los propietarios forestales.
- La administración está creando expectativas a los propietarios forestales respecto al posible aprovechamiento de la biomasa forestal para uso energético.
- Las áreas forestales de Cataluña son ambientalmente y socialmente diversas. Los agentes sociales y las características naturales del territorio son las que deben determinar qué modelo de gestión es el más apropiado.
- Se deben aprovechar los productos de menor valor en el mercado y encontrar sinergias comunes con la industria de la madera
- Los costes de extracción varían según la tipología de biomasa extraída y la maquinaria utilizada. La biomasa es rentable para aprovechamientos energéticos situados a menos de 50 kilómetros del lugar de extracción forestal.
- Es necesario aumentar el conocimiento sobre las técnicas y maquinarias necesarias para la extracción de la biomasa para su aprovechamiento energético.

- El aprovechamiento energético de la biomasa forestal debe responder a una estrategia global energética, ambiental y social.
- La rentabilidad económica de los proyectos de aprovechamiento de la biomasa forestal debe contemplar los costes ambientales de no hacer nada en el bosque.
- La problemática de las emisiones si no se realizan correctamente y otros potenciales impactos pueden generar rechazo social hacia un proyecto determinado.
- La producción de calor mediante plantas de combustión de biomasa forestal de baja potencia (< 2MW), por sus dimensiones inferiores, se ven más aceptables los potenciales impactos generados respecto a la gestión de sus residuos (cenizas), las emisiones en el transporte y la necesidad de nuevas infraestructuras.
- Las plantas de producción de energía con biomasa de mayor potencia requieren un mayor consenso social entre propietarios forestales, más garantías en el suministro a medio y corto plazo y establecen con más dificultad las sinergias con el planeamiento territorial.
- Las plantas de mayor potencia generan un mayor impacto positivo respecto a la mitigación del cambio climático, generan más beneficios sobre la economía local y regional, y son más flexibles en cuanto al tipo de combustible de biomasa.

## 4.5. Referencias

- [1] Rigola, M. et al (2005). La biomassa com a font de matèries primeres i d'energia: Estudi de viabilitat al Montseny i Montnegre-Corredor. Fundació Abertis, Barcelona.
- [2] Tàbara, D. (2003). Participación cualitativa y evaluación integrada del medio ambiente y de la Sostenibilidad. Aspectos metodológicos en cuatro casos de estudio. Documents d'Anàlisi Geogràfica, UAB. Núm. 42, pp. 183-213.



Capítulo 5.

**Cuantificación del potencial de biomasa  
disponible para la generación  
de energía en Cataluña**

---



## 5. CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA DISPONIBLE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN CATALUÑA

### 5.1. Introducción y objetivos

El análisis de la situación energética actual en Cataluña y de las previsiones sobre potencia eléctrica instalada y consumo de biomasa indicados en el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015* [1], permite detectar la necesidad de disponer de cantidades significativas de biomasa y de invertir en nuevas plantas de producción de energía con biomasa por tal de alcanzar los objetivos energéticos a corto y medio plazo, disminuir la dependencia energética a los recursos no-renovables y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> que originan el Cambio Climático.

La biomasa referida en el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015* [1] es de origen forestal y agrícola. Otros residuos de biomasa de distinto origen (industrial y municipal) también pueden ser valorizados energéticamente (p.ej.: fangos de depuradora procedentes de plantas depuradoras de aguas residuales).

Las plantas de producción de energía con biomasa, en operación y/o en proyecto, requieren una garantía eficaz de su suministro para poder asegurar su funcionamiento estable sin proceder a paros operacionales. La falta de un mercado de la biomasa y la incertidumbre acerca de la cantidad de biomasa residual disponible para usos energéticos en Cataluña, dificulta la creación de nuevas empresas dedicadas a la valorización de residuos que son actualmente gestionados mediante otras vías (fabricación de conglomerados, disposición en vertedero, compostaje, etc.).

El presente Capítulo muestra la evaluación cuantitativa de los recursos de biomasa y de residuos generados en Cataluña, disponibles para su uso como combustible en la producción de energía.

### 5.2. Metodología del estudio

Se han revisado numerosos datos oficiales aportados por la administración nacional y regional (*Ministerio de Medio Ambiente, Generalitat de Catalunya*), publicados en forma de anuarios

estadísticos elaborados por el *Instituto Nacional de Estadística*, la *Agència de Residus de Catalunya*, y el *Institut d'Estadística de Catalunya*. También se han consultado otras instituciones de Cataluña especialistas en biomasa forestal: *Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)* y el *Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC)*.

Los residuos de biomasa han sido agrupados en seis categorías según su origen (Ver Tabla V.1). Los cultivos energéticos y los fangos de depuradora se han asumido como categorías diferenciadas debido a su potencial de producción y dislocación respecto a su origen (barros de depuradora de origen municipal e industrial). La cuantificación de los Combustibles Derivados de Residuos (CDR) considerará solamente la fracción papel, aunque por definición también incluyen los plásticos en su composición.

Para cada tipo de residuo de biomasa se ha analizado su vía de gestión: Reciclaje/reutilización y disposición final. Para complementar el balance de biomasa se han incluido datos sobre importación y exportación de madera en rollo, madera serrada y muebles. Para los residuos cuantificados, se ha elaborado un esquema gráfico donde se resumen las principales rutas de reciclaje/reutilización y disposición final. Si no se menciona expresamente, los residuos de biomasa cuantificados son referidos al año 2004.

Finalmente se ha calculado la energía eléctrica generable a partir de la combustión de los residuos cuantificados y la cantidad de CO<sub>2</sub> evitable de ser emitida a la atmosfera si la biomasa sustituyera a los combustibles no-renovables en la generación eléctrica. Para el cálculo, se han considerado los factores de generación de CO<sub>2</sub> de una planta de ciclo combinado de gas natural (0,40 Mg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> [2]) y de una central térmica de carbón (0,92 Mg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> [2]).

**Tabla V.1. Categorías de biomasa definidas según su origen**

<b>Categoría (según su origen)</b>	<b>Subcategorías analizadas</b>
Forestal	Residuos generados en la gestión forestal Residuos de industrias forestales
Agrícola	Residuos agrícolas Residuos de la industria agroalimentaria
Cultivos energéticos	
Otras industrias	Residuos de instalaciones agropecuarias Residuos de la industria textil y de la piel Desechos de carne (harinas)
Municipales (Residuos Sólidos Urbanos, RSU)	Fracción orgánica de los RSU Residuos de poda y jardinería Residuos voluminosos Fracción papel de los CDR
Fangos de depuradora	

## 5.3. Cuantificación de la biomasa disponible para la generación de energía en Cataluña

### 5.3.1. Existencias de biomasa forestal

Según el *Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2007)* (IFN3), Cataluña ha aumentado su superficie forestal en un 17% respecto al anterior inventario realizado en el año 1990 (*Segundo Inventario Forestal Nacional, 1989-1990*) (IFN2). La actual superficie teórica de bosques en Cataluña es de 1.541.244 ha (Tabla V.2). Según los nuevos datos, la superficie de monte arbolado ha aumentado un 22% a partir de la disminución de la superficie de monte ralo y disperso (34%) y de monte desarbolado (34%) [3-5]. A diferencia del IFN2, el IFN3 ha mejorado la calidad de la cartografía empleada en la cuantificación de superficies, incluyendo montes arbolados no considerados en el anterior inventario. También se han incluido como árboles nuevas especies vegetales que anteriormente se clasificaban como arbustos o arbolillos.

Una de las causas por las que la superficie forestal y el número de pies haya aumentado se atribuye al desuso de terrenos agrícolas, siendo susceptibles a la nueva ocupación de matorros y árboles. La falta de operaciones de aclareos y limpieza forestales contribuye al aumento del número de pies menores en los montes arbolados.

**Tabla V.2. Existencias de bosques en Cataluña según el Inventario Forestal Nacional.**

Concepto	Unidades	IFN2	IFN3	Definición
Año realización Inventario	-	1989-90	2000-01	-
Monte arbolado no adhesionado	ha	1.265.201	1.541.244	Terreno con arbolado FCC $\geq$ 20%
Monte arbolado ralo y disperso	ha	128.872	84.968	Ralo: Arbolado con 10 $\leq$ FCC<20%. Incluye especies de matorral o pastizal. Disperso: Arbolado con 5 $\leq$ FCC<10%. Incluye especies de matorral o pastizal. Transición entre monte arbolado y desarbolado.
Total Monte arbolado	ha	1.394.073	1.626.212	Terreno poblado con especies forestales arbóreas como dominantes, y FCC $\geq$ 5%.
Monte desarbolado	ha	461.871	304.270	Terreno poblado con pastizal o matorral. Presencia de especies arbóreas con FCC <5%.
Total de uso forestal	ha	1.855.944	1.930.482	-
Volumen maderable	miles m <sup>3</sup> c.c.	80.040	118.157	-
Cantidad pies mayores	miles	798.900	1.035.410	-
Cantidad pies menores	miles	1.470.240	1.638.990	-

**Tabla V.3. Superficie forestal de Cataluña según el mapa de cubiertas del suelo empleado en la superposición**

Tipo de Mapa superpuesto	IFN2	IFN3	Fuente
Sin superposición	1.394.070	1.626.000	Ministerio Medio Ambiente [3]
Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (1993)	1.214.710	-	CREAF, Software Mirabosc
Mapa de Cultius i Aprofitaments (1979)	1.202.620	-	CREAF, Software Mirabosc
Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (1988-1998)	1.133.510	-	Pla de Biomassa [6]
Mapa Forestal d'Espanya (1997)	-	1.487.670	CREAF, Software Mirabosc
Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (2000-2001)	-	1.142.920	CREAF, Software Mirabosc

**Tabla V.4. Aumento teórico de la biomasa forestal debido al crecimiento arbóreo en los últimos 10 años**

Biomasa Forestal	Miles de Mg (b.s)	Crecimiento anual (Miles de Mg b.s./año)	Aproximación existencias actuales (Miles de Mg b.s.)
Arbórea	69.600	2.560	95.200
Árboles Muertos	940	35 <sup>(A)</sup>	1.290
Arbustos	5.960	- <sup>(B)</sup>	5.960
<b>TOTAL</b>	<b>76.500</b>	<b>-</b>	<b>102.400</b>

(A) Calculado a partir de la proporción de Árboles Muertos por Biomasa Arbórea existente. (B) No se disponen de datos sobre producción arbustiva.

Otra de las causas que justifica el aumento de las hectáreas forestales se debe al uso de diferentes criterios de contabilización de hectáreas de montes arbolados. La superposición de mapas actualizados de cubiertas de suelo en un mismo soporte electrónico pretende reducir los errores de cálculo establecidos en una primera aproximación de la superficie estimada.

Por otro lado, la superposición de diversos mapas (el *Mapa Forestal Español (1997)* o el *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (2000-2001)*) genera divergencias en la superficie forestal calculada. Ver Tabla V.3.

El documento más detallado en cuanto a existencias de biomasa forestal en Cataluña es el *Pla de Biomasa en l'àmbit forestal* [6], publicado en el año 2001. La contabilización de las existencias forestales se basa en la utilización de dos fuentes de datos: El IFN2 y el *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya, 1988-1998* (IEFC). Las hectáreas forestales del IFN2 fueron corregidas a la baja, resultando una superficie forestal de 1.133.510 ha. Según este documento, las existencias de biomasa en los bosques catalanes en los años 1996-1998 se cuantifican en 76.500.000 Toneladas en base seca (Mg b.s.).

Asumiendo un crecimiento vegetativo de la biomasa aérea arbórea de 2.560 Mg b.s./año [6] las existencias de biomasa pasados 10 años des de la realización del *IFN2 para Cataluña* aumentarían a 102.400.000 Mg b.s (Tabla V.4). En el cálculo no se considera la explotación forestal actual ni la incidencia de los incendios, que pueden modificar la contabilización.

### 5.3.2. Residuos de origen forestal

Los residuos de origen forestal son generados en operaciones de limpieza y aclareos forestales. Estos son: ramas, arbustos, pequeños árboles y árboles muertos. Para la valorización energética de estos residuos, se da a cabo una trituración in-situ para facilitar su transporte y su posterior manejo. El aprovechamiento energético de la biomasa forestal debería compensar la extracción de nutrientes mediante la dispersión de las cenizas de la combustión en el terreno [7-11].

La biomasa residual es abandonada en la mayoría de casos en el bosque para su putrefacción, favoreciendo el reciclaje de nutrientes en el suelo.

Como biomasa residual de origen forestal también se incluyen los residuos leñosos procedentes de la industria de la madera y del mueble. Estos residuos son: cortezas, aserrín, astillas, virutas o pedazos de madera, entre otros.

#### **5.3.2.1. Residuos susceptibles de aprovechamiento energético en la explotación forestal**

Según el *Pla de Biomassa* [6], sólo el 28% de la superficie forestal es apta para la explotación forestal (313.000 ha) debido a limitaciones silvícolas y topográficas <sup>(1)</sup>. Sobre esta superficie, una explotación forestal de tipo temporal generaría **246.000 Mg b.s.** de residuos forestales disponibles para uso energético. Consiguiendo un crecimiento sostenible de la masa boscosa, la cantidad de biomasa residual extraíble aumentaría hasta **274.000 Mg b.s.** [6].

Para la nueva superficie forestal de Cataluña publicada en el IFN3, el cálculo actualizado de los residuos de biomasa forestal generables en los bosques catalanes debe asumir:

- El aumento de las hectáreas susceptibles de explotación forestal. Debido a las mejoras en la tecnología y en las técnicas de aclareos, es posible la corrección de los criterios silvícolas y topográficas que limitan la superficie forestal explotable.

---

(1) Limitaciones silvícolas y topográficas: Las zonas forestales explotables deben tener una fcc  $\geq 70\%$  y pendientes del terreno inferiores al 60%. Dos terceras partes de la biomasa forestal mantienen un recubrimiento de copas arbóreas superior al 70%.

- Actualmente se llevan a cabo numerosas explotaciones forestales. Esto genera un control en el crecimiento de la actual masa boscosa.

Los datos sobre superficie mínima explotable y potencial de biomasa residual generable de los bosques catalanes señalados en el *Pla de Biomasa* [6] se consideran mínimos aceptables para una nueva evaluación sobre el estado actual de los bosques <sup>(2)</sup>.

### **5.3.2.2. Residuos forestales generados en la explotación actual de los bosques**

La cuantificación de residuos susceptibles de valorización energética en la explotación actual de los bosques de Cataluña diverge en función de la fuente de datos consultada. Para el cálculo se han considerado las siguientes referencias:

- Encuestas a los rematantes forestales
- Encuestas al sector industrial
- El *Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER 2005-2010)* [2].

Según las encuestas realizadas a los miembros que conforman el sector de rematantes forestales, el 78% de estos declaran que actualmente explotan un total de 542.000 Mg de madera en rollo al año (unidades en peso seco ambiente (p.s.a.)<sup>(3)</sup>), de los cuales el 81,7% (443.000 Mg) se consumen en las industrias catalanas y el resto, un 18,3% (99.500 Mg) se exporta.

Como media, cada rematante explota 7.100 Mg p.s.a./año de madera en rollo, de los cuales 5.800 Mg se comercializan en Cataluña. Si se asume este valor como valor medio para todos los rematantes, la cantidad de madera en rollo que se extrae de los bosques catalanes es de 689.000 Mg p.s.a./año, de los cuales 565.000 Mg se distribuirían en las industrias catalanas, y 124.000 Mg p.s.a./año se exportarían.

Si se asume un valor de generación de residuos del 20,8% en peso en la explotación del bosque [6], la cantidad de residuos forestales que generarían los rematantes catalanes es de **143.300 Mg p.s.a./año**.

---

(2) Comunicación personal de Jordi Vayreda, del CREAM.

(3) 1 Mg de peso seco estufa (p.s.e.) \* 1,3 = 1 Mg de peso seco ambiente (p.s.a.)

Las encuestas realizadas en las industrias de la primera transformación de la madera documentan una recepción de 607.000 Mg p.s.a./año de madera en rollo de origen catalán. La diferencia entre el valor calculado sobre la madera en rollo explotada por los rematantes no exportada y la recibida por el sector industrial, es de 164.500 Mg p.s.a./año [6].

Según el *PER 2005-2010*, Cataluña dispone de 92.340 tep de residuos forestales para la producción de energía, equivalente a **307.000 Mg/año** (1kg de madera equivale a 3000 kcal [2]).

Si se considera el conjunto de valores sobre biomasa residual generada en los bosques catalanes dados por las diferentes referencias bibliográficas, se puede concluir que los residuos procedentes de la explotación forestal actual a Cataluña se cuantifican entre **143.300 y 307.000 Mg p.s.a./año**.

### **5.3.2.3. Residuos generados en las industrias forestales**

Según las encuestas realizadas en las industrias de la primera transformación de la madera, la industria catalana recibe **607.000 Mg p.s.a.** de madera en rollo de los bosques catalanes. Por otro lado, según la *Base de dades de Comerç Exterior* [12], Cataluña importó **437.000 Mg** de madera en el año 2001, cantidad que incluye madera en bruto (troncos), madera serrada, láminas para chapado y contrachapado. Las importaciones procedían de Europa (81,9%, más de la mitad procedente de Francia), América (11,9%), África (5,7%) y Oceanía (<1%).

Según la *Declaración Anual de Residuos Industriales* de Cataluña (DARI) [13], los residuos de madera generados por las industrias de transformación de la madera en el año 2004 fueron de **236.000 Mg b.s.** El 67,3% de los residuos generados (159.000 Mg b.s.) fueron reciclados por la misma industria, un 6,7% (16.000 Mg b.s.) fueron quemados para generar calor y un 6,5% (15.000 Mg b.s.) fueron tratados biológicamente a través del compostaje o la digestión anaerobia. Solamente el 2,5% del total de residuos generados (6.000 Mg b.s.) fueron dispuestos al vertedero. El resto, un 17%, fueron gestionados mediante otras vías de valorización [13].

En base a estos datos, sólo los residuos destinados al vertedero podrían valorarse energéticamente mediante una generación eléctrica centralizada (6000 Mg b.s.).

### 5.3.3. Residuos de origen agrícola

Se incluyen como residuos de origen agrícola los generados en actividades de explotación agrícola y en la industria agroalimentaria.

#### 5.3.3.1. Residuos generados en la explotación agrícola

Estos residuos provienen de operaciones de poda, arrancado y cosecha del cultivo. Se distinguen dos tipologías: residuos herbáceos (paja del cereal, caña del maíz, etc.) y leñosos (ramas de olivos, cítricos, viñedos, etc.).

Según el último *Anuario de Estadística Agroalimentaria* [14] (año 2006), los cultivos herbáceos más extendidos en Cataluña son la cebada (189.360 ha), el trigo (79.160 ha), el maíz (38.870 ha) y el arroz (21.570 ha). Los residuos generados por estos tres cultivos representan el 96% del total generado anualmente en Cataluña (1.127.000 Mg en materia fresca de residuos). En términos energéticos, el total de biomasa herbácea cuantificado equivale a 359.500 tep (Tabla V.5). En la actualidad la mayoría de estos residuos se destinan a la alimentación ganadera.

No se disponen de datos sobre biomasa residual herbácea agrícola disponible para aprovechamiento energético.

Los cultivos leñosos que más se extienden en Cataluña son el olivar (120.800 ha), los viñedos (66.000 ha), los almendros (61.900 ha) y los frutales no cítricos como los melocotoneros (17.000 ha) y los manzanos (12.600 ha). El total de residuos leñosos generados en operaciones de poda y tala es de 549.000 Mg (50% humedad). En términos energéticos, el total de biomasa leñosa cuantificado equivale a 109.800 tep (Tabla V.6).

La mayoría de residuos leñosos se usan para fines energéticos en hogares domésticos. Los troncos y ramas de olivo y almendro son valorizados para su combustión, siendo en muchos casos su mercado ya establecido en zonas rurales.

La cuantificación de la biomasa agrícola leñosa teóricamente disponible para la generación eléctrica es difícil debido a los usos privados de la biomasa por los propios agricultores.

**Tabla V.5. Residuos agrícolas herbáceos generados en Cataluña en el 2005.**

Tipo de cultivo	Producción residuos (Mg materia fresca)	Humedad (%)	PCI (MJ/kg b.s)	Energía (tep)
Cebada	158.640 [14]	14	17,3 [15]	56.370
Trigo	90.740 [14]	14	17,3 [15]	32.240
Avena	15.320 [14]	12	15,6 [17]	5.020
Triticale	1.640 [14]	14	17,1 [16]	580
Centeno	800 [14]	14	17,4 [16]	290
Arroz	151.440 [14,15]	14	12,0 [16]	37.330
Maiz	684.580 [14,17]	22	17,2 [15]	219.360
Sorgo	12.790 [14,15]	13	17,5 [18]	4.650
Gira-sol	11.510 [14,17]	15	15,7 [15]	3.670
<b>TOTAL</b>	<b>1.127.460</b>		-	<b>359.510</b>

**Tabla V.6. Residuos agrícolas leñosos generados en Cataluña en el 2005.**

	Mg (50% humitat)	PCI (MJ/kg b.s)	Energía (tep)
<b>Cítricos</b>			
Mandarino	9410 [14,19]	11,9 [19]	1.930
Naranja	2790 [14,19]	11,9 [19]	570
Limón	40 [14,19]	11,9 [19]	10
<b>Frutales no cítricos</b>			
Melocotonero	54800 [14,19]	1,8 [19]	10.960
Pera	53000 [14,19]	11,8 [19]	10.600
Manzana	41320 [14,19]	11,8 [19]	8.260
Cerezo y guindo	7540 [14,19]	11,8 [19]	1.510
Ciruelos	2940 [14,19]	11,8 [19]	590
Albaricoquero	1050 [14,19]	11,8 [19]	210
Higuera	430 [14,19]	11,8 [19]	90
Níspero	30 [14,19]	11,8 [19]	10
<b>Otros</b>			
Viñedo	139100 [14,19]	11,7 [19]	27.820
Olivera	104380 [14,19]	12,1 [19]	21.210
Almendro	77790 [14,19]	11,6 [19]	15.180
Avellano	52740 [14,19]	11,6 [19]	10.390
Nogal	2110 [14,19]	11,6 [19]	420
<b>TOTAL</b>	<b>549.470</b>	-	<b>109.760</b>

Según el *PER 2005-2010* [2], Cataluña dispone de una generación anual de 1.978.000 Mg materia fresca (m.f.) de residuos agrícolas herbáceos y 420.000 Mg m.f. de residuos leñosos. Otros autores como *Crivillé y Cantero, 2001* [15], señalan que se producen más de 1.500.000 toneladas los residuos herbáceos y 600.000 toneladas de residuos leñosos. Cuanto más actualizada es la información, se detecta una disminución de residuos generados debido al abandono progresivo de las prácticas agrícolas en Cataluña.

### **5.3.3.2. Residuos agroindustriales**

Los residuos agroindustriales son generados en la industria del proceso de las materias primas obtenidas en la agricultura para usos alimenticios (por ej.: orujillo de aceituna, cáscaras de almendra, cáscaras de arroz, etc.). Se generan en mayor cantidad en la industria de producción de aceite, conserveras y producción de frutos secos. Estos residuos contienen un alto grado de humedad y son parcialmente utilizados para fines ganaderos.

Según la DARI [13] anualmente se producen 553.000 Mg (b.s.) de residuos agroindustriales disponibles para la generación eléctrica.

### **5.3.4. Cultivos Energéticos**

Cataluña, debido a sus características climáticas y disponibilidad de tierras de cultivo y de agua, tiene un elevado potencial de producción de cultivos energéticos. La producción actual de cultivos energéticos se destina a la producción de biocombustibles: la colza (2810 ha), el girasol (80 ha) y la cebada (6 ha). No se contabilizan cultivos energéticos para la producción de biomasa como combustible [20,21].

### **5.3.5. Otros residuos industriales**

Se han cuantificado otros residuos orgánicos útiles para la generación de energía: residuos de instalaciones agropecuarias, residuos de la industria textil y de la piel, y los desechos de carne.

#### **5.3.5.1. Residuos de instalaciones agropecuarias**

Los residuos agropecuarios se componen de heces y purines producidos en estaciones de cría y engorde de ganado para la producción de huevos, leche y carne para alimentación.

Cataluña es la segunda comunidad autónoma con más número de ganado porcino de España, con 6.314.100 de cabezas [14], y concentra una tercera parte del total nacional de aves con un valor de 51,1 millones de cabezas [22,23].

A partir de las existencias de ganadería en Cataluña [14,22] y de la producción de residuos por tipo de animal [22,24], se calcula una generación anual de 12,3 hm<sup>3</sup> purines y 6,9 millones de Mg de heces. Los residuos generados son tratados según el “Manual de gestión de los purines y de su reutilización agrícola”. Actualmente las heces y purines tienen dos destinos: como abono en cultivos y el tratamiento en plantas de recogida y proceso de los excedentes. Los posibles tratamientos de los purines son la depuración biológica (digestión anaeróbica para reducir la carga de carbono) con obtención de biogás, el tratamiento químico para neutralizar los posibles elementos contaminantes y el secado térmico, con un uso posterior del purín sólido como abono en zonas agrícolas [25].

Si se asume la producción de biogás (65% de CH<sub>4</sub>) como el tratamiento del total de purines y heces generados en Cataluña y la generación de 15 m<sup>3</sup> biogás/Mg purín y 50 m<sup>3</sup> biogás/Mg de heces [26], se podría generar un total de 529,5 hm<sup>3</sup> de biogás, equivalentes a 291 ktps (PCI biogás 65% = 23 MJ/m<sup>3</sup> [27]).

### **5.3.5.2. Residuos de la industria textil y de la piel**

Los residuos de la industria textil son compuestos por retales y otros materiales que no pueden ser reutilizados en la misma industria. Los residuos de piel son resultantes de tratamientos de transformación y confección de patrones de esta piel.

Según la DARI [13], los residuos textiles y de la piel generados por la industria catalana en el año 2004 fueron de 51.000 toneladas. El 17% de estos (9.000 Mg) se declararon como residuos compuestos por materiales impregnados, elastómeros y envases textiles. Un 76% de estos residuos (6.800 Mg) fueron dispuestos al vertedero. Del 83% de residuos restantes (42.000 Mg), el 82% son gestionados mediante rutas de reciclaje. Sólo el 18% de éstos, 8000 Mg, fue tratado mediante diversas técnicas previamente ante su disposición final en vertederos [13]. Ésta última fracción de residuos resultarían disponibles para la generación eléctrica.

### **5.3.5.3. Desechos de carne (harinas)**

Los desechos de carne se generan en la industria alimenticia una vez se inicia el proceso en los mataderos, a lo largo del proceso de la carne hasta su envasado y/o distribución. Estos residuos son sólidos, pastosos y líquidos como plumas, pelos, cortezas, sangre, vísceras, huesos, etc.

La gestión de los desechos de carne viene definida por el Real Decreto 2223/1993 [28]. El control y estabilización de los residuos se produce a partir de la producción de harinas, retornadas al mercado para la producción de pienso y cosméticos si éstas no presentan riesgos para la salud.

Según la DARI [13], la cantidad de desechos de carne generados en Cataluña y transformados en harinas, sin contabilizar los destinados a la producción de cosméticos y alimentación animal, es de 375.000 Mg (70% de humedad). La gestión final es: la exportación, la disposición en vertedero y la valorización energética aparentemente fuera de Cataluña.

Si se asume la valorización energética para el total harinas producidas (sin contar las que tienen un mercado establecido), 42,2 ktep de residuos serían disponibles para la producción de energía.

### **5.3.6. Residuos Sólidos Urbanos (RSU)**

Los tipos de biomasa considerados en esta categoría son: Fracción orgánica de los RSU, residuos de poda y jardinería y residuos voluminosos de madera.

#### **5.3.6.1. Fracción orgánica de los RSU**

Estos residuos son obtenidos a partir de la recogida selectiva de la materia orgánica en los municipios. Según el *Programa de Gestión de Residuos Municipales de Cataluña* (PROGREMIC) [29], en el año 2004 fueron recogidos selectivamente un total de 178.000 Mg de residuos orgánicos. La gestión total de estos residuos deriva a la producción de compost. No se contempla la generación de energía como posible alternativa de gestión para esta biomasa.

### **5.3.6.2. Residuos de poda y jardinería**

Los residuos de poda y jardinería generados en Cataluña se cuantifican en 72.800 Mg materia fresca (m.f.) [30]. Estos son gestionados por las siguientes vías: puntos verdes (23,9%), plantas de tratamiento de FORM (46,6%) y plantas de compostaje (29,4%) [30]. En todos los casos, el destino último de estos residuos es la producción de compost.

### **5.3.6.3. Residuos voluminosos de madera**

Según datos oficiales de la Generalitat de Cataluña, los residuos de madera recogidos en los Puntos Verdes (“Deixalleries”) de Cataluña fueron de 40.000 Mg en el año 2005 [30]. Estos provienen de la recogida selectiva de residuos municipales y de la entrega de particulares y pequeños comercios. Muy distinta es la cuantificación de los residuos voluminosos de madera según el Instituto Nacional de Estadística (INE), que los cuantifica en 141.000 Mg (99,6% no peligrosos) [31]. La mayoría de estos residuos son triturados para la obtención de conglomerados [30].

### **5.3.6.4. Fracción papel del Combustible Derivado de Residuo (CDR)**

Se denomina CDR a la fracción energéticamente más elevada de los residuos sólidos urbanos no separados selectivamente por la población y separados posteriormente en plantas de triado y clasificación de residuos. La composición típica de los residuos recogidos no-selectivamente en Cataluña se muestra en la Tabla V.7.

Según el PROGEMIC [29], el total de residuos municipales generados en Cataluña en el 2004 fueron de 4,13 millones de Mg. La fracción más importante, 2,53 millones de Mg de residuos (61,3%) fueron dispuestos al vertedero. La segunda fracción más importante, 819.000 Mg de residuos (19,8%) fueron recogidos selectivamente y posteriormente procesados mediante rutas de reciclaje y compostaje. Otra tercera fracción de residuos, 713.000 Mg (17,3%) fueron incinerados, y el resto, 67.000 Mg (1,6%) fueron tratados y valorizados en Plantas de Separación de Residuos (PSR) [29]. Ver Figura V.1.

Asumiendo que todos los RSU generados en Cataluña pasasen por PSR, exceptuando a los que ya tiene rutas de reciclaje y a los que ya son incinerados, y una eficiencia de recuperación del

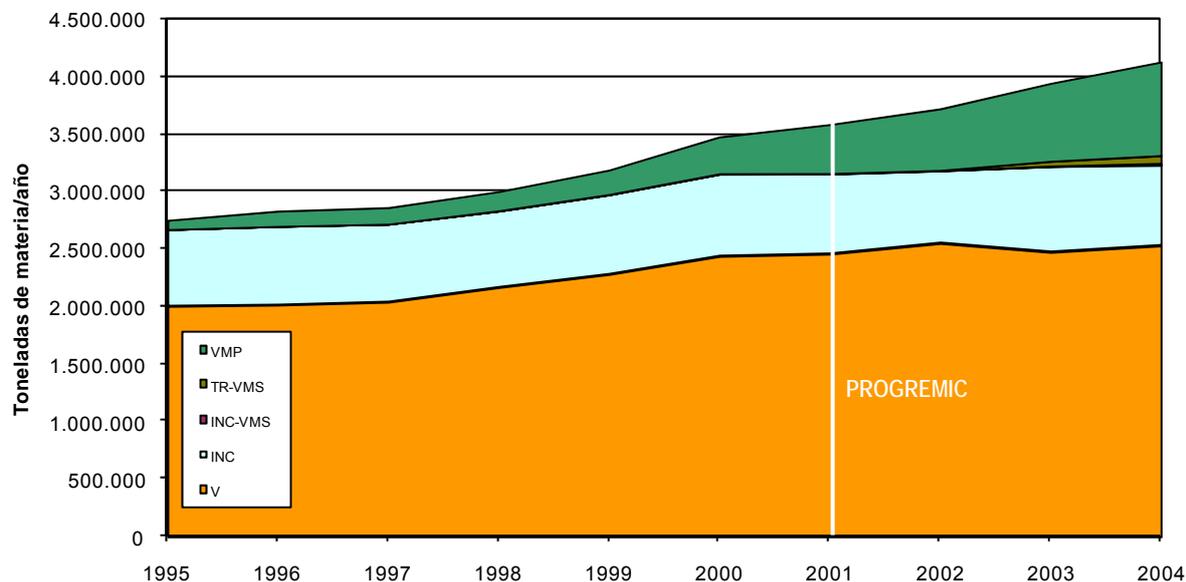
papel del 72,3% a partir de los RSU [32], un total de 350.000 Mg de papel podrían ser valorizados energéticamente. El contenido energético de esta fracción de residuos de biomasa equivale a 140 kteps.

Por otro lado, se puede considerar una primera valorización del 50% de estos residuos, contabilizando los que se generan en la Región Metropolitana de Barcelona que contiene el 68,9% de la población catalana. Según este criterio, 175.000 Mg de papel (70 kteps) serían primeramente valorizados energéticamente, aumentando su cifra al considerar el resto de Cataluña.

**Tabla V.7. Composición media de los Residuos Sólidos Urbanos**

Composición	Porcentaje (%)
Fracción Orgánica	37,5
Papel	18,8
Plástico	9,1
Vidrio	7,2
Voluminoso	6,5
Metales	3,3
Bricks	1,0
Otros	16,6
TOTAL	100,0

Fuente: Adaptado de [29]



**Figura V.1. Destinos finales de los residuos generados en Cataluña (1995-2004)**

VMP: Valorización Material Primaria, debida a la recogida selectiva.  
 TR-VMS: Valorización Material Secundaria debida al tratamiento de la fracción Resto.  
 INC-VMS: Valorización Material Secundaria posterior a la incineración. Sumada a INC (Incineración) suma el total de residuos incinerados en Cataluña.  
 V: Residuos en Vertedero, directamente o como fracción última de otras plantas.  
 Fuente: Adaptado de [29].

La separación material de los CDR y su recuperación energética a partir de los RSU es promovida y actualmente discutida en Europa para su implantación mediante la Propuesta de Directiva SEC (2005) 1681 COM 667 final.

### 5.3.7. Fangos de Depuradora

Los fangos de depuradora son residuos semisólidos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), a partir del tratamiento biológico de aguas de origen urbano y/o industrial. Los fangos de depuradora cuantificados en el año 2004 fueron de 142.000 Mg b.s. [33]. Los tratamientos y destinaciones finales de estos se resumen en la Tabla V.8.

La diferencia entre los valores de fangos generados y usos finales se debe a la reducción de la materia resultante de los tratamientos de compostaje y digestión. El 4,3% de los fangos generados (5.900 Mg b.s.) se destinan a la valorización energética (en incineradoras, cementeras, etc.).

Solamente los fangos destinados a vertedero son susceptibles de ser valorizados energéticamente. Asumiendo un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 21,0 MJ/kg [34], un total de 20,7 ktep de fangos pueden ser transformados a energía.

**Tabla V.8. Tratamientos y destinos de los fangos de depuradora generados en Cataluña en el año 2004.**

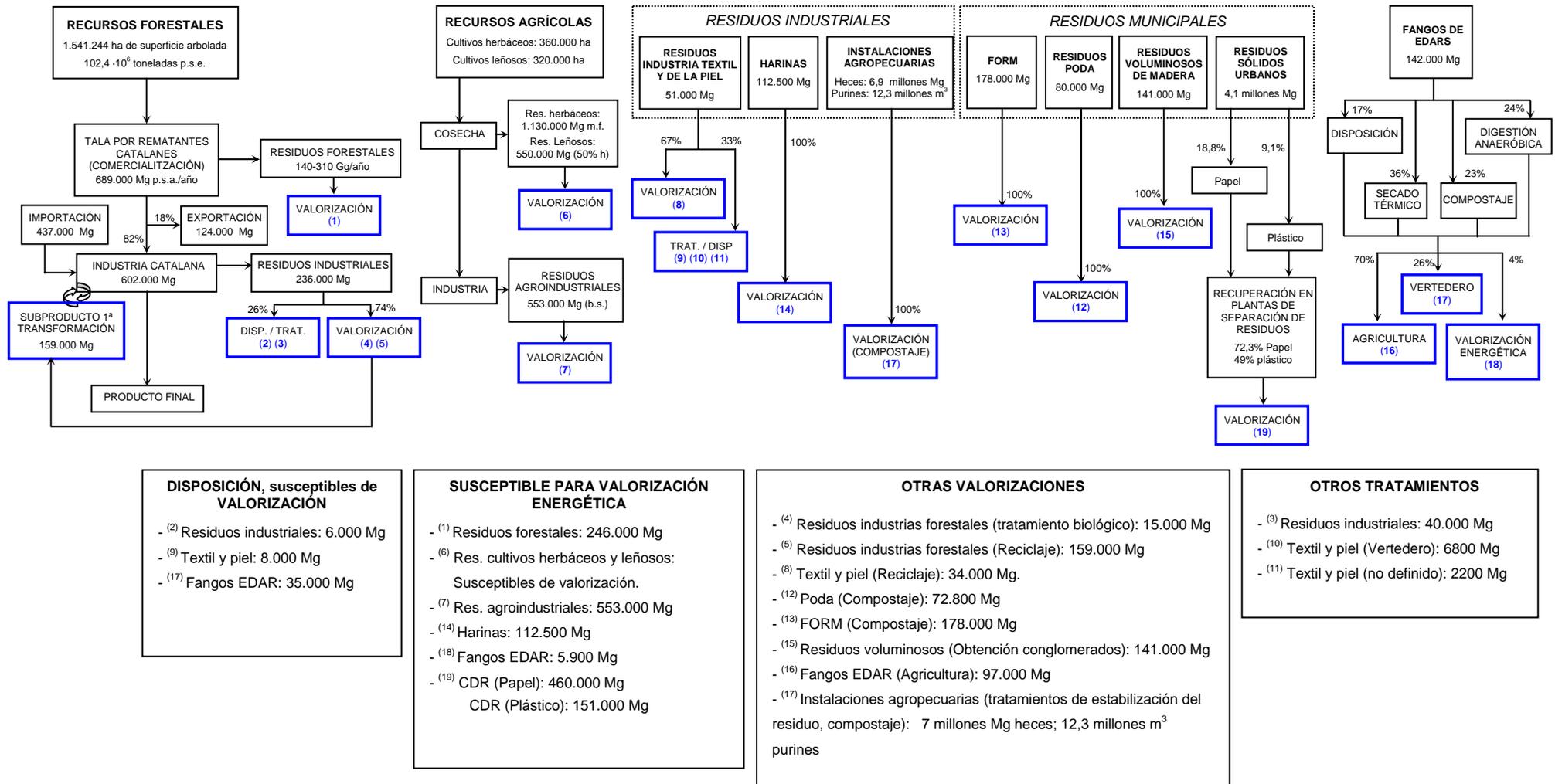
Tratamientos, Destinos intermedios	Mg b.s.	Destinos finales	Mg b.s.
Secado térmico	51.300	Agricultura y jardinería	96.760
Digestión aeróbica/anaeróbica	34.480	Vertedero	35.390
Compostaje	32.670	Valorización energética	5.900
No tratado (a vertedero)	23.770		
<b>TOTAL</b>	<b>142.220</b>	<b>TOTAL</b>	<b>138.050</b>

Fuente: Adaptado de [33]

## 5.4. Esquema sobre las rutas de reciclaje/reutilización y disposición de los residuos de biomasa.

La Figura V.2 muestra un esquema gráfico que resume las actuales vías de valorización y tratamiento de los residuos de biomasa que han sido cuantificados anteriormente.

## Cuantificación del potencial de biomasa disponible para la generación de energía en Cataluña



**DISPOSICIÓN, susceptibles de VALORIZACIÓN**

- (2) Residuos industriales: 6.000 Mg
- (9) Textil y piel: 8.000 Mg
- (17) Fangos EDAR: 35.000 Mg

**SUSCEPTIBLE PARA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA**

- (1) Residuos forestales: 246.000 Mg
- (6) Res. cultivos herbáceos y leñosos: Susceptibles de valorización.
- (7) Res. agroindustriales: 553.000 Mg
- (14) Harinas: 112.500 Mg
- (18) Fangos EDAR: 5.900 Mg
- (19) CDR (Papel): 460.000 Mg  
CDR (Plástico): 151.000 Mg

**OTRAS VALORIZACIONES**

- (4) Residuos industrias forestales (tratamiento biológico): 15.000 Mg
- (5) Residuos industrias forestales (Reciclaje): 159.000 Mg
- (8) Textil y piel (Reciclaje): 34.000 Mg.
- (12) Poda (Compostaje): 72.800 Mg
- (13) FORM (Compostaje): 178.000 Mg
- (15) Residuos voluminosos (Obtención conglomerados): 141.000 Mg
- (16) Fangos EDAR (Agricultura): 97.000 Mg
- (17) Instalaciones agropecuarias (tratamientos de estabilización del residuo, compostaje): 7 millones Mg heces; 12,3 millones m<sup>3</sup> purines

**OTROS TRATAMIENTOS**

- (3) Residuos industriales: 40.000 Mg
- (10) Textil y piel (Vertedero): 6800 Mg
- (11) Textil y piel (no definido): 2200 Mg

**Figura V.2. Principales rutas de reciclaje, disposición y valorización de los residuos de biomasa generados en Cataluña**

Nota: Unidades expresadas en p.s.a. excepto los barros de depuradora, expresados en materia seca.

## 5.5. Producción de energía a partir de los residuos de biomasa

Sobre la base descrita, los residuos de biomasa disponibles anualmente para la generación de energía en Cataluña se estiman en 1,3 millones de Mg b.s. (Tabla V.9). El contenido energético equivalente es de 444 ktep/año.

La mayor parte de estos residuos corresponden a los residuos agroindustriales. Estos representan el 42% del total de biomasa cuantificado y el 37% del potencial energético valorizable. Otros residuos industriales como los desechos de carne en forma de harinas y los residuos de la industria textil y de la piel, también pueden ser valorizados energéticamente (120.000 Mg, equivalentes a 46 ktps).

**Tabla V.9. Residuos de biomasa disponibles en Cataluña para su valorización energética mediante combustión directa**

Tipo de biomasa	Biomasa total (miles de Mg b.s./año)	Biomasa susceptible de valorización energética (miles de Mg b.s./año)	PCI (MJ/kg)	Potencial energético (ktep/año)
<b>Origen Forestal</b>				
Biomasa forestal (102,4 millones Mg)	879*	246	12,5	73,8
Res. de industrias forestales	236	6	14,6	2,1
TOTAL Origen Forestal	1.115	252	-	<b>75,9</b>
<b>Origen Agrícola</b>				
Res. de cultivos no-energéticos	1.190	-	-	-
Res. agroindustriales	553	553	12,5	165,1
TOTAL Origen agrícola	1.743	553	-	<b>165,1</b>
<b>Cultivos energéticos</b>				
Cultivos Energéticos	-	-	-	-
<b>Otros industriales</b>				
Res. instalaciones agropecuarias	Heces: 6,9 millones Mg Purines: 12,3 millones m <sup>3</sup>	-	-	-
Res. industria textil y de la piel	42	8	17,6	3,4
Desechos de carne	-	112	15,7	42,2
TOTAL Otros industriales	-	120	-	<b>45,6</b>
<b>Residuos Sólidos Urbanos (RSU)</b>				
Fracción orgánica RSU	178	-	-	-
Res. poda y jardinería	73	-	-	-
Res. voluminosos madera	40 - 141	-	-	-
Fracción papel de los CDR*	350**	350**	16,4	137,1
TOTAL RSU	641-742	350	-	<b>137,1</b>
<b>Fangos de EDAR</b>				
Fangos de depuradora	142	41	21,0	<b>20,6</b>
<b>TOTAL</b>		<b>1.316</b>	-	<b>444,3</b>

Notas:

\* Extrapolación sobre los datos de residuos generables en el escenario temporal.

\*\*Cálculo realizado contabilizando el total de residuos generados en Cataluña. Si se asume que el plástico, como fracción de CDR, puede ser también valorizado energéticamente (PCI = 32,5 MJ/kg) y una tasa de recuperación de éste del 49%, se dispondría de un total de 116.000 Mg de materia adicional al papel para valorización energética, equivalente a 90 ktps. Como ha sido señalado para el caso del papel, una primera valorización energética del plástico contabilizaría el 50% del total señalado, correspondientes a los generados en la Región Metropolitana de Barcelona (58.000 Mg, 45 ktps)

La siguiente fracción de residuos de biomasa más importante es la fracción papel de los CDR. Esta biomasa representa el 27% del total de materia cuantificada como valorizable. Aunque el plástico no se considera como biomasa, su contenido energético es elevado. El aprovechamiento conjunto de la fracción plástico y papel procedentes de la separación en PSR, de todos los RSU generados en Cataluña supondría la valorización anual de 227 ktps (Tabla V.9).

Finalmente, los residuos forestales son la tercera fracción de residuos de biomasa más importante para su valorización energética. Aunque las existencias actuales de biomasa forestal se aproximan en 100 millones de toneladas, debido a limitaciones silvícolas y topográficas, sólo una parte de bosques pueden ser explotados bajo criterios de sostenibilidad. La cantidad mínima de residuos forestales que podrían ser valorizados energéticamente es de 246.000 Mg b.s./año, equivalentes a 74 ktps.

La metanización del total de heces y purines cuantificados para Cataluña supondría la producción aproximada de 529,5 hm<sup>3</sup> de biogás (65% de CH<sub>4</sub>). Si se asume un PCI del biogás de 23MJ/m<sup>3</sup>, un total de 291 ktps de este combustible sería disponible para la producción de energía.

El *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015* [1] señala que para alcanzar los objetivos energéticos relacionados con la biomasa en el año 2015, se requieren: 306,6 ktps de biomasa forestal y agrícola; 198,8 ktps de residuos renovables; 205,6 ktps de biogás y 844,1 ktps de biocarburantes (Ver Tabla II.2).

Según los resultados obtenidos en la cuantificación realizada en el presente capítulo (resumidos en la Tabla V.9), Cataluña dispone de la biomasa suficiente para alcanzar los objetivos energéticos relativos a la biomasa forestal y agrícola, residuos renovables y biogás, especificados en el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015* [1].

Si se asume una eficiencia de generación eléctrica mediante del 30% de la combustión de todos los residuos de biomasa cuantificados (1,3 millones de Mg), se podrían generar 1550 GWh de electricidad.

La sustitución de la energía procedente de la combustión del gas natural con la producida por la combustión directa los residuos de biomasa, permitiría evitar la emisión de 620.000 Mg de CO<sub>2</sub> que contribuyen al Cambio Climático (asumiendo un factor de generación de CO<sub>2</sub> de una planta de ciclo combinado de gas natural de 0,4 Mg CO<sub>2</sub>· MWh<sup>-1</sup> [2]). El ahorro sería mayor si la biomasa sustituyera

al carbón en centrales térmicas convencionales (hasta 1,4 millones de Mg de CO<sub>2</sub>, asumiendo una tasa de generación de CO<sub>2</sub> de 0,92 Mg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> [2]).

## 5.6. Conclusiones

Las principales conclusiones que se extraen del Capítulo 5 son las siguientes:

- Cataluña dispone de 1,3 millones de Mg de residuos de biomasa de relativamente fácil valorización energética. La energía equivalente de estos residuos es de 444 ktps.
- Las fracciones de residuos de biomasa más importantes sobre los cuantificados son: los residuos agroindustriales (42% en peso), la fracción papel de los CDR (27% en peso) y los residuos forestales (19% en peso).
- La combustión de los residuos de biomasa cuantificados para la producción de energía permitiría la generación de 1.550 GWh de electricidad (considerando una eficiencia de generación eléctrica del 30%).
- La producción de energía a partir de los residuos de biomasa cuantificados significaría alcanzar los objetivos energéticos especificados para el año 2015 según el *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015*.
- El aprovechamiento energético de los residuos de biomasa en sustitución al gas natural y el carbón supondría la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> que contribuyen al Cambio Climático: 620.000 Mg de CO<sub>2</sub> si el combustible sustituido es el gas natural en plantas de ciclo combinado, y 1,4 millones de Mg de CO<sub>2</sub> si el combustible sustituido es el carbón en centrales térmicas.
- La actual política de disposición de residuos municipales e industriales al vertedero no permite la valorización energética de importantes cantidades de biomasa que suponen un elevado potencial energético.
- La aprobación de una nueva Directiva europea (SEC (2005) 1681) que obligue una mínima valorización energética de los CDR en los municipios supondría el aprovechamiento energético potencial de 350.000 Mg de papel y de 116.000 Mg de plástico a partir de todos los RSU generados en Cataluña.

- Debido a la importante generación y características de los residuos agroindustriales, estos pueden valorizados energéticamente en plantas de producción de energía de media y elevada potencia. No obstante, estos residuos se encuentran dispersos para su gestión final centralizada. Para su valorización energética es necesario establecer un mercado de residuos y la logística necesaria para un suministro en plantas de valorización de biomasa.
- Dentro de un sistema integral de aprovechamiento de la biomasa, Cataluña, por sus elevados recursos forestales, debe considerar la biomasa forestal como parte importante de los recursos que contribuyen a los fines energéticos.
- Cataluña dispone en la actualidad de cultivos energéticos orientados a la producción de biocombustibles: 2810 ha de colza, 80 ha de girasol y 6 ha de cebada. La implantación de cultivos destinados a la producción de biomasa (como el chopo, el sauce, la colza etíope, el cardo, la caña común, y otros) permitiría una mayor contribución de este recurso en la generación de energía renovable.

## 5.7. Referencias

- [1] Generalitat de Catalunya (2005). Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015. Generalitat de Catalunya. Barcelona
- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) (2005). Plan de Energías Renovables 2005-2010 [En línea] Disponible en: <http://www.mityc.es> (Consulta: Octubre 2008).
- [3] Ministerio de Medio Ambiente (2008). IFN3, Selección de los datos más importantes por provincias (superficies y existencias). [En línea]. Disponible en: <http://www.mma.es> (Consulta: Mayo 2008).
- [4] Ministerio de Medio Ambiente (2005). Anuario de Estadística Forestal 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.mma.es/> (Consulta: Mayo 2008).
- [5] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Segundo Inventario Forestal Nacional (1986-1996). [En línea]. Disponible en: <http://www.mapa.es/> (Consulta: Abril 2008).
- [6] Joanati, C.; Rodríguez, J.; Vayreda, J. (2001). Pla de Biomassa, Àmbit Forestal. CREAM, CTFC.
- [7] Lundborg, A. (1998). A sustainable forest fuel system in Sweden. Biomass and Bioenergy, Vol. 15 (4-5), pp. 399-406.
- [8] Uckert G. et al. (2001). Utilisation of boiler ash from biomass heating plants as fertiliser substitute. Plant nutrition-Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers. pp. 992-993.
- [9] Bae Park, B. et al (2005). Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation. Biomass and Bioenergy. Vol. 28 (4), pp. 335-365.
- [10] Etiegni, L. y Campbell, A.G. (1991). Physical and chemical characteristics of wood ash. Bioresource Technologies. Vol. 37, pp. 173-178.
- [11] Demeyer A., et al. (2001) Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. Bioresource Technology. Vol. 77, pp. 287-295.
- [12] Grup d'Estudi i Protecció dels Ecosistemes del Camp (GEPEC); Greenpeace (2003). El impacto del consumo catalán de madera sobre los bosques del planeta. [En línea] Disponible en: <http://www.terra.org> (Consulta: Diciembre 2008)
- [13] Agència de Residus de Catalunya (2005). DARI. Declaració Anual de Residus Industrials. Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. [En línea]. Disponible en: <http://www.arc-cat.net>
- [14] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2007). Anuario de Estadística Agroalimentaria 2006. Madrid.
- [15] Crivillé, R; Cantero, C. (2001). Estudi i Pla d'actuació en els camps de l'aprofitament energètic de la biomassa en el sector Agrícola i Ramader a Catalunya: Cultius Herbacis Energètics i Residus de Cultius Herbacis. Conveni de col·laboració entre la Universitat de Lleida i l'Institut Català de l'Energia. Barcelona.
- [16] FAO (2004). UBET- Unified Bioenergy Terminology. [En Línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/> (Consulta: Abril 2008).
- [17] Domínguez, J. et al (2008). Biomasa Potencial para la producción de Energía en Navarra. [En Línea]. Disponible en: <http://age.ieg.csic.es/> (Consulta: Abril 2008).

- [18] Ballesteros, M. Nuevas fuentes de suministro y su transformación a biomasa doméstica. Genera 2008. Madrid, Febrero 2005.
- [19] Generalitat de Catalunya. Departament d'Indústria, Comerç i Turisme (2001) Aprofitament i Pla d'Actuació en residus de cultius llenyosos. Informe Final. Lleida..
- [20] Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció rural. Estadístiques Agrícoles, Agrocarburants. [En línia]. Disponible en: <http://www.gencat.cat> (Consulta: Abril 2008).
- [21] Fondo Español de Garantía Agraria (2008). Ayuda a los Cultivos Energéticos. Campaña 2007/2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.fega.es> (Consulta: Abril 2008).
- [22] Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT) (2008). Cens Ramader 1999. [En línia] Disponible en: <http://www.idescat.cat> (Consulta: Junio 2008).
- [23] Instituto Nacional de Estadística (INE) (2008). Censo Agrario 1999. [En línea]. Disponible en: <http://www.madrid.org/iestadis/fijas/efemerides/cm290102.htm> (Consulta: Mayo 2008).
- [24] Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Generalitat de Catalunya (2008). Pla individual de gestió de dejeccions ramaderes. Annex: Coeficients estàndard. [En línia]. Disponible en: <http://www.gencat.cat>. (Consulta: Mayo 2008).
- [25] Grup d'Experts en Canvi Climàtic a Catalunya (GECCC) (2005). Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. [En línia] Disponible en: <http://www.iecat.net/canviclimatic/> (Consulta: Mayo 2008).
- [26] Flotats, X. (2008) Producción de biogás y gestión de purines. Jornadas: Biocombustibles. Crisis energética. Oportunidades de negocio. 26-27 noviembre. Guadajira (Badajoz).
- [27] Márquez, F. (2008). Biogás, su aprovechamiento y generación de electricidad. Ciclo de Conferencias sobre aplicaciones productivas de la energía renovable en agronegocios. 26 Junio 2008. México.
- [28] Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 2224/1993, de 17 de diciembre, sobre Normas sanitarias de eliminación y Transformación de animales muertos y desperdicios de origen animal y protección frente a agentes patógenos en piensos de origen animal. BOE núm. 0016 (1994).
- [29] Agència de Residus de Catalunya (2006). Revisió del Programa de Gestió de Residus Municipals a Catalunya 2001-2006 (PROGEMIC). [En línia]. Disponible en: <http://www.arc-cat.net/> (Consulta: Mayo 2008).
- [30] Informació cedida por la Agència de Residus de Catalunya (2006).
- [31] Inebase. Encuestas sobre el reciclado y tratamiento de residuos 2005; Cantidad de residuos recogidos o recibidos en la instalación por comunidad autónoma, tipo de residuo y clase de peligrosidad. Intituto nacional de Estadística (INE) [En línea]. Disponible en: <http://www.ine.es> (Consulta: Junio 2008).
- [32] Bilitewski, B.; Härdtle, G. y Marek, K. (1997). Waste Management. Springer-Verlag. New York.
- [33] Comunicació de Xavier Oliu. Agencia Catalana de l'Aigua (ACA). Generalitat de Catalunya. Abril 2006.
- [34] Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. McGraw-Hill Book Company. New York.

Capítulo 6.

**Tecnologías para el cultivo y la cosecha  
de los cultivos energéticos  
de colza etíope y chopo**

---



## 6. TECNOLOGÍAS PARA EL CULTIVO Y LA COSECHA DE LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS DE COLZA ETÍOPE Y CHOPO

### 6.1. Introducción y objetivos

Los cultivos energéticos representan una de las tipologías de biomasa más importantes para conseguir los objetivos energéticos marcados en el *Plan de Energías Renovables 2005-2010* [1].

El proyecto “Agrosost” [2], fue realizado en los años 2004-2007 juntamente por miembros de la UdG, la UAB, la URV y el CIEMAT. El proyecto tuvo como objetivo principal el estudio de los cultivos energéticos de colza etíope (*Brassica carinata*) y de chopo (*Populus X euroamericana*) para su uso como combustible en la producción de energía desde el punto de vista ambiental, social y económico. La colza e. y el chopo fueron seleccionados en el proyecto Agrosost [2] debido a los resultados obtenidos en anteriores experiencias europeas sobre cultivos energéticos y para aprovechar los resultados de los campos de cultivo soportados por el CIEMAT en Soria.

El presente Capítulo 6 tiene por objetivo el análisis de la situación de los cultivos energéticos en España y Cataluña, y en particular, de los cultivos energéticos de colza etíope y chopo. Respecto a los cultivos energéticos mencionados, se describirán las operaciones que son necesarias para el crecimiento y disponibilidad de ambos cultivos energéticos como biomasa para su valorización energética, según los datos obtenidos en el proyecto Agrosost [2], así como los costes asociados en la etapa agrícola y cosecha. Finalmente se describirá el estado de investigación de la tecnología de cosechado para los cultivos energéticos herbáceos y leñosos.

### 6.2. Situación de los cultivos energéticos

España dispone de 182.070 ha dedicadas a cultivos energéticos. La mayoría son implantados para la producción de biodiesel. Los cultivos de mayor ocupación son: el girasol (74,0%), la cebada (17,5%) y la colza (7,5%) (campana de cosecha 2007/2008). Cataluña representa la cuarta comunidad con más cultivos energéticos implantados (2.900 ha), en su mayoría de colza (97,0%) [3,4].

Proyectos de Investigación de ámbito nacional como “Agrosost” (2004-2007) [2] y “PSE cultivos energéticos” (2005-2012) [5] se basan en el ensayo de plantaciones experimentales y demostración a escala comercial de cultivos energéticos herbáceos y leñosos para el estudio de su viabilidad ambiental y económica en la producción de energía. Los cultivos energéticos que son objeto de estudio en los mencionados proyectos son: el sorgo, la colza (*Brassica napus*, *Brassica carinata*), el chopo, el maíz, el trigo, la cebada, la pawlonia y el cardo. La demostración de la viabilidad en la implantación comercial de estos cultivos a escala nacional pretende impulsar la producción de energía a partir de la biomasa a nivel nacional, permitiendo alcanzar los objetivos energéticos planteados en el vigente Plan de Energías Renovables 2005-2010 [1] y en futuros planes estratégicos de la energía.

La situación de los cultivos energéticos en algunos países de Europa es diferente. En la EU-25 la implantación de estos para la producción de biocarburantes y de energía aumenta significativamente cada año. En el año 2004 fueron cultivadas 1,6 millones de ha. En el año 2005, la superficie de cultivo ascendió hasta 2,5 millones de ha. El 78% de las hectáreas totales cultivadas se sitúan en Alemania y Francia, porcentaje que ascendería hasta el 92% si se incluye al Reino Unido. La *Agencia Internacional de la Energía*, mediante la Tarea 30 sobre cultivos energéticos leñosos de corta rotación, también destaca las actividades entorno al desarrollo de proyectos para la implantación de cultivos energéticos en Suecia (15000 ha [6]), Reino Unido (1800 ha cultivadas [7]), Dinamarca y Croacia. Países mediterráneos como Italia actualmente producen energía eléctrica y térmica a partir del chopo, robinia, eucaliptos y “pawlonia” (5000 ha totales en el año 2006-2007) [8]. Estas especies, de adaptación en clima mediterráneo, pueden ser implantadas a escala comercial en España.

Las hectáreas dedicadas a la implantación de cultivos energéticos en la UE-25 representan el 1,5% del terreno arable [9,10].

### 6.1.1. Experiencias recientes en el cultivo de la colza etíope

La colza etíope es una especie híbrida herbácea y oleaginosa de ciclo de cultivo anual (Figura VI.1). Procede del cruce de las especies *B. nigra* y *B. oleracea* [11]. Las primeras experiencias de implantación de este cultivo se realizaron en Europa mediante el proyecto FAIR-CT96-1946 [12] en el

año 1997. Las conclusiones obtenidas en este proyecto fueron las siguientes:

- España puede mantener mayores rendimientos agrícolas en relación a otros países mediterráneos como Italia y Grecia, debido a su clima semi-árido y a las características del suelo.
- La productividad agrícola es mayor cuando la siembra se inicia en el otoño (100 a 200 semillas/m<sup>2</sup>).
- En la rotación del cultivo, se obtiene una mayor productividad agrícola cuando el cultivo precedente es el cereal, en vez de la legumbre.
- No se observa respuesta en la productividad cuando la fertilización con nitrógeno varía entre 0 y 150 U.F/ha.
- Se detecta un elevado contenido en azufre en la biomasa de colza e. (0,5% en b.s.) en relación a otros cultivos energéticos. La combustión de la colza e. para la producción de energía puede generar elevadas emisiones de SO<sub>2</sub>.

Debido a las producciones de biomasa de colza e. obtenidas durante el proyecto europeo FAIR (16 Mg/ha en áreas húmedas y 10 Mg/ha en área secas), esta especie empezó a tener interés como cultivo energético en España [12].

Posteriormente se inició en España el proyecto “Agrosost” (2004-2007) [2]. Uno de los objetivos del proyecto fue el Análisis del Ciclo de Vida y de la viabilidad económica del cultivo de la colza e. para la producción de energía. Los resultados sobre productividad agrícola obtenidas en parcelas experimentales situadas en Soria fueron muy inferiores a los esperados, resultando un valor medio de



**Figura VI.1. Brassica carinata en floración**

Fuente: <http://www.soriactiva.com>

4,72 Mg b.s. (base seca) por hectárea.

En la actualidad la Colza e. es aún objeto de estudio en España a través del proyecto “PSE cultivos” (2005-2012) [5].

### 6.1.2. Experiencias recientes en el cultivo del chopo

El cultivo del chopo (de corta rotación) se encuentra en fase de demostración en Europa (IEA Bioenergy Task 30 [10]). Países como Reino Unido, Italia y España están desarrollando proyectos para la implantación del cultivo de chopo (*Populus X euroamericana*) así como de otras especies leñosas para la producción de energía (el sauce, el eucalipto y la robinia) [8,13]. En España, el proyecto “PSE cultivos” (2005-2012) incluye el chopo entre los cultivos energéticos evaluados.

El chopo (Figura VI.2) requiere un aporte importante de agua, un recurso limitante en España. La implantación de este cultivo en el territorio requiere la utilización de terrenos agrícolas marginales con disponibilidad de agua y/o la sustitución de algunos cultivos de regadío.

Una vez cubierta la necesidad hídrica, la productividad del cultivo de chopo depende de otros dos factores: la densidad de plantación y el ciclo de cultivo.

Las densidades de plantación de chopo que se adoptan en la actualidad son muy extremas (1.500 a 44.000 plantones/ha). En Italia, por ejemplo, se establecen dos densidades concretas: 15.000 y 33.000 plantones/ha. Por otro lado, no se dispone de información científica sobre qué densidad es la óptima para la obtención de mayores rendimientos en el cultivo [14].



**Figura VI.2. Cultivo de chopo: (1) 2 semanas, (2) 6 meses, (3) 2 años. Parcelas de cultivo en Mas Badia (Girona)**

### 6.3. Operaciones para el cultivo de colza e. y costes asociados

El cultivo de colza e. cubre un periodo de 1 año, del cual durante 4 meses se realizan operaciones agrícolas (Tabla VI.1). El coste total de la producción de colza e. en una parcela agrícola es de 474 €/ha-año [2,15]. Según la productividad final del cultivo, el coste final de la biomasa resulta más o menos elevado como muestra la Tabla VI.2.

El coste del cultivo de colza e. se caracteriza por la elevada contribución de los fertilizantes consumidos (un 60% sobre el coste final de la biomasa) [16-18]. La aplicación parcial de fertilizantes orgánicos como purines podrían aminorar los costes atribuidos a la etapa de abonado, repercutiendo en una disminución del coste final de la biomasa de colza e.

### 6.4. Operaciones para el cultivo de chopo y costes asociados

El cultivo de corta rotación de chopo requiere tres o cuatro años para el crecimiento de la biomasa. En el proyecto Agrosost [2] se consideró un período de 16 años para el cubrimiento de tres ciclos de cultivo. En este período, las operaciones dadas a cabo en la parcela de cultivo se presentan en la Tabla VI.3.

La suma de costes intervenidos en el total de ciclos efectuados en la misma parcela, permite el cálculo del coste anual de producción de chopo. Según los resultados, si el chopo es cosechado en

**Tabla VI.1. Calendario de operaciones agrícolas para el cultivo de colza e.**

Mes	Tipo de laboreo
Setiembre	Tratamiento con herbicida, abonado de cobertera y siembra.
Diciembre	Pase de rodillo
Enero	Abonado de fondo
Junio	Cosecha, Rastrillado y empacado
Setiembre	Retirada de balas para transporte a planta

**Tabla VI.2. Coste producción y cosecha de colza e. (€/Mg b.s.).**

		Producción de biomasa (Mg b.s / ha-año)		
		4,72	8	10
Coste Maquinaria	Costes Fijos	3,70	2,18	1,75
	Costes Variables	18,01	10,63	8,50
Coste Laboral		8,57	5,05	4,04
Adquisición agroquímicos		60,81	35,88	28,70
Uso y mantenimiento de la parcela agrícola		9,50	5,61	4,49
Coste total producción de colza e. (€/Mg)		100,59	59,35	47,48

Fuente: Adaptado de [16-21]

**Tabla VI.3. Calendario de operaciones agrícolas para el chopo**

Año	Tipo de laboreo
0	Arado, abonado de cobertera, herbicida, plantado, primera corta
1	Aplicación de herbicida o insecticida, o no labor
2	Abonado de fondo
3	Ninguno
4	Ninguno
5	Cosecha de biomasa
6	Aplicación de herbicida o insecticida, o no labor
7	Aplicación de herbicida o insecticida, o no labor
8	Abonado de cobertera
9	Abonado de fondo
10	Ninguno
11	Cosecha de biomasa
12	Aplicación de herbicida o insecticida, o no labor
13	Abonado de cobertera
14	Abonado de fondo
15	Ninguno
16	Cosecha de biomasa y retirada de restos

**Tabla VI.4. Contribución de las labores agrícolas sobre el coste final de la biomasa de chopo**

Periodo	Años	Unidades	Producción de fajos de chopo	Producción de astillas
Establecimiento	0	€	716,8	716,8
Primera rotación	1 - 5	€	322,7	342,7
Segunda rotación	6 - 10	€	546,8	627,9
Tercera rotación	11 - 16	€	546,8	627,9
Recuperación terreno agrícola	16	€	310,3	310,3
Alquiler de la parcela agrícola	Todo el periodo	€	717,7	717,7
Coste total cultivo	Todo el periodo	€	3161,1	3343,3
<b>Coste total del cultivo</b>	<b>euros/ha</b>	<b>€/ha</b>	<b>197,6</b>	<b>208,9</b>

Fuente: Adaptado de [16-21]

**Tabla VI.5. Coste de producción y cosecha del chopo (€/Mg b.s.)**

		Producción de biomasa (Mg b.s / ha-año)							
		9		13,5		15		20	
		Fajos	Astillas	Fajos	Astillas	Fajos	Astillas	Fajos	Astillas
Coste Maquinaria	Costes Fijos	3,89	4,98	2,79	3,32	2,33	2,99	1,75	2,24
	Costes Variables	2,15	2,33	1,43	1,55	1,29	1,40	0,97	1,05
Coste Laboral		2,41	3,06	1,81	2,04	1,45	1,84	1,09	1,38
Adquisición agroquímicos		7,85	7,85	5,24	5,24	4,71	4,71	3,53	3,53
Uso y mantenimiento de la parcela agrícola		4,98	4,98	3,32	3,32	2,99	2,99	2,24	2,24
Coste total producción de chopo (€/Mg)		21,89	23,22	14,59	15,48	12,77	13,93	9,58	10,45

Fuente: Adaptado de [16-21]

forma de fajos el coste final de las actividades agrícolas es de 197 €/ha-año. Si en la cosecha el chopo es triturado para ser cargado en un camión y transportado hasta la planta de valorización final, el coste final de las actividades agrícolas es de 209 €/ha-año. Tabla VI.4.

El alquiler de la parcela agrícola y la aplicación de fertilizantes son los factores que contribuyen en mayor peso sobre los costes totales del cultivo, representando entre un 55,31 y un 60,31% sobre

el coste total de la biomasa [16-20].

El chopo producido en la cosecha en forma de fajos tiene un coste que varía entre 9,58 y 21,89 €/Mg b.s. dependiendo de la productividad obtenida en el cultivo. La producción de astillas de chopo en la cosecha mantiene unos costes más elevados, entre 10,45 y 23,22 €/Mg b.s. debido a la maquinaria utilizada en esta última operación en el campo. Ver Tabla VI.5.

Los costes indicados para el chopo como cultivo de biomasa son similares a los mostrados por la bibliografía. Según estudios realizados con el cultivo de corta rotación de sauce, el coste de la biomasa resulta de 13,88 €/Mg b.s. cuando es cosechado en forma de fajos, y de 14,76 €/Mg cuando es cosechado en forma de astillas. En ambos casos, el estudio asume una producción media de biomasa de 8-12 Mg b.s. en un periodo total del cultivo de 20 años. Otros estudios señalan un coste más elevado de la biomasa, siendo de 56 €/Mg b.s. para un periodo total del cultivo de 8 años. Para todos los casos, el tiempo de uso de la parcela para la rotación del cultivo afecta al coste de la biomasa obtenida en cada ciclo [21].

La diferencia entre costes de la biomasa de los cultivos analizados debe ser entendida en términos de requerimientos del área de cultivo para la producción agrícola. Mientras que las características del suelo de los terrenos de regadío permiten la producción de chopo sin excesivos pre-tratamientos y fertilizaciones en el suelo, y a su vez, compitiendo con otros usos agrícolas con fines alimentarios, la Colza e. cultivada en terrenos de secano y áreas semiáridas marginales requiere de una avanzada roturación y fertilización del suelo para adquirir una mínima productividad.

Según los primeros resultados obtenidos del proyecto Agrosost [2], la producción agrícola y la cosecha de colza e. y chopo son las etapas del sistema de bioenergía que contribuyen en mayor peso sobre el coste final de ambos combustibles antes de ser valorizados energéticamente. Estas etapas se encuentran en la actualidad en estado de investigación por tal de disminuir sus costes asociados. Las líneas de actuación que permiten este objetivo son las siguientes: **(a)** la investigación e implantación de nuevas variedades genéticas para el incremento de la productividad en el cultivo; **(b)** el estudio de las necesidades hídricas y minerales en los cultivos, a través de pruebas de evapotranspiración y retención de nutrientes del suelo por las especies vegetales implantadas; y **(c)** desarrollo de nuevas tecnologías para la mejora en la mecanización del cultivo y la cosecha de la biomasa.

## 6.5. Estado de la tecnología para la cosecha de cultivos energéticos

La tecnología empleada en la cosecha y procesado de la biomasa herbácea con fines alimenticios es también utilizada en el proceso de otros cultivos energéticos destinados a la producción de biocombustibles y de energía. La similitud en características de la biomasa herbácea cosechada para ambos fines permite la fácil adaptación tecnológica de la maquinaria agrícola convencional y el mantenimiento de las rutinas de laboreo por parte del agricultor.

Por otro lado, la tecnología empleada en la cosecha de los cultivos energéticos leñosos se encuentra en fase de investigación y adaptación a las características de estos cultivos. La falta de tecnología desarrollada y probada para la cosecha de los cultivos energéticos leñosos dificulta el avance de proyectos de producción de bioenergía al no obtener combustible de biomasa en el campo con un coste relativamente bajo.

### 6.5.1. Métodos para la cosecha de cultivos energéticos

La cosecha de biomasa consiste en cuatro operaciones básicas: corte, recogida, extracción y triturado. En función del tipo de biomasa, la cosecha puede incluir las siguientes etapas:

#### Biomasa herbácea:

- *Corte y empacado de biomasa.* La cosechadora corta y empaca la biomasa herbácea. Las pacas son secadas en el campo y luego transportadas hasta la planta de conversión de energía. La logística de cosecha y recogida sigue un procedimiento agrícola tradicional.

#### Biomasa leñosa [22]:

- *Cosecha de corte y triturado.* La cosechadora corta, agrupa y tritura el cultivo, dejando las astillas a un lado del campo.
- *Cosecha de un sólo corte.* La máquina corta la biomasa (varas de madera) y la deposita en forma de pilas. Cuando estas han reducido su contenido de humedad mediante secado natural, otra unidad tritura la biomasa antes de efectuar el transporte.
- *Cosecha de corte y formación de haces.* La máquina corta la biomasa agrupando las varas en forma de haces. Éstos son agrupados en pequeños montículos en el campo. Cuando la biomasa

ha reducido su contenido de humedad mediante secado natural, es retirada del campo mediante un camión grúa o un tractor agrícola con remolque forestal.

- *Cosecha de corte y extracción.* La cosechadora corta las varas, agrupándolas y cargándolas sobre una caja o remolque. La trituración se da a cabo mediante una unidad separada.

## 6.5.2. Cosechadoras de cultivos energéticos leñosos

Las cosechadoras de cultivos energéticos leñosos que han sido testadas y mejor consideradas por su rendimiento en Europa en los últimos cinco años se muestran en la Tabla VI.6. La mayoría de los modelos se encuentran en activo y otros necesitan mejoras en su rendimiento. Los modelos más utilizados en escala comercial son: Austoft, Claas, Dansalix, Hvidsted y Fröbbesta [22].

Dos cosechadoras comerciales destacan por sus elevados rendimientos de trabajo obtenidos en numerosas experiencias europeas permitiendo una disminución del coste de la biomasa cosechada en relación al resto de modelos de cosechadoras: Austoft y Class [22-26].

La cosechadora autopropulsada **Austoft 7700** (Figura V.3) es un modelo inicialmente diseñado para la cosecha de caña de azúcar. Adaptada posteriormente para la cosecha cultivos energéticos leñosos, dispone de un motor primario con un cabezal cortante y transportador en la parte anterior, un dispositivo de trituración central y una cinta transportadora en la parte posterior de la máquina, con

**Tabla VI.6. Cosechadoras de cultivos energéticos leñosos de corta rotación utilizadas en Europa.**

Modelo	Funciones	Tipo	Configuración	Potencia (kW)	Peso (kg)	País de origen
Fröbbesta	Sólo corte	De corte	Remolcado	70	3.000	Suecia
Loughry	Corte y haces en campo	Prototipo	Remolcado	70	3.000	Irlanda norte
Nicholson	Corte y haces en campo	De corte	Remolcado	65	3.000	Gran Bretaña
Dansalix	Corte y extracción haces	De corte	Remolcado	65	2.000	Dinamarca
Berni	Corte y extracción haces	De corte	Remolcado	80	2.000	Italia
Hvidsted	Corte y extracción haces	De corte	Autopropulsado	80	6.000	Dinamarca
Sagerslätt	Corte y extracción haces	Prototipo	Autopropulsado	130	12.000	Suecia
ESM 901	Corte y extracción haces	Prototipo	Autopropulsado	74	7.000	Suecia
Gandini	Corte y triturado	Prototipo	Módulo	50	850	Italia
Diemelstadt	Corte y triturado	Prototipo	Módulo	90	800	Alemania
MBB Biber	Corte y triturado	Prototipo	Autopropulsado	52	4.300	Alemania
Bender I	Corte y triturado	Prototipo	Módulo	85	950	Suecia
Bender II	Corte y triturado	Prototipo	Módulo	120	1.250	Suecia
Austoft 7700	Corte y triturado	De forraje	Autopropulsado	179	12.500	Suecia
Claas Jaguar	Corte y triturado	De forraje	Autopropulsado	230	9.400	Alemania

Fuente: Adaptado de [22].



**Figura VI.3. Cosechadora Austoft 7700.**

Fuente: <http://www.machineryshed.com/>; <http://www.farmphoto.com/> (Junio 2008)

**Tabla VI.7. Productividad en la cosecha de cultivos energéticos leñosos con la cosechadora Austoft**

País	Suecia	Suecia	Gran Bretaña	Italia	Dinamarca
Año	1994	1995	1994	1996	1996
Especies cosechadas	Sauce	Sauce	Sauce y chopo	Chopo	Sauce
Edad cultivo (años)	-	-	3	1-2	4-5
Sistema de hileras	Doble	Doble	Una	Una	Doble
Productividad campo (Mg/ha)	37-42	29-63	37-80	11-34	28-50
Velocidad de cosecha (km/h)	3,3-4,5	2,6-5,1	2,1-3,8	5,1-8,8	3,3-6,0
Productividad máquina (Mg/h)	19-26	21-32	9-25	18-22	14-23

Fuente: Adaptado de [22].

funciones hidráulicas.

El cabezal cortante consiste en dos barras helicoidales cortantes situados lado a lado, capaces de triturar dos hileras de cultivo simultáneamente (Tabla VI.7). Las varas son conducidas hacia el triturador central, que corta las varas en astillas de 5 a 10 cm. Las astillas caen en la cinta transportadora trasera propulsándolas hacia el exterior. El mecanismo transportador puede rotar, permitiendo la caída de las astillas en un camión situado a la derecha o a la izquierda de la cosechadora [22,25].

La operación de la cosechadora Austoft en varios cultivos energéticos leñosos de diversos países de Europa ha demostrado productividades elevadas (hasta 32 Mg/h) mediante una alta velocidad de trabajo en el campo.

La cosechadora autopropulsada **Class Jaguar** (Figura VI.4) consiste en una cosechadora convencional de forraje equipada con un cabezal especial para el proceso de cultivos energéticos leñosos. El cabezal HS-2 trabaja dos hileras a la vez cortando mediante dos sierras con dientes metálicos, troncos de 70 mm como máximo. La inclinación regulable de la máquina permite una

tensión previa en los troncos que determina el sentido de la caída. Las ramas finas que sobresalen de los troncos son recogidas mediante dos sinfines laterales. Dos ruedas con púas móviles recogen el material de cosecha y lo transportan a través de un tambor de cuchillas hacia la carcasa de prensado previo y el tambor picador. El uso de remolques de traspaso de carga permite evitar el dañado en los troncos cortados, garantizando la próxima cosecha al cabo de unos años. En el extremo de la parcela se puede volcar las astillas en los vehículos de transporte [22,26].

Las productividades obtenidas por la cosechadora Class son generalmente elevadas (hasta 42 Mg/h), aunque varían considerablemente en función del campo trabajado. En Italia y Gran Bretaña, la productividad fue más baja en relación a las demás experiencias debido al trabajo de sólo una hilera por recorrido de la cosechadora (Tabla VI.8).

La adquisición (por compra o alquiler) de prototipos de cosechadoras u otras en fase comercial suponen aún un elevado coste, afectando al coste final de la biomasa. La falta de estudios de mejora y de adaptación tecnológica, y los actuales rendimientos de trabajo en la cosecha de cultivos energéticos leñosos en España dificulta la implantación de cultivos ya implantados en países



**Figura VI.4. Cosechadora Claas Jaguar**

Fuente: <http://www.claas.es> ; <http://www.nyvraa.dk> (Junio 2008)

**Tabla VI.8. Productividad en la cosecha de cultivos energéticos leñosos con la cosechadora Class Jaguar.**

Lugar	Suecia	Suecia	Gran Bretaña	Italia	Dinamarca
Año	1994	1995	1995	1995	1996
Especies cosechadas	Sauce	Sauce	Sauce	Chopo	Sauce
Edad cultivo (años)	-	-	3	1-2	4-5
Sistema de hileras	Doble	Doble	Una	Una	Doble
Productividad campo (Mg/ha)	21-53	27-54	12-32	14-48	31-60
Velocidad de cosecha (km/h)	4,7-9,1	5,5-9,2	3,5-6,9	5,2-7,3	5,1-7,1
Productividad máquina (Mg/h)	22-35	26-42	7-13	8-21	12-31

Fuente: Adaptado de [22].

Europeos a escala comercial (chopo, sauce).

Aun se requieren prototipos y cosechadoras comerciales que garanticen elevadas productividades de trabajo en varias condiciones de cultivo (tipo de terreno, distancia entre hileras, densidad de plantones).

Hasta que este factor sea resuelto, la adquisición de prototipos y cosechadoras en grandes parcelas de cultivo mantienen costes más bajos que en su uso en pequeñas experiencias de cultivo debido al coste de adquisición o alquiler, consumos de combustible y costes operativos.

## 6.6. Conclusiones

Las conclusiones principales que se obtienen del presente capítulo son:

- Los cultivos energéticos son la tipología de biomasa que se prevé que se consuma en mayor número para conseguir los objetivos energéticos marcados en el *Plan de Energías Renovables 2005-2010*.
- Cataluña es la cuarta comunidad autónoma española con más cultivos energéticos implantados, con 2900 ha, en su mayoría (el 97%) de colza para la producción de biodiesel.
- El cultivo y la cosecha de colza e. y chopo son las etapas del sistema de bioenergía que contribuyen en mayor peso sobre el coste final de ambos combustibles antes de ser valorizados energéticamente.
- El coste total de la producción de colza e. en una parcela agrícola es de 474 €/ha-año.
- El uso de fertilizantes en el cultivo de colza contribuye en un 60% sobre los costes totales del cultivo. La aplicación parcial de fertilizantes orgánicos como purines en el cultivo de colza podría disminuir los costes del cultivo, algunos con muy bajos rendimientos medios agrícolas (ej.: 4,72 Mg b.s./ha en parcelas de Soria).
- Si se asume una productividad agrícola de 8 Mg b.s./ha-año, el coste de la biomasa de colza en forma de pacas antes de ser recogida y transportada hasta el lugar de valorización, es de 59 €/Mg b.s.

- El cultivo y cosechado del chopo durante tres ciclos de rotación en una parcela agrícola durante 16 años mantiene un coste de 3165 €/ha cuando es cosechado en forma de fajos, y de 3343 €/ha cuando es cosechado en forma de astillas.
- El alquiler de la parcela agrícola y la aplicación de fertilizantes en el cultivo del chopo contribuyen entre un 55,31% y un 60,31% sobre el coste total de la biomasa cosechada.
- Si se asume una productividad agrícola media de 13,5 Mg b.s./ha-año, el coste final del chopo antes de ser recogido para su valorización energética es de 14,6 €/Mg b.s. cuando es cosechado en forma de fajos, y de 15,5 €/Mg b.s. cuando es cosechado en forma de astillas.
- La tecnología empleada en la cosecha y procesado de la biomasa herbácea con fines alimenticios es la que se ha utilizado en el proceso de los cultivos energéticos herbáceos destinados a la producción de biocombustibles y de energía.
- La falta de tecnología desarrollada y probada para la cosecha de los cultivos energéticos leñosos dificulta el avance de proyectos de producción de bioenergía al no obtener combustible de biomasa en el campo de un modo económico.
- Las cosechadoras de la marca Austoft y Class son las mejores consideradas en experiencias europeas debido a sus elevados rendimientos de trabajo y fácil adaptación a las características del terreno (hasta 32 Mg/hora y 42 Mg/hora respectivamente).

## 6.7. Referencias

- [1] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) (2005). Plan de Energías Renovables 2005-2010 [En línea] Disponible en: <http://www.mityc.es> (Consulta: Octubre 2008).
- [2] Proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología: "Evaluación de la Sostenibilidad Medio Ambiental de Cultivos Energéticos mediante el Análisis de Ciclo de Vida (Proyecto AGROSOST)". Referencia CTM 2004-05800-C03-01/TECNO. Diciembre 2004-2008.
- [3] Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció rural (2008). Estadístiques Agrícoles, Agrocarburants. [En línea]. Disponible en: <http://www.gencat.cat> (Consulta: Abril 2008).
- [4] Fondo Español de Garantía Agraria (2008). Ayuda a los Cultivos Energéticos. Campaña 2007/2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.fega.es> (Consulta: Abril 2008).
- [5] Ministerio de Educación y Ciencia. "Proyecto singular y estratégico para el desarrollo de los cultivos energéticos en España. Proyecto PSE-cultivos energéticos. 2005-2012".
- [6] Aronsson, P.G.; Bergström, L.F. (2001). Nitrate leaching from lysimeer-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 21, pp. 155-164.
- [7] Royal Commission on Environmental Pollution (2004). Biomass as a Renewable Energy Source. [En línea]. Disponible en: <http://www.rcep.org.uk> (Consulta: Abril 2008).
- [8] Spinelli, R; Nati, C. (2007). Woody Biomass Production from agricultural land in Italy. CNR-TTI, Florencia.
- [9] University of Bologna, Department of Agricultural Economics and Engineering (2006). Study on implementing the Energy Crops CAP Measures and Bioenergy Market. Final Report. [En línea]. Disponible en: [http://ec.europa.eu/agriculture/eval/reports/bio\\_energy/](http://ec.europa.eu/agriculture/eval/reports/bio_energy/) (Consulta: Abril 2008).
- [10] International Energy Agency, IEA (2008). IEA Bioenergy Task 30, Short Rotation Crops. Country Reports. [En línea] Disponible en: <http://www.shortrotationcrops.org/> (Abril 2008).
- [11] Interactive European Network for Industrial Crops and their Applications, IENICA (2007). Ethiopian mustard. [En línea] Disponible en: <http://ienica.csl.gov.uk/> (Consulta: Mayo 2008).
- [12] Brassica carinata: A New Crop for Biomass and Industrial Non-Food Oil Production - CARINATA. FAIR-CT96-1946. [En línea] Disponible en: <http://www.biomatnet.org/> (Consulta: Mayo 2008).
- [13] Tubby, I.; Amrstrong, A. (2002). Establishment and Management of Short Rotation Coppice. Forestry Commission. Reino Unido [En línea]. Disponible en: <http://www.forestry.gov.uk/srcsite/infid-517e8h> (Consulta: Mayo 2008).
- [14] Comunicación personal de Jordi Salvia, IRTA-Mas Badia.
- [15] Martínez-Gasol, C. et al. (2007). Life Cycle Assessment of a Brassica carinata bioenergy system in southern Europe. *Biomass & Bioenergy*. Vol. 31. pp. 543-555.
- [16] Martínez-Gasol, C. et al. (2005). LCA of the logistics of Brassica carinata and Populus sp. in Spain. (Poster). LCM International Conference, 5-7 Setiembre 2005. Barcelona (España).
- [17] Martínez-Gasol, C. et al. (2007) Evaluation of the sustainability of the energetic crops using Life Cycle Management methodology (presentación oral) 15th European Biomass Conference & Exhibition. From Reserch to Market Deployment. Berlin (Alemania).

- [18] Martínez-Gasol, C. et al. (2007) Life Cycle Assessment of two bioenergy systems in Mediterranean regions (póster). 3rd International Conference in Life Cycle Assessment (LCM2007). Zurich (Suiza).
- [19] Martínez-Gasol, C. et al. (2008). LCA of Poplar bioenergy system compared with Brassica carinata energy crop and natural gas in regional scenario. Biomass & Bioenergy (en revisión).
- [20] Martínez-Gasol, C. et al. (2006). Life Cycle Assessment of Poplar Energetic Crop System (poster). International Controversies and Solutions in Environmental Sciences. SETAC Europe 16th Annual Meeting. The Hague (Holanda).
- [21] Martínez-Gasol, C. et al. (2008). Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the Southern Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (En prensa)
- [22] Spinelli, R. (1996) A review of short-rotation Forestry Harvesting in Europe. First Conference of the Short Rotation Woody Crops Operations Working Group, Paducah, Kentucky (Estados Unidos).
- [23] Forest Research (1998) Technical Development Branch. Harvesting and comminution of short rotation coppice. Reino Unido.
- [24] Development of Harvesting and Storage Technologies Essential for the Establishment of Short Rotation Forestry as an Economic Source of Fuel in Europe. Proyecto AIR3-CT94-1102. Años 1994 - 1997.
- [25] Case IH Agriculture (2007). Cane harvesters 7000 series. [En línea]. Disponible en: <http://www.caseih.com> (Consulta: Junio 2008).
- [26] Claas Iberica (2008). Técnicas en uso. [En línea]. Disponible en: <http://www.claas.es> (Consulta: Junio 2008).



Capítulo 7.

**Tecnologías para la transformación y  
aplicaciones de la biomasa**

---



## 7. TECNOLOGÍAS PARA LA TRANSFORMACIÓN Y APLICACIONES DE LA BIOMASA

### 7.1. Introducción y objetivos

La biomasa es actualmente transformada mediante diversas tecnologías para la obtención de productos alternativos a los obtenidos a partir del petróleo, en un mercado tradicionalmente monopolizado. La evolución del precio del petróleo y su tendencia ascendiente en los últimos años debido a la creciente demanda mundial y agotamiento en las explotaciones de este recurso, son factores que favorecen el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa como recurso renovable. Las principales aplicaciones de la biomasa son las siguientes:

- Obtención de energía eléctrica/térmica a través de la biomasa como combustible:
  - Valorización directa de la biomasa. Obtención de energía térmica y/o eléctrica.
  - Valorización indirecta de la biomasa. Obtención de gas combustible, biocombustibles líquidos (bioalcoholes, biodiesel), residuos sólidos del tratamiento térmico (carbón vegetal).
- Obtención de productos químicos: materias químicamente simples a través de procesos de síntesis a partir de gases, productos de fermentación y destilación, entre otros procesos.

Muchas de las técnicas utilizadas con la biomasa se han utilizado durante años, algunas de ellas perdurando en la actualidad (ej.: hogares para la combustión). Otras técnicas son de reciente aprobación y demostración (gasificación) y otras parecen tener un buen potencial para llegar a ser técnicas futuras concebibles, aunque no se haya demostrado aún su aplicación directa y rentabilidad para un uso industrial (pirólisis).

Por otro lado, la obtención de productos químicos a partir de recursos renovables es también en la actualidad objeto de estudio a escala internacional. En el marco de la *Química Verde* [1], la investigación en éste área se enfoca en la búsqueda de nuevos productos menos contaminantes a partir de recursos forestales, agrícolas, cultivos energéticos u otros residuos de origen lignocelulósico, substituyendo a los actuales productos químicos de procedencia no-renovable.

El objetivo de este capítulo es la revisión del conjunto de tecnologías basadas en la combustión de la biomasa, tanto desde la preparación física de la biomasa como forma estándar de combustible, hasta los sistemas de combustión y tratamiento de gases más empleados. De un modo más breve también se resumen las características de las tecnologías de gasificación y pirólisis junto con sus principales aplicaciones, y las técnicas utilizadas para la producción de biocombustibles.

### **7.2. Metodología del estudio**

La metodología empleada en el estudio se ha basado en la revisión bibliográfica de información publicada por instituciones públicas, redes de investigación, empresas y plataformas empresariales de naturaleza nacional e internacional. La información obtenida ha sido valorada, aceptada o descartada en función de la rigurosidad y origen de los datos, así como de la actualización de éstos.

### **7.3. Tecnologías para la transformación física de la biomasa como combustible**

La heterogeneidad en la naturaleza y formas de la biomasa primaria hace que sea necesaria la adecuación y estandarización del formato y de las características físicas de la biomasa a las requeridas según la tecnología de conversión de energía posteriormente empleada.

Las tecnologías de preparación física de la biomasa se basan en procesos de densificación/compactación (astillado y la molienda) con el objetivo de homogeneizar las propiedades físicas del material, incrementar la densidad calorífica y estandarizar el formato de la biomasa.

#### **7.3.1. El astillado**

El astillado de la biomasa se basa en la trituración de la materia para la obtención de fragmentos (entre 2 y 10 cm de longitud). El producto final, la astilla, es la que se utiliza en la totalidad de procesos de transformación energética de biomasa de media y gran envergadura. Se caracteriza por tener una forma plana o cilíndrica, predominando la longitud (3 - 10 cm) y la amplitud (2 - 6 cm) sobre el grosor (<2 cm). La densidad aparente es baja (250 - 350 kg/m<sup>3</sup>) en relación a otros combustibles como el carbón y los pelets de madera.

La trituración de la biomasa, a diferencia de otros procesos de transformación física, se puede efectuar tanto en el lugar de origen o procedencia de la biomasa (trituración in-situ), como fuera del entorno de origen o en la propia planta de conversión energética (trituración ex-situ). Las astilladoras se pueden clasificar según el tipo del equipo, mecanismo de astillado, modo de alimentación del material a triturar y salida de la astilla. Ver Figura VII.1 y Tabla VII.1.

### 7.3.2. El peletizado

El peletizado se basa en la compresión de la materia vegetal (astillas, serrines, etc.) mediante la acción de unos rodillos (de 1 a 5 rodillos) contra una matriz de agujeros de entre 0,5 a 2,5 cm de diámetro [2]. Ver Figura VII.2.

Si el material de entrada presenta dimensiones mayores a astillas, se requiere de un proceso de astillado previo al prensado con los rodillos. Una vez formado el pelet, es necesario un proceso de tamizado para la homogeneización del tamaño del producto final.

El pelet es un pequeño cilindro de tamaño variable (2 - 7 cm de longitud; 1,5 cm de amplitud), con una humedad inferior al 12%. La densidad del pelet es relativamente elevada en comparación a las astillas (1000 - 1300 kg/m<sup>3</sup>) [3]. Los factores que influyen en esta densidad son los siguientes:

**Tabla VII.1. Clasificación de las astilladoras**

Tipo de clasificación	Tipo de astilladora		
	Fijas Autopropulsadas o autónomas	Montadas Móviles	Remolcadas Acopladas
Mecanismo de astillado	Tambor	Disco	Cuchillas
Alimentación / entrada del material	Manual		Mecánica
Salida de la astilla	Por gravedad		Por ventilación

Fuente: Adaptado de [4].



**Figura VII.1. Astilladoras móviles: alimentación manual y mecánica**

- El tipo de materia prima prensada. A mayor densidad del material original, mayor es la densidad del pelet;
- La presión ejercida por la prensa, variable según la maquinaria utilizada.

El poder calorífico de los pelets es superior al de las leñas, astillas y briquetas. Dependiendo de la densidad y humedad de la biomasa inicial, el producto contendrá un poder calorífico de entre 21 - 22 MJ/kg [5].



**Figura VII.2. Mecanismo de peletizado.**

Fuente: Adaptado de [6].

### 7.3.3. El briquetado

El briquetado consiste en la compresión de la materia vegetal (madera, cáscaras de arroz, paja, aserrín, etc.) superior a 200 MPa hasta producir un aumento de la temperatura del material hasta 100 - 150°C. A temperaturas elevadas la lignina se plastifica permitiendo la formación de unidades compactas.

Una briquetadora consiste en una tolva de alimentación, un sistema dosificador simple o múltiple de velocidad variable, una cámara de compactación o densificadora, un canal refrigerante y un sistema de corte. La prensa es el componente clave en la producción de briquetas. Se disponen de cuatro tipos de briquetadoras, utilizadas en función de su aplicación industrial y del tipo de material a comprimir: **(a)** Prensa de impacto; **(b)** Prensa de extrusión; **(c)** Prensa de briquetado hidráulica o neumática; y **(d)** Prensa de doble rodillo [7].

La característica común de las briquetas es su elevada densidad (1000 - 1300 kg/m<sup>3</sup>). La forma es normalmente cilíndrica con diámetros comprendidos entre 3 y 20 cm, y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otra forma usual de briqueta es el prisma cuadrado o el prisma hexagonal vacío. También se pueden obtener formas de ladrillo.

La humedad final de la briqueta depende de las características físico-químicas del material que se requiere prensar y de la forma final del producto (8 al 10% de humedad en la salida de la prensa).

#### 7.3.4. El empaclado

El empaclado se utiliza en la cosecha de algunos cultivos herbáceos (en su mayoría de cereales) con el objetivo de obtener paquetes comprimidos de materia. Los usos finales de estos paquetes, llamados pacas, son la alimentación ganadera (paja para forraje) o la producción de energía. Las pacas adquieren formas y volúmenes variables en función de la máquina utilizada. Los tipos de empacadoras comúnmente más utilizadas son las siguientes [8]:

- Empacadora convencional. Produce paquetes prismáticos de peso inferior a 40 kg. Se distinguen empacadoras de alta presión, media presión y baja presión.
- Rotoempacadoras. Producen pacas cilíndricas de gran tamaño.
- Empacadoras rectangulares. Producen pacas prismáticas de peso superior a 100 kg.

Las pacas producidas en la cosecha suelen ser agrupadas en el campo para facilitar su secado, recogida y carga al remolque de un camión.

### 7.4. Valorización directa de la biomasa como combustible

Los principales procesos térmicos aplicados a la biomasa para su valorización energética son: la combustión, gasificación y pirólisis. (Tabla VII.2).

Según las opciones descritas, la biomasa puede ser quemada directamente para la obtención de gases calientes y generación de energía térmica (mediante el intercambio del calor de los gases de combustión con agua), y/o energía eléctrica (sobrecalentando el agua hasta llegar a vapor, y mediante la expansión del gas en una turbina, se obtiene movimiento generando electricidad).

**Tabla VII.2. Procesos, productos y aplicaciones de la biomasa mediante procesos térmicos**

Proceso	Producto	Aplicaciones	
<b>Combustión</b>	Gases calientes de escape	Caldera/máquina de vapor	Calefacción, proceso de calor Agua caliente, Electricidad/calor
<b>Gasificación</b>	Gas combustible	Caldera, Motor de gas, turbina de gas, celda de combustible	Calor Electricidad/calor
	Gas de síntesis	Gas natural sintético Combustible líquido de motor	Calor Transporte
<b>Pirólisis</b>	Gas combustible	Motor	Electricidad/calor
	Líquidos Carbón (combustible sólido)	Caldera Motor	Electricidad/calor Transporte

Fuente: Adaptado de [9].

La gasificación y la pirólisis se basan en la obtención de gases y líquidos que pueden ser quemados obteniendo los mismos productos que en la combustión directa de la biomasa. La gasificación implica la implantación de otras tecnologías que aprovechan la cinética y propiedades físicas del gas obtenido (motor de gas) antes de ser quemado en plantas de ciclo combinado, y la generación de gases para la síntesis de nuevos productos de interés en la industria química. En la pirólisis, las fracciones obtenidas son tratadas por separado, en algunos casos quemando parte de los productos para la obtención de energía que será usada en el mismo proceso, o para la venta de la fracción líquida como combustible.

### 7.4.1. El proceso de combustión

La combustión se basa en la transformación de la energía intrínseca de la materia para la generación de energía térmica a través de la oxidación total del combustible con un agente oxidante (oxígeno contenido en el aire). Las principales reacciones de oxidación dadas en la combustión son las siguientes:



En la reacción de oxidación de la biomasa, la energía intrínseca de la materia es transmitida a los gases y partículas generados en forma de energía térmica. La cantidad de energía producida en la combustión varía en función de la composición y propiedades físicas del combustible, y se ve reducida proporcionalmente al grado de humedad.

## 7.4.2. Aplicaciones principales de la combustión de la biomasa

Las principales aplicaciones basadas en la combustión de biomasa son las siguientes:

- **Aplicaciones de aprovechamiento térmico:** El gas resultante de la combustión circula a través de un inter-cambiador de calor, permitiendo la transferencia de energía calorífica del gas al agua circulante de la caldera. El resultado es la generación de agua caliente para usos de consumo humano y/o usos sanitarios y/o para calefacción.
- **Generación de electricidad:** Parte de la generación de vapor a elevada temperatura y presión a partir del contacto del gas de combustión con tubos de agua circulante. En la turbina, la expansión del vapor a través de las hélices genera energía mecánica. El movimiento circular acciona un alternador que genera la corriente eléctrica.
- **Cogeneración:** La cogeneración se basa en la generación de energía térmica y eléctrica a partir de un mismo combustible. El proceso se basa en el aprovechamiento térmico del gas exhausto procedente de una turbina de vapor. La energía térmica es obtenida a partir de un condensador del vapor exhausto de la turbina o del agua caliente generada en un intercambiador de calor. La cogeneración con biomasa es presente en aplicaciones industriales como la industria de la pulpa y del papel, la del contrachapado y agroindustrias. El agua caliente producida también tiene usos para consumo sanitario o para calefacción residencial

Según la aplicación deseada de la combustión y la magnitud en el aprovechamiento energético (potencia del sistema de generación de energía), se distinguen diversas escalas por las que la tecnología diverge en configuración y magnitud. Para el análisis de la tecnología de la combustión se han distinguido tres escalas según la potencia instalada:

- **Pequeña escala (5-500 kW):** Incluye desde hogares domésticos hasta calderas para el suministro de agua caliente o calor a escala residencial y comunitaria.
- **Mediana escala (500 kW a 5 MW):** Incluye calderas para el suministro residencial, de edificios y/o pequeños distritos, dependiendo de la potencia instalada. La energía producida es térmica y/o eléctrica, según el equipo instalado. Para potencias superiores a 1MW, se suelen instalar turbinas de gas o vapor para la generación de electricidad. El suministro de biomasa de origen forestal implica un alcance regional.

- **Gran escala (> 5MW):** Son plantas orientadas a la generación de energía eléctrica, que pueden suministrar energía térmica cubriendo la demanda calorífica del territorio (hoteles, restaurantes, polígonos industriales).

Los sistemas de almacenado de combustible (silos o búnquers) y las plantas de transferencia son comunes para los sistemas de combustión de mediana y gran escala, como en otras instalaciones de gasificación. Estos sistemas transmiten la biomasa hasta la planta final en función del combustible requerido para la operación continuada durante un periodo de tiempo determinado. Los sistemas de almacenado de la biomasa son descritos a continuación.

### 7.4.3. Sistemas de almacenado: Plantas de transferencia y silos de biomasa

Las plantas de transferencia de combustible se caracterizan por la ocupación de grandes áreas dedicadas a la acumulación de biomasa en forma de astillas, fajos de biomasa o troncos. Las plantas de transferencia se sitúan en lugares estratégicos permitiendo el suministro de una o varias calderas de biomasa. Otras funciones de las plantas de transferencia son las siguientes:

- Permitir el correcto secado de la biomasa para la mejora de las características caloríficas del material.
- Almacenado de biomasa ya astillada o sin astillar (fajos de biomasa y troncos).
- Control de entradas y salidas de biomasa para el suministro a varias calderas.
- Centro de selección de la calidad del material.

La biomasa astillada es previamente tamizada y clasificada antes de su almacenamiento en forma de montículos. Según la climatología, éstos suelen ser cubiertos mediante un cobertizo o cerrados en naves presentando las siguientes ventajas:

- Aperturas en las paredes permiten la ventilación del recinto y el secado natural de la biomasa por la acción de las corrientes de aire.
- Las cubiertas con tejado permiten evitar el contacto directo de la biomasa con la lluvia.

Una vez la biomasa es transferida a la planta de transferencia y adecuada en forma y calidad al requerimiento de los posibles consumidores, la biomasa es transportada hasta la instalación de

combustión/gasificación/pirólisis. Las astillas vuelven a ser almacenadas en silos o búnkeres para garantizar el continuo funcionamiento de la caldera/equipo de tratamiento térmico. El transporte de las astillas desde el silo hasta la caldera se efectúa mediante los siguientes mecanismos: **(a)** Rascador horizontal hidráulico en un suelo plano; **(b)** Rascador giratorio; **(c)** Transportador sinfín en un suelo inclinado; y **(d)** Transportador neumático en un suelo inclinado (sólo para pelets).

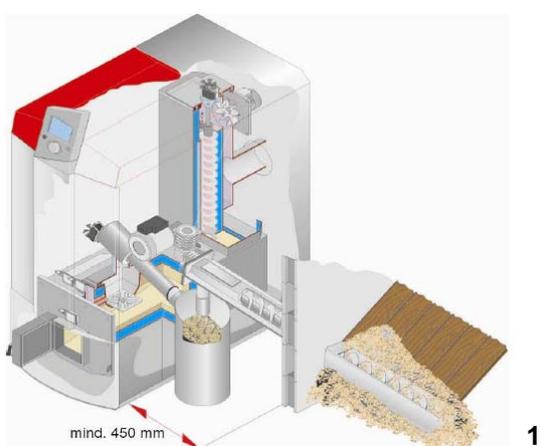
La selección de las dimensiones, posición y configuración del silo o bunker contiene implicaciones en el modo de descarga del combustible. Los silos situados en la superficie del terreno y los subterráneos requieren vehículos aptos para el vuelque de la carga. El almacén debe estar ventilado para permitir el secado y evitar la aparición de mohos y florituras.

#### 7.4.4. Tecnologías de combustión de pequeña escala

Las tecnologías de combustión de pequeña escala (5-500kW, Figura VII.3) se caracterizan por:

- Producción de energía térmica en estufas y hogares a partir de la combustión de biomasa en una parrilla fija plana, con propagación del calor desde la fuente generadora mediante aire.
- Incorporación de intercambiadores de calor (sistema caldera) en los sistemas de más elevadas potencia ( $\geq 15\text{kW}$ ) para la producción de agua caliente con fines de calefacción residencial y consumo sanitario.
- Control de la entrada de aire mediante respiraderos o rendijas en los sistemas de menor potencia.

Para mayores potencias, el control es automático.



1



2

**Figura VII.3. Calderas de biomasa para calefacción de edificios**

(1) Caldera de 14,9 kW, Fuente: Altersun Grup S.L. (2) Caldera <500kW. Fuente: Energy Agency Ireland, 2005.

- Eliminación de las cenizas manual, excepto en los sistemas que incorporan una entrada automática de combustible (pelets y astillas) donde la ceniza es arrastrada y recogida en un cenicero.
- Instalación de silos o cámaras de almacenado de combustible en calderas domésticas de elevada potencia con la finalidad de garantizar una operación continua a lo largo de días o semanas. El combustible de biomasa es transportado desde el silo hasta la caldera mediante un transportador sinfín (pelets y astillas).
- Las tecnologías de combustión de pequeña escala no incorporan sistemas de limpieza de gases. Solamente son instalados tubos de evacuación de humos con acceso al exterior del recinto donde es instalado el sistema de combustión.

La Tabla VII.3 resume las características básicas de los sistemas de combustión de pequeña escala.

#### 7.4.5. Tecnologías de combustión de mediana escala

Las tecnologías de combustión de mediana escala (500 kW a 5MW) se caracterizan por:

- Consumo de astillas de madera en la totalidad de experiencias debido a su menor coste en relación a los pelets.
- Operación del hogar a partir de una parrilla fija plana, inclinada o escalonada, con aportación de la biomasa mediante un transportador sinfín tanto por la parte superior, como inferior u horizontal respecto a la parrilla.

**Tabla VII.3. Características de los sistemas de combustión de pequeña escala**

Tipología de horno	Potencia	Tipo de energía	Entrada combustible	Retirada de ceniza
Hornos de palos y briquetas				
Hogares	3 – 5 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Estufas	3 – 8 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Estufas de cerámica	8 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Calderas	15 kW	Agua caliente	Manual	Automática
Hornos para astillas	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Automática	Automática
Hornos para pelets	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Automática	Automática
Hornos para palos y pelets	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Manual/automática	Automática

Fuente: Adaptado de [9].

- Producción de energía térmica en las experiencias de menor potencia para la calefacción de edificios. También se instalan sistemas de cogeneración. Las eficiencias de conversión energética son variables en función de la tecnología instalada. Ver Figura VII.5.
- Instalación necesaria de silos, tanques o cámaras de almacenado que aporten combustible continuamente a la caldera. Las dimensiones de éstos varían en función de la potencia y eficiencia de conversión del sistema instalado.
- Instalación de ciclones o pequeños multiciclones para la eliminación de partículas de los gases de combustión. A medida que aumenta la potencia instalada, se requieren sistemas de separación de partículas más eficientes y de mayor magnitud debido al elevado volumen de gas de combustión generado. En estos casos, se instalan sistemas combinados como ciclones o multiciclones juntamente con filtros de mangas o precipitadores electrostáticos.
- En algunas experiencias europeas son presentes sistemas de quema de balas de paja o “Cigar burning” para potencias de 1 - 2 MW<sub>th</sub>.

La Figura VII.4 muestra los diversos tipos de hogares utilizados en la combustión de mediana escala. La Figura VII.5 identifica las pérdidas energéticas en la generación de electricidad y calor, a partir de un horno de parrilla con astillas de madera.

#### 7.4.6. Tecnologías de combustión de gran escala

Los sistemas de combustión de gran escala se caracterizan por:

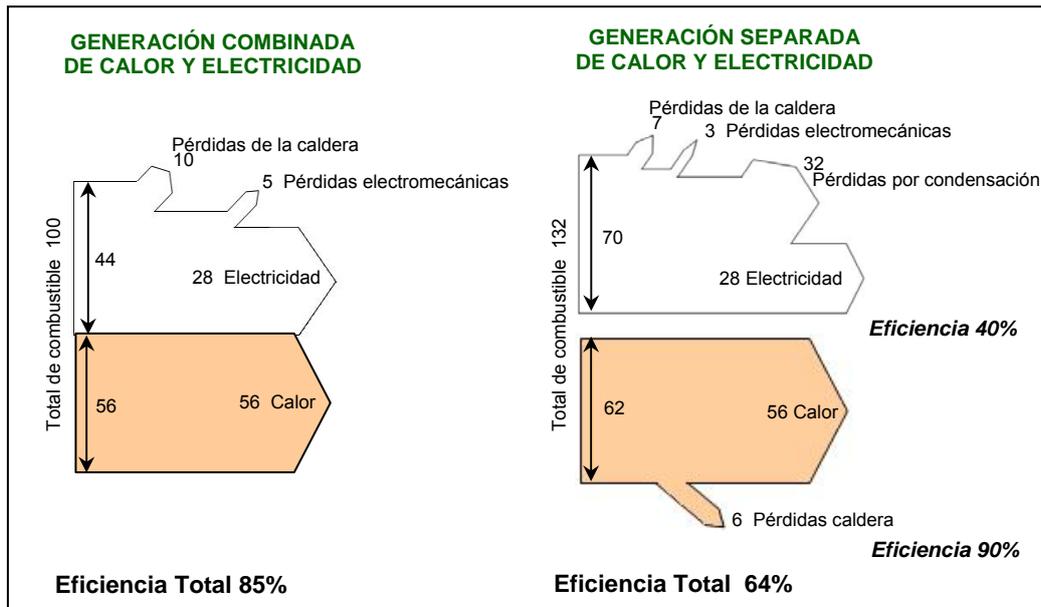
- Similitud en características a los sistemas de mediana escala. Aumento de dimensiones y complejidad técnica de los componentes, necesidad de combustible de biomasa y volumen de gases y cenizas generados.
- Generación energía térmica y eléctrica combinadamente mediante turbinas de vapor (eficiencia media 85-88%), o solamente eléctrica cuando mayor es la potencia instalada (eficiencia media 25-30%)
- Combustión compatible de diversos combustibles de biomasa en un mismo horno (astillas de madera, residuos vegetales, etc.) La limitación en la operación de la caldera se haya en el

	<p><b>PARRILLA MÓVIL CON ALIMENTACIÓN SUPERIOR</b> [10]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceptación de una variedad amplia de combustibles (cultivos energéticos, astillas de madera y carbón)</li> <li>• Contenido de humedad del combustible entre 5 y 55%.</li> <li>• Aceptación de medida de astillas variable, adaptación del combustible según el sistema transportador sinfín que alimenta a la caldera.</li> <li>• Presente en escasas experiencias en el mundo, se instala para potencias iguales o superiores a 2 MW.</li> </ul>
	<p><b>PARRILLA FIJA PLANA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia de conversión a calor mínima del 90%, en condiciones de plana carga del horno y contenido de humedad de las astillas <math>\leq 35\%</math>.</li> <li>• Los gases de combustión calientan los tubos de la caldera generando agua caliente o vapor de agua.</li> <li>• Posibilidad de instalación de turbinas de gas y/o vapor para la generación de electricidad.</li> </ul>
	<p><b>PARRILLA INCLINADA (MÓVIL)</b> [11]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La parrilla móvil favorece el desplazamiento del combustible al lo largo del hogar.</li> <li>• Eficiencia de conversión a calor mínima del 90%, en condiciones de plana carga del horno y contenido de humedad de las astillas <math>\leq 35\%</math>.</li> <li>• Los gases de combustión calientan los tubos de la caldera generando agua caliente o vapor de agua.</li> <li>• Posibilidad de instalación de turbinas de gas y/o vapor para la generación de electricidad.</li> </ul>
	<p><b>SISTEMA DE QUEMA DE BALAS DE PAJA ("CIGAR BURNING SYSTEM")</b> [12]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Algunos modelos presentan trituradores de paja, transportador sinfín del triturado y quema en parrilla fija plana o inclinada. Otros modelos introducen las balas en cámaras cerradas produciendo una quema superficial.</li> <li>• Alta generación de ceniza</li> <li>• Los gases de combustión calientan los tubos de la caldera generando agua caliente o vapor de agua.</li> </ul>

Figura VII.4. Tipos de hogares y quemadores de parrilla en los sistemas de combustión de mediana escala.

contenido de humedad global del combustible o combustibles consumidos en el horno.

- Requerimiento de sistemas de limpieza de gases con elevados rendimientos de la separación de partículas. Se suelen usar sistemas combinados de filtros (multiciclón + precipitador electrostático, filtro de mangas + precipitador).



**Figura VII.5. Balance de energía en la generación térmica/eléctrica a partir de la combustión de biomasa**

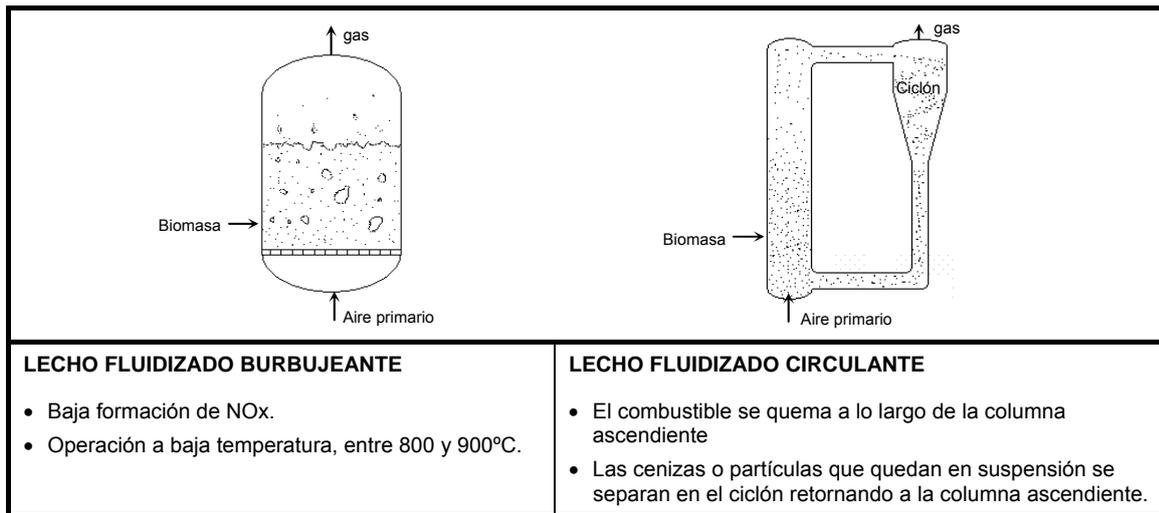
Fuente: Adaptado de [13].

- En algunas experiencias, producción eléctrica/térmica a partir de la quema de balas de paja “Cigar Burning”.

Los sistemas de combustión de elevada potencia utilizan parrilla fija plana o parrilla móvil, inclinada o escalonada. En sistemas de mayor magnitud con consumos elevados de biomasa se requieren otros tipos de horno como los lechos fluidizados (para 100, 500MW o más elevada potencia). Los combustibles de biomasa consumidos en estos lechos son de mayor variedad: astillas de madera y materiales agrícolas de diverso poder calorífico (cáscaras de arroz, cáscaras de almendras, paja, etc.). Los lechos fluidizados destacan por su mayor flexibilidad ante cambios de combustible y respuesta rápida a los cambios de carga (Figura VII.6).

#### 7.4.7. Sistemas de limpieza de gases de combustión

Los sistemas de limpieza de gases colectan las partículas y otros contaminantes presentes en los humos formados en la combustión. La cantidad de gases y partículas generados depende de la cantidad y calidad del combustible quemado, así como de la configuración y operación del horno quemador. Se diferencian dos tipos de tratamientos de gases según el tipo de limpieza requerido del gas:



**Figura VII.6. Tipos de hornos de combustión de lecho fluidizado**

- Sistemas de eliminación de partículas en los gases de combustión: ciclones, multiciclones, filtros de mangas, sistemas húmedos de lavado y precipitadores electrostáticos.
- Sistemas avanzados para el tratamiento de SO<sub>2</sub>: Sistemas húmedos, semi-secos y secos.

A continuación se resumen las características de los sistemas de limpieza de gases mencionados.

#### **7.4.7.1. Sistemas convencionales para el tratamiento de partículas en los gases de combustión**

##### ○ Ciclones

Un ciclón es un colector de partículas cónico con una entrada tangencial superior donde penetra la corriente de aire a depurar. Debido a su diseño y mediante la fuerza centrífuga y gravitatoria, la fracción sólida es separada del gas. El gas “limpio” sale por la parte superior y las partículas por la parte inferior del ciclón. La eficiencia de separación de partículas varía en función de: **(a)** el diseño del ciclón, **(b)** las propiedades del gas, y **(c)** las características de las partículas que se deben separar (composición y distribución de tamaño de partícula).

Se disponen de diversos tipos de ciclones diferenciados según el tipo de entrada de gas, descarga de partículas, capacidad de tratamiento y eficiencia de separación [14] (Tabla VII.4.):

○ Sistemas Multiciclónicos

Los multiciclones o ciclones múltiples de tubo se basan en el uso del mismo principio mecánico de separación de partículas que el ciclón convencional. En general, la eficiencia varía del 65 al 95% debido a que los multiciclones, en relación a los ciclones, son más eficientes en la captación de partículas grandes, disminuyendo su eficiencia cuando más pequeñas son las partículas.

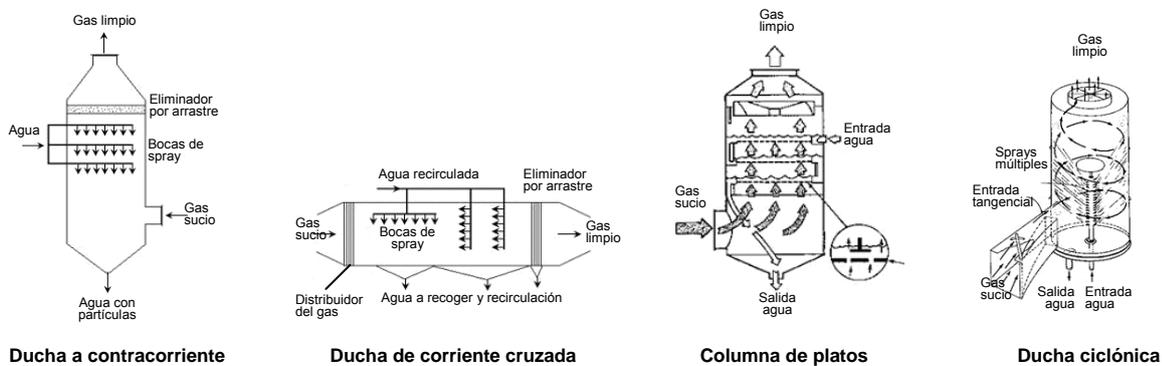
○ Filtros de mangas

Los filtros de mangas se utilizan para el control de partículas de combustibles sólidos y líquidos. Según su diseño y el tipo de tela de las mangas, la eficiencia de separación de las partículas puede alcanzar el 99% en tamaños de partículas  $<1 \mu\text{m}$ . No obstante, la experiencia en la operación de estos sistemas demuestra la existencia de un riesgo elevado de incendio en las mangas debido al endurecimiento de los filtros por el polvo de madera no quemado. Debido a este riesgo, el uso de los filtros de mangas en calderas pequeñas de biomasa no es recomendado.

**Tabla VII.4. Características de los ciclones**

Tipo	Diámetro de cono (cm)	Corriente de gas (m <sup>3</sup> /min)	Vel.de entrada aire (cm/s)	Eficiencia separación (%)	Aplicación
Convencional	122 - 366	283 - 5663	6 - 21	50 - 80	Manipulación del material. Pre-depurador del gas exhausto
Ciclón de alta eficiencia	> 90	28'3 - 566	15 - 21	80 - 95	Control en calderas industriales
Multiciclón	15 - 30	$\geq 8.495$	15 - 21	90 - 95	Control en calderas industriales
Ciclón irrigado (húmedo) de elevada eficiencia	>90	28'3 - 566	15	90 - 95	Aplicación en calderas para combustibles bajos en azufre. Temperatura del gas baja

Fuente: Adaptado de [14].



**Figura VII.7. Dispositivos de limpieza de gases por lavado (“Scrubbers”)**

- Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos (ESPs) son utilizados en numerosas experiencias de combustión (RSU, carbón, madera, etc.). Los ESPs generan campos magnéticos para la carga electrostática de las partículas del gas de combustión. Las partículas son atraídas por unas placas colectoras de carga opuesta, permitiendo su separación del gas contaminante.

Existen numerosos diseños de ESPs con eficiencias de separación superiores al 98% para partículas  $\leq 1 \mu\text{m}$ . Se diferencian dos tipologías de ESPs: secos y húmedos. Éstos son similares en operación, aunque en los húmedos se utiliza agua para limpiar la superficie del colector de las partículas retenidas. La inversión para los sistemas secos es menor a los húmedos y comportan menos problemas para la disposición de los residuos.

- Dispositivos de lavado de partículas (Scrubbers) y Venturi

Los dispositivos de lavado “Scrubbers” se basan en la aspersion de agua para el lavado del gas de combustión (Figura VII.7). La eficiencia de separación de partículas es superior a los multiciclones, sobretodo para tamaños  $\leq 1 \mu\text{m}$ .

En el lavador Venturi, el gas cargado con el material particulado pasa por un tubo corto con extremos anchos y una sección estrecha. Esta constricción hace que el flujo de gas se acelere cuando aumenta la presión. El gas recibe un rocío de agua antes o durante la constricción en el tubo. La diferencia de velocidad y presión que resulta de la constricción hace que las partículas y el agua se mezclen, se combinen y precipiten del gas. Los lavadores Venturi pueden alcanzar eficiencias en la eliminación de partículas pequeñas cercanas al 99%. Sin embargo, una desventaja de este dispositivo es la producción de aguas residuales.

- Separadores de diseño especial

Los sistemas de limpieza de construcción especial, como colectores mecánicos de partículas pueden reducir el nivel de emisión de 3-6 veces a los ciclones de elevada eficiencia [15]. Cada unidad contiene una entrada para la corriente de gas a ser tratada y dos salidas, una para el gas limpio y la otra que contiene una corriente de partículas. Algunos diseños mantienen una eficiencia de separación para partículas  $\geq 2,5 \mu\text{m}$  comparable a los precipitadores electrostáticos, pero la eficiencia

disminuye por debajo del 50% para partículas < 1µm.

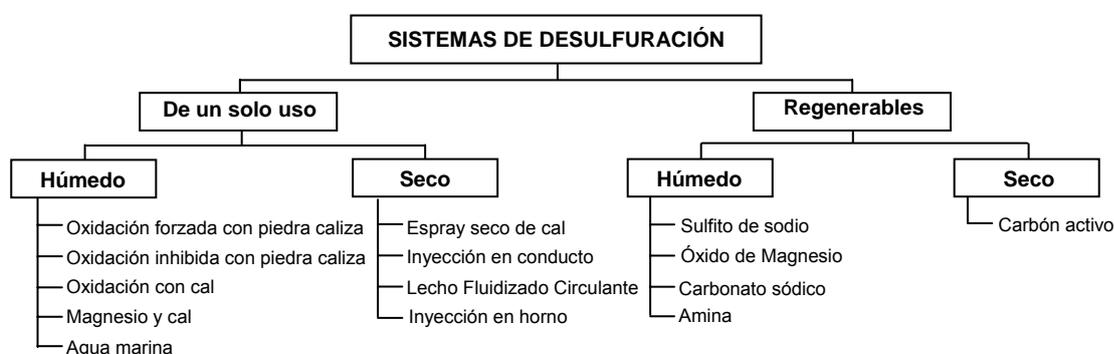
### 7.4.7.2. Sistemas avanzados para el tratamiento de gases de SO<sub>2</sub>

Los sistemas de desulfuración son utilizados en centrales térmicas con carbón para la eliminación de los óxidos de azufre contenidos en los gases generados en la combustión. En el proceso de desulfuración se usan reactivos alcalinos con base de calcio o sodio, y son inyectados al gas de salida en una torre de aspersion o directamente en el conducto transportador del gas. El SO<sub>2</sub> es absorbido, neutralizado y/o oxidado por el reactivo y convertido en un compuesto sólido (CaSO<sub>4</sub> o Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). El sólido es extraído del gas residual mediante sistemas de limpieza de partículas [16].

Los desulfuradores se clasifican en “de un solo uso” o “regenerables”, en función de cómo son manejados los sólidos generados [16,17] (Figura VII.8). En los sistemas de un solo uso, el sorbente agotado es desechado como residuo o valorado como subproducto. Los sistemas regenerables reciclan el sorbente en el sistema. Ambos tipos de sistemas pueden ser también clasificados en húmedos, semi-secos o secos [16].

o Sistemas húmedos

En un sistema de torre de limpieza húmeda, el gas de salida es conducido hacia la torre de aspersion, donde se inyecta un lodo acuoso del sorbente en el gas. El material sorbente típico es la piedra caliza o la cal. Una parte del agua en el lodo es evaporada y el gas es saturado con el vapor de agua.



**Figura VII.8. Clasificación de los sistemas de desulfuración de gases de combustión**

Fuente: Adaptado de [17].

La Oxidación Forzada con la Piedra Caliza (*Limestone Forced Oxidation, LSFO*) es un proceso basado en la depuración húmeda del gas con la adición de aire en el reactor que permite la reducción de incrustaciones de yeso (sulfato de calcio). Las eficiencias de depuración de SO<sub>2</sub> por el uso de piedra caliza alcanzan un 90%. El uso de cal permite eficiencias de eliminación más elevadas, hasta un 95% [16]. Aunque el uso de cal también conlleva inversiones más bajas para elevadas potencias, la mayoría de sistemas utilizan una mezcla de ambos reactivos debido al menor coste de la piedra caliza y mayor disponibilidad en relación a la cal [18-23].

- Sistemas semi-secos

Los sistemas semi-secos, o secadores de aspersion, inyectan un lodo acuoso del sorbente de modo similar al sistema húmedo. No obstante, el lodo contiene una mayor concentración de sorbente. El proceso forma un residuo seco que es eliminado mediante un dispositivo de control de materia particulada. Los reactivos utilizados pueden tener base de calcio o sodio. Las eficiencias de control de SO<sub>2</sub> en las torres de limpieza en seco son ligeramente más bajas que aquellas de los sistemas húmedos, entre el 80% y 90% debido a su baja reactividad y a la relación Líquido/Gas [16].

- Sistemas secos

Los sistemas de inyección de sorbente seco, inyectan neumáticamente el sorbente en polvo en la chimenea, el economizador o el conducto de circulación del gas de combustión. El producto de desecho es seco y es retirado usando filtros de partículas, previo enfriamiento del gas de salida.

Los sistemas de inyección en seco se instalan fácilmente y ocupan menos espacio que los sistemas húmedos y semi-secos. Para los sorbentes con base de calcio, las eficiencias de eliminación del SO<sub>2</sub> son más bajas, entre 50% y 60%. El uso de sodio como reactivo aumenta la eficiencia de eliminación de azufre hasta un 80% [16].

## 7.4.8. Control de las emisiones atmosféricas

### 7.4.8.1. Administraciones para el control atmosférico de las actividades industriales

En Cataluña, las actividades industriales con incidencia ambiental que se encuentran bajo el régimen de la Ley 3/98, del 27 de febrero de la Intervención Integral de la Administración Ambiental, deben efectuar controles ambientales integrales tal y como queda establecido en el Decreto 136/99, del 18 de mayo, por el que se aprueba el reglamento para el despliegue de la mencionada ley. El resto de actividades industriales que no se hayan adaptado a la Ley 3/98 y estén legalizadas, deben pasar los controles periódicos reglamentarios de acuerdo a su clasificación según el *Catálogo de Actividades Potencialmente Contaminantes de la Atmósfera (CAPCA)* hasta que no se adecuen al nuevo sistema.

Des del *Servicio de Vigilancia y Control del Aire* se opta por la aplicación de las normas UNE en los métodos de muestreo y análisis para cada contaminante que se debe controlar.

La *Xarxa d'Emissions Atmosfèriques de Catalunya (XEAC)* está formada por dos centros de control ubicados al *Servei Territorial de Tarragona* y en los servicios centrales de Barcelona. La Tabla VII.5 presenta un resumen de los focos emisores conectados a esta red y las señales recibidas.

### 7.4.8.2. La simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos

En la actualidad se disponen de diversas herramientas informáticas que permiten la simulación de la contaminación atmosférica a partir de uno o varios puntos emisores, y el cálculo de la concentración o nivel de inmición de uno varios contaminantes. Estos simuladores son considerados herramientas para la evaluación del impacto ambiental.

La Tabla VII.6 describe las características de algunos de los modelos de dispersión de contaminantes y simuladores utilizados en el control de emisiones atmosféricas [22,23].

El programa AERMOD View es una de las herramientas más avanzadas para el control de emisiones atmosféricas. La resolución de los datos sobre niveles de inmición de contaminantes permite la evaluación del impacto ambiental a escala local. No obstante, su diseño admite bases de datos con el formato utilizado en EUA.

**Tabla VII.5. Focos emisores y señales recibidas por XEAC**

	Empresas	Focos	Señales
Conectados	19	31	169
Previsión de conexión	24	24	125
Previsión de ampliación	4	18	81
Total	47	73	375

Fuente: DMAH, Generalitat de Catalunya, 2008.

**Tabla VII.6. Principales características de los simuladores de modelos de dispersión atmosférica.**

Nombre	Descripción	Limitaciones
AERMOD View Lakes Environmental Software Inc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calcula el nivel de inmisión de diversos contaminantes emitidos por una o varias fuentes contaminantes, considerando las características del terreno (físicas y topográficas).</li> <li>•Incorpora los programas AERMET y RAMNET para el pre-procesado de los datos meteorológicos.</li> <li>•Incluye el algoritmo PRIME (Plume Rise Model Enhancement) para la simulación del efecto del penacho en presencia de edificios cercanos.</li> <li>•Determinación de concentraciones promedio de largos períodos meteorológicos, o momentos puntuales.</li> <li>•Simulación de los datos obtenidos en tres dimensiones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Diseñado para el uso de bases de datos de formato norte-americano (EUA).</li> <li>•Requiere la conversión y adaptación de numerosos datos y archivos al formato requerido por el programa.</li> <li>•Requiere datos horarios para cualquier periodo simulado.</li> </ul>
CALPUFF View	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorpora tres módulos: Calmet (modelo de diagnóstico meteorológico en 3D), Calpuff (Modelo de dispersión) y Calpost (programa de compilación de datos del Calpuff).</li> <li>•Calpuff es un modelo Lagrangiano que trabaja con estados estables y no estables atmosféricos.</li> <li>•Modelo de dispersión transitorio, multicapas y multicomponente para la simulación de variaciones espacio-temporales de las condiciones meteorológicas sobre el transporte, difusión, reacciones químicas y deposición de contaminantes.</li> <li>•Información horaria de la variación espacial del viento y estabilidad.</li> <li>•Preciso en distancias no superiores a 300 km.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•No se obtiene precisión en los datos a corta distancia de la fuente emisora (&lt;200km).</li> <li>•No apto para estudios de impacto ambiental a escala local.</li> </ul>
ISC 3 (Industrial Sources Complex)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Modelo matemático basado en ecuaciones de dispersión Gaussiana</li> <li>•Simula emisiones de fuentes puntuales, de área y volumétricas.</li> <li>•ISCST: para periodos cortos predice valores de concentración y de deposición por cada receptor y hora. También calcula promedios para periodos seleccionados por el usuario.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Requiere de un año, mínimo, de información meteorológica.</li> <li>•El cálculo de concentraciones para receptores ubicados bajo la base de la chimenea no es fiable.</li> <li>•Los algoritmos de terreno complejo sólo son aplicables para fuentes puntuales y volumétricas.</li> <li>•No simula los efectos producidos por la división de líneas de flujo alrededor de obstáculos del terreno.</li> </ul>
COMPLEX I (Multiple Point Sources Rural Complex Terrain Screening Model)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Modificación del modelo MPTER, incorpora algoritmos para el manejo de terreno complejo.</li> <li>•Se aplica para fuentes puntuales rurales.</li> <li>•Determinación de concentraciones promedio horarias, diarias y anuales.</li> <li>•No requiere de un año completo de datos meteorológicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sólo estima concentraciones para SO<sub>2</sub> y materia particulada (MP).</li> <li>•Aplicable sólo para zonas rurales, fuentes puntuales y receptores situados debajo de la chimenea.</li> <li>•No genera tablas de salida que permitan graficar y/o procesar posteriormente la información.</li> <li>•No indica el número de veces que se sobrepasa la norma de calidad del aire.</li> </ul>
CTDMPLUS (Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Diseñado específicamente para terreno complejo</li> <li>•Estima promedios de concentraciones horarias en receptores asociados a cerros aislados y/o terreno plano.</li> <li>•Especialmente recomendado para SO<sub>2</sub> y MP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•No simula períodos de calma meteorológica.</li> <li>•Las concentraciones son simuladas para receptores ubicados en una cima o cercano a ella.</li> <li>•Para situaciones donde una cima no se puede aislar de una estructura de terreno muy compleja, el modelo pierde fiabilidad.</li> </ul>

## 7.5. Principios y aplicaciones de la gasificación y la pirólisis

A diferencia de la combustión, la gasificación y la pirólisis son técnicas que aun se encuentran en fase de desarrollo y en estado comercial en escasas experiencias a nivel internacional.

### 7.5.1. La gasificación

La **gasificación** es un proceso de conversión térmica donde el combustible sólido es transformado parcialmente a un gas mediante un proceso de oxidación parcial. El gas generado, de composición variable, puede ser obtenido por dos métodos: gasificación bioquímica (producción de biogás) y gasificación termoquímica.

La gasificación termoquímica produce un cambio de la estructura química de la materia orgánica mediante diversas reacciones heterogéneas a altas temperaturas [24]. Del proceso de gasificación se obtiene: gas combustible, una fracción líquida (alquitrán y aceites) y alquitranes (carbón casi puro con material inerte del combustible). El gas obtenido se compone de: N<sub>2</sub> (40-50%), H<sub>2</sub> (15-20%), CO (10-15%), CO<sub>2</sub> (10-15%), CH<sub>4</sub> (3-5%), partículas de alquitrán, cenizas y metales alcalinos (en la gasificación de madera con aire).

La calidad y composición del gas producido en la gasificación termoquímica depende del agente gasificador y del lecho de gasificación utilizado (Tabla VI.7). Los tipos de lecho utilizados en la gasificación son los siguientes [25,26]:

- Gasificación con lecho móvil o fluidizado. Se disponen de lechos burbujeantes (LB) y circulantes (LC). Ambos consiguen temperaturas entre 700-900°C. El LB consigue la destrucción de las partículas de alquitrán (gas de salida: 2-5 g alquitrán/m<sup>3</sup>N). El LC separa las partículas de inertes y el alquitrán en el ciclón, retornándolas al lecho.

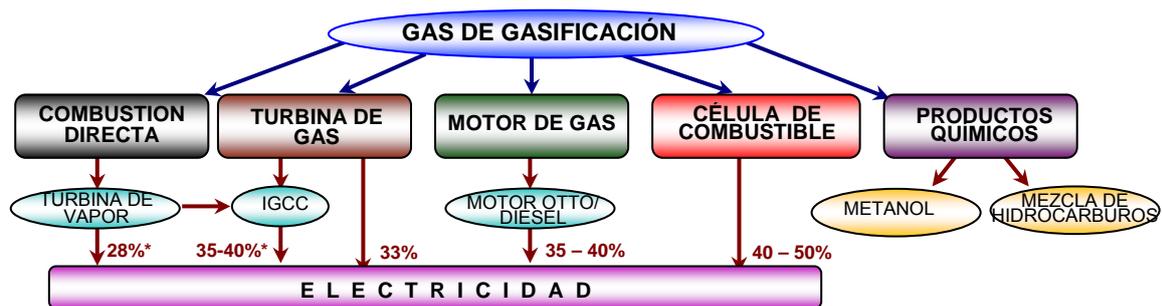
**Tabla VII.7. Agentes de gasificación**

Proceso	Agente de Gasificación	Poder Calorífico del gas (MJ/m <sup>3</sup> N)
Gasificación directa	Aire	4 – 7
Gasificación con oxígeno puro	Oxígeno	10 – 12
Gasificación indirecta	Vapor	15 – 20

Fuente: Adaptado de [27].

- Gasificación con de lecho fijo. Se disponen de cuatro tipos de reactores: (a) de flujo ascendiente (“updraft”), (b) de flujo descendiente (“downdraft”), (c) de flujo transversal (“crossdraft”) y (d) de núcleo abierto (“open core”). En todos ellos se dan las siguientes etapas en diferentes áreas del reactor: secado, pirólisis, oxidación y reducción del gas.
- Gasificación indirecta. Son gasificadores que aportan energía a partir de la combustión de parte de sus productos; en este caso, parte del gas generado o del alquitrán.

En la mayoría de gasificadores, la eliminación de partículas grandes (>10µm) se produce mediante dispositivos convencionales para el control de partículas (ciclones, filtros de mangas, filtros metálicos), que son recirculadas al gasificador. Para evitar obturaciones en los equipos filtradores es necesario operar a temperaturas superiores de 500 °C. La Figura VI.9 muestra las aplicaciones del gas obtenido en la gasificación de la biomasa.



**Figura VII.9. Aplicaciones principales del gas obtenido en la gasificación de la biomasa**

\*Eficiencias de conversión eléctricas aproximadas para ciclos de generación combinada con generación de energía térmica. La eficiencia global (energía eléctrica - calorífica) aumenta hasta un 80 – 90%.

### 7.5.2. La pirólisis

La **pirólisis** se define como al proceso térmico de descomposición de la biomasa basado en la gasificación indirecta con gases inertes como agentes de gasificación [28]. La pirólisis es el primer paso de la gasificación de la biomasa. Cuando la temperatura en el reactor alcanza 200 - 250 °C, la pirólisis se inicia con el desprendimiento de los compuestos volátiles más simples (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.). Algunos hidrocarburos de molécula larga condensan a temperatura ambiente en forma de “aceite de pirólisis” o alquitrán. Durante el proceso de pirólisis secundaria, las moléculas largas de hidrocarburos se rompen en moléculas más pequeñas y volátiles. La pirólisis es una reacción rápida y muy compleja respecto al control del centenar de productos que se pueden obtener.

Los factores que contribuyen a la variación de la composición de los productos obtenidos y de las fracciones gas, líquido y sólido son: **(a)** la velocidad de calentamiento del reactor, **(b)** la presión, y **(c)** el tiempo de residencia de los gases.

Actualmente la mayoría de experiencias se realizan a escala de laboratorio y en plantas piloto para la identificación de la cinética y de los componentes desprendidos a lo largo de la pirólisis. Mediante técnicas de espectrometría de masas y cromatografía de gases actualmente se identifican el 47% de los componentes volátiles desprendidos [29]. El residuo sólido o “charcoal” es apto para su uso como “blend” en incineradoras o centrales de producción térmica y/o eléctrica.

En el proceso de pirólisis rápida, las pequeñas partículas de biomasa son rápidamente calentadas hasta 500-600°C a presión atmosférica, obteniendo los siguientes rendimientos de separación aproximados: 70% aceite de pirólisis, 15% gases y 15% sólido [30].

Existen varios tipos de reactores aptos para la pirólisis rápida: lecho fluidizado denso, lecho circulante, de transportador neumático, cono rotatorio y tambor rotatorio de vacío [31]. Sólo unas cuantas empresas y universidades se plantean o realizan la pirólisis rápida por primera vez en plantas de demostración [32]. Las principales aplicaciones de los productos obtenidos de la pirólisis rápida son: la producción de energía y de productos químicos (biocombustibles líquidos, metanol, etanol, hidrógeno y otros) [33].

## 7.6. Tecnologías para la producción de biocombustibles

La tecnología para la producción de biocombustibles ha sido mejorada a lo largo de los años. Los biocombustibles que actualmente son producidos son: bioetanol, metanol, biogás, biodiesel, hidrógeno y “Biomass to Liquid” (BtL).

Las principales redes europeas sobre biocombustibles son: *European Biodiesel Board* (EBB), *European Bioethanol Fuel Association* (eBIO), *European Union of Ethanol Producers* (UEPA). Estas redes engloban a los mayores productores de biodiesel o bioetanol, instituciones, asociaciones y empresas europeas que dan apoyo a la producción y consumo de los biocombustibles. A continuación se describirán las características básicas de las tecnologías para la obtención de los biocombustibles anteriormente mencionados.

### 7.6.1. Producción de bioetanol

El bioetanol se obtiene a partir de la fermentación de los azúcares contenidos en las siguientes materias primas:

- **Materias ricas en sacarosa:** caña de azúcar.
- **Materias ricas en almidón:** cereales (maíz, trigo, cebada) y tubérculos (patata, yuca).
- **Materias ricas en celulosa:** madera, residuos agrícolas o residuos municipales de naturaleza lignocelulósica.

La fermentación del azúcar contenido en la materia lignocelulósica es posible cuando primeramente se realiza una hidrólisis ácida de la materia [34]. (Figura VII.10). A diferencia del “bioetanol de 1ª generación”, el etanol de celulosa o “bioetanol de 2ª generación” se basa en el aprovechamiento de la materia celulósica procedente de residuos agrícolas (ej.: paja, caña del maíz), otros materiales lignocelulósicos (ej: astillas de madera) o cultivos energéticos (ej: Miscanthus, switchgrass, etc.) como materias primas, obteniendo rendimientos energéticos elevados [35,36]. A partir de 1 tonelada de paja de cereal se producen: 310 l de etanol, 70 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, 20 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> y 230 kg de combustible sólido [37,38].

El conflicto del uso de la biomasa para fines alimenticios y para la producción de biocombustibles sería resultado mediante el avance de esta tecnología.

### 7.6.2. Producción de metanol

El metanol obtenido a partir de la biomasa se basa en la síntesis química a partir del gas (*syngas*) producido en la gasificación de la biomasa (Figura VII.11). El gas de síntesis debe tener un ratio de H<sub>2</sub>/(2CO + 3CO<sub>2</sub>) cercana a 1,05, con un contenido de CO<sub>2</sub> aproximado del 3%. El mantenimiento de la proporción H<sub>2</sub>/CO se da a cabo mediante las técnicas de separación del CO<sub>2</sub> y/o adición de H<sub>2</sub> [33].

### 7.6.3. Producción de biogás

El biogás se produce a partir de la gasificación bioquímica de materia orgánica presente en vertederos, plantas de compostaje y plantas industriales con tratamiento de efluentes orgánicos

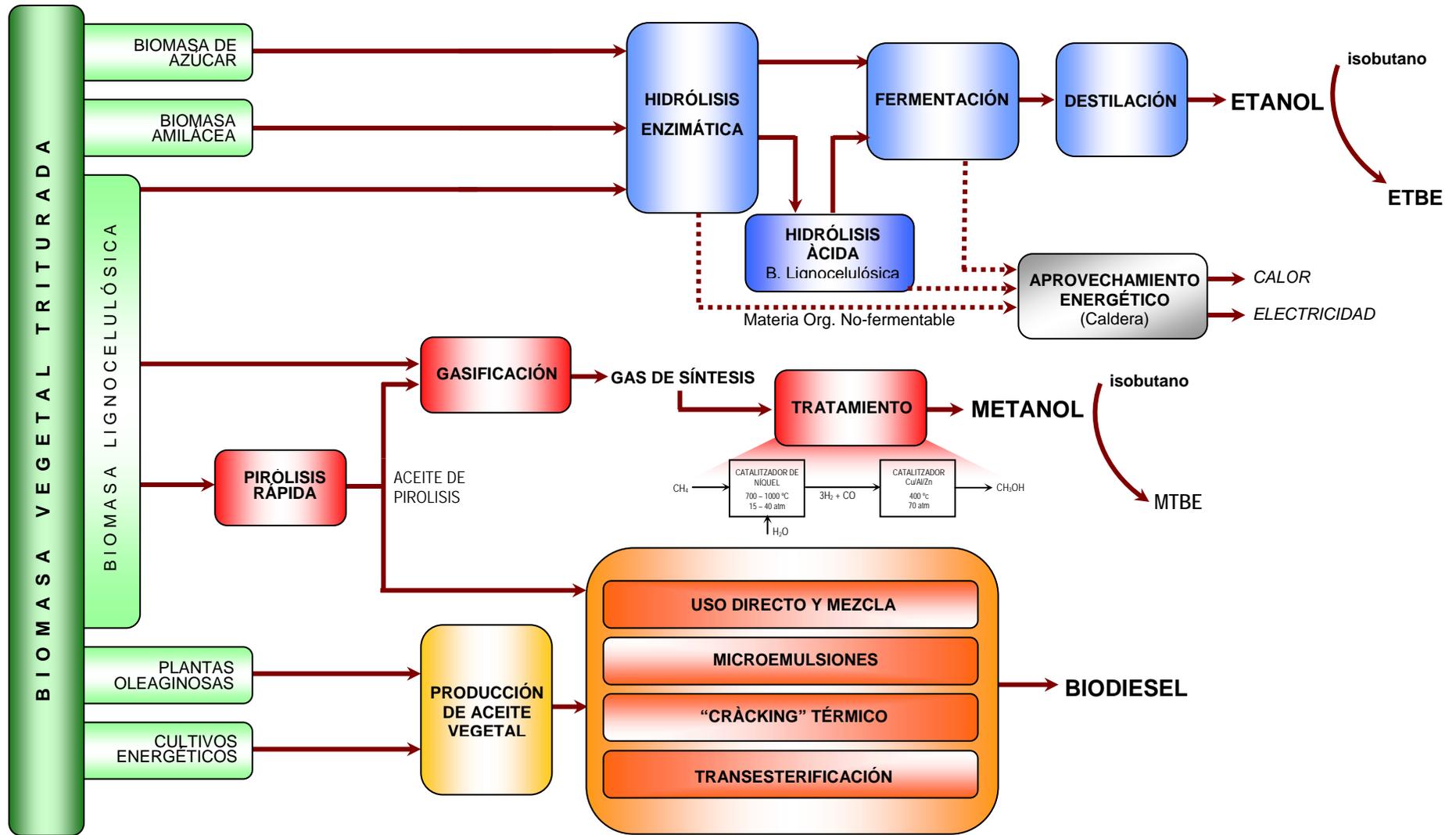


Figura VII.10. Producción de biocombustibles de primera generación a partir de biomasa vegetal: bioetanol, metanol y biodiesel.

Fuente: Elaboración propia

(empresas agroalimentarias, lodos de depuradora, etc.). La gasificación bioquímica es la resultante de la fermentación anaeróbica u oxidación parcial de la materia orgánica biodegradable, producida por determinados microorganismos bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Cuando el biogás se genera en grandes cantidades, suele ser quemado para generar energía térmica y/o eléctrica. El biogás se compone de las siguientes fracciones en volumen: CH<sub>4</sub> (50-80%), CO<sub>2</sub> (20-45%) y H<sub>2</sub> (<2%). PCI total = 20 MJ/m<sup>3</sup>N.

#### 7.6.4. Producción de biodiesel

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) el biodiesel se define como al éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables (aceites vegetales o grasas animales) apto como combustible en motores Diesel [39-41]. Las materias primas utilizadas para la producción del biodiesel son:

- **Plantas oleaginosas convencionales:** Colza, girasol y soja.
- **Cultivos energéticos alternativos.** Especies productoras de semillas oleaginosas no convencionales: el cardo (*Cynara Cardunculus*), la colza etíope (*Brassica carinata*) y la camelina (*Camelina sativa*), entre otras.
- **Aceites usados y grasas animales** [42,43].

El método comercialmente utilizado para la producción de biodiesel es la transesterificación de aceites y de grasas animales (Figura VII.11). La reacción de transesterificación se efectúa mediante la reacción de un aceite o grasa con un alcohol en presencia de un catalizador. El medio físico de reacción requiere una determinada temperatura, tiempo de reacción, cantidad de ácidos grasos libres y contenido de agua de los aceites o grasas [44].

#### 7.6.5. Producción de otros biocombustibles líquidos

El término BtL (*Biomass to Liquid*) se aplica a los combustibles líquidos procedentes de la conversión termo-química de la biomasa, basado en un proceso de gasificación en tres etapas (Choren Carbo-V® Process).

El proceso Fisher-Tropsch (FT) es utilizado en la fabricación del combustible líquido a partir de biomasa, llamado SunDiesel ®. El proceso FT se basa en una reacción catalítica (con hierro y cobalto) donde el CO y el H<sub>2</sub> convertidos a hidrocarburos líquidos en varias formas. Inicialmente desarrollado a partir del carbón y del gas natural como materias primas, la aplicación comercial del proceso FT a la biomasa es limitada debido a las elevadas inversiones y el coste de la materia primera [45].

Es posible producir biodiesel a partir de glicerina. El biocombustible IUCT-S50 ha sido sintetizado recientemente en España tras 7 años de investigación. Éste biocombustible parte de la catálisis completa de la glicerina, actual subproducto de la transesterificación en la fabricación del biodiesel [43].

## 7.7. Conclusiones

Las conclusiones más importantes que se obtienen del presente capítulo son:

- El astillado es la tecnología para la transformación física de la biomasa más económica y extendida en experiencias sobre aprovechamiento energético de la biomasa.
- El elevado consumo de energía del peletizado y del briquetado encarece la aplicabilidad de estos procesos para el suministro de biomasa en medias y grandes plantas de producción de energía.
- La combustión es el proceso térmico más desarrollado y empleado en la valorización directa de la biomasa. El coste de su tecnología en relación a la gasificación y pirólisis, hacen de la combustión el proceso actualmente más competitivo en la valorización de la biomasa como combustible.
- El uso y combinación de los sistemas de tratamientos de gases garantizan la eliminación de casi la totalidad de los contaminantes atmosféricos generados en la combustión, alcanzando niveles de emisión atmosférica inferiores a los legislados.
- El uso de herramientas para el control de las emisiones (dispositivos analíticos en los focos emisores) y para la simulación de los contaminantes atmosféricos (simuladores de la dispersión atmosférica a escala local y regional, ej.: programa AERMOD) garantizan el control del impacto ambiental generado por las emisiones restantes de la limpieza de gases de la combustión.
- La gasificación y la pirólisis de la biomasa, en fase de demostración, se caracterizan por tener numerosas aplicaciones industriales según la cantidad de productos obtenibles en sus procesos.
- Las tecnologías para la producción de biocombustibles de 2ª generación se caracterizan por: **(a)** los elevados rendimientos de transformación obtenidos con a escala piloto e industrial y **(b)** el uso de materias primas no destinadas a la alimentación humana.

## 7.8. Referencias

- [1] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2008). Green Chemistry. [En línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/greenchemistry/> (Consulta: Junio 2008).
- [2] LCI Karl Pellet Mill (2008). [En línea] Disponible en: [http://www.lcicorp.com/Granulation/pellet\\_mill.html](http://www.lcicorp.com/Granulation/pellet_mill.html) (Consulta: Julio 2008)
- [3] Crivilé, R.; Cantero, C. (2001) Pla de biomassa a Catalunya en l'àmbit agrícola. Convenio de colaboración entre la Universidad de Lleida y el Institut Català de l'Energia. Generalitat de Catalunya, Departament d'Indústria, Comerç i Turisme, 2001.
- [4] Marcos, F (2001). Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid.
- [5] CIEMAT (2001). Tecnologías energéticas e impacto ambiental. Ed. Mc Graw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. Madrid.
- [6] LCI Karl Pellet Mill. [En línea] Disponible en: [http://www.lcicorp.com/Granulation/pellet\\_mill.html](http://www.lcicorp.com/Granulation/pellet_mill.html) (Consulta: Julio 2008)
- [7] Ortiz, M. (1995). La briqueta: Energía del Residuo Industria. Ingeniería Química. Vol. 27 (312) pp. 147-153.
- [8] Crivilé, R; Cantero, C. (2001). Estudi i Pla d'actuació en els camps de l'aprofitament energètic de la biomassa en el sector Agrícola i Ramader a Catalunya: Cultius Herbacis Energètics i Residus de Cultius Herbacis. Conveni de col·laboració entre la Universitat de Lleida i l'Institut Català de l'Energia. Barcelona.
- [9] European Commission (1998). Biomass conversion technologies, achievement and prospects for heat and power generation. European Commission Directorate-General Science, Research and Development. 1998. Bruselas.
- [10] U.S. Department of Energy – Office of Industrial Technologies (2005). Energy Efficiency and Renewable Energy. [En línea] Disponible en: <http://www.oit.doe.gov/> (Consulta: Octubre 2007).
- [11] British Biogen Corporation (2002), Heating with wood Chips. [En línea] Disponible en: <http://www.britishbiogen.co.uk/bioenergy/heating/heatwchip.htm> (Consulta: Abril 2006).
- [12] Bhattacharya S.C. (1998), State of the Art of Biomass Combustion. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. Vol. 20 (2), pp. 113-115.
- [13] Richarson J. et al. (2002), Bioenergy from Sustainable Forestry. Guiding Principles and Practice. Forestry Sciences, Vol. 71. Kluwer Academic Pub. Dordrecht.
- [14] U.S. Departments of the Army and the air force (1998). Air pollution control systems for boilers and incinerators. ARMY TM 5-815-1, AIR FORCE AFR 19-6.
- [15] LSR's Core Separator System, LSR Technologies, Inc. (1996). [En línea] Disponible en: <http://www.pollutiononline.com/> (Consulta: Abril 2005).
- [16] US Environmental Protection Agency (2008). Hoja de Datos-Tecnología de Control de la Contaminación del Aire. EPA-452/F-03-065. [En línea] Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn> (Consulta: Setiembre 2008)
- [17] Srivastava R.K. (2000), Controlling SO<sub>2</sub> emissions: a review of technologies. US EPA/600/R-00/093. [En línea] Disponible en: <http://www.epa.gov> (Consulta: Marzo 2008).

- [18] Goddard, P. Flue Gas Desulphurisation (FGD), a brief review of technology, legislation and economics. *Energy Focus*, Issue 2. pp. 99.
- [19] EIA, 2002. EIA-767 Database; Annual Steam-Electric Plant Operation and Design Data, 2001. Energy Information Administration, Department of Energy. [En línea]. Disponible en: <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/page/eia767.html> (Consulta: Junio 2008)
- [20] Srivastava, R.K. y Josewicz, W. (2001) Flue Gas Desulfurization: The State of the Art. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 5, pp. 11676-1688.
- [21] Nolan, P.S. (2000) Flue Gas Desulfurization Technologies for Coal-Fired Power Plants. *Coal-Tech 2000 International Conference*. 13-14 Noviembre. Jakarta (Indonesia).
- [22] Barraza, N. (1998). Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos: Comparación de desempeños en zonas de ventanas, V Región. (Presentación) Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago de Chile.
- [23] Serra M, et al. (2008) Estudio de la evolución de los niveles de inmisión de los contaminantes PST, HCl y NO<sub>2</sub> emitidos por la incineradora de Campdorà (Girona). *Revista Residuos* (En revisión).
- [24] LI S. (2005). Gas producer. Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences. (China)
- [25] Bibeau E. (2003), Biomass electrical conversion technologies. *Green Power in Canada – Technology Development and Resource Opportunities*, Pollution Probe. (Presentación) Montreal (Canadá).
- [26] GasNet Group (2005). Gasification Systems. European Biomass Gasification Network. [En línea]. Disponible en: <http://www.gasnet.uk.net/> (Consulta: Febrero 2005).
- [27] IDAE (1996). Energía de la biomasa. Manuales de energías renovables. Biblioteca Cinco Días. Núm. 3. Madrid.
- [28] Belgiorno, V. et al (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, Vol. 23, pp.. 1-15.
- [29] Fullana, A. et al. (2005). Multidimensional GC/MC analysis of solid wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 74, pp 315-326.
- [30] Gerdes C. (2001), Pyrolyse von Biomasse-Abfall: Thermochemische Konversion mit dem Hamburger-Wirbelschichtverfahren, Dissertation. Universidad de Hamburg, Hamburg.
- [31] Wagenaar, B.M.; Venderbosh, R.H. y Prins, W. (2002). Bio-oil as a coal substitute in 600 MWe power stations. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, Amsterdam, Junio 2002.
- [32] Brigwater, A.V. y Peacocke, G.V.C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4 pp. 1-73.
- [33] Van Swaaij, W.P.M.; Kersten, S.R.A. y Van den Aarsen, F.G. (2004). Routes for methanol from biomass, *International 2-Day Business Conference on Sustainable Industrial Developments*. Delfzijl (The Netherlands) Abril 2004.
- [34] BC International Corporation (2005). Developing economic and sustainable fuels and chemicals. [En línea] Disponible en: <http://www.bcintlcorp.com/technology.htm> (Consulta: Abril 2006).
- [35] Abengoa Bioenergy (2008). BCyL biomass plant. [En línea] Disponible en: <http://www.abengoabioenergy.com/> (Consulta: Julio 2008).

- [36] Royal Danish Ministry of Foreign Affairs (2007). Leading in Bioethanol technologies. [En línea] Disponible en: <http://www.netpublikationer.dk/> (Consulta: Julio 2008).
- [37] BioGasol - Danish Technology Company (2008). [En línea]. Disponible en: <http://www.biogasol.com> (Consulta: Julio 2008)
- [38] Biogasol (2007). Biogasol – Biofuels for the future. California-Denmark Workshop on Clean Technology. Enero 2007. San Francisco (California).
- [39] Oro Verde S.A. (2002) Biodiesel, una alternativa viable. [En línea]. Disponible en: <http://www.overde.com.ar/> (Consulta: Junio 2006).
- [40] Carraretto C., et al (2004). Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations. Energy. Vol. 29, (12-15), pp. 2195-2211.
- [41] Massachusetts Institute of Technology (2008). Units & Conversion Fact Sheet. [En línea]. Disponible en: [http://web.mit.edu/mit\\_energy](http://web.mit.edu/mit_energy) (Consulta: Julio 2008).
- [42] Ballesteros, I. (2003). Biomasa y biocombustibles. Seminario Desarrollo Rural y Energías Renovables, Biomasa y Biocombustibles. 24-25 Abril 2003. Toledo (España)
- [43] Institut Universitari de Ciència i Tecnologia, S.A. (2007). El primer biocarburante de Segunda Generación Español (Nota de Prensa). [En línea] Disponible en: <http://www.iuct.com/> (Consulta: Julio 2008)
- [44] Fangrui Ma y Milford A. Hanna (1990). Biodiesel production: a review. Bioresource Technology, Vol. 70, pp. 1-15.
- [45] Biofuels Technology Platform (2006). European Biofuels Technology Platform. [En línea] Disponible en: <http://www.biofuelstp.eu> (Consulta: Julio 2008)



Capítulo 8.

**Análisis de viabilidad del sistema de  
bioenergía a partir de los cultivos  
energéticos de colza etíope y chopo**

---



## 8. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DEL SISTEMA DE BIOENERGÍA A PARTIR DE LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS DE COLZA ETÍOPE Y CHOPO

### 8.1. Introducción y objetivos

Los primeros resultados obtenidos al inicio del proyecto Agrosost [1] demostraron la falta de rentabilidad de los sistemas de generación eléctrica con los cultivos energéticos seleccionados debido a: **(a)** la insuficiencia en las tarifas eléctricas pagadas por la electricidad producida a partir de combustibles de biomasa, y **(b)** los elevados costes de la biomasa, consecuentes de las operaciones agrícolas y de las bajas productividades obtenidas en la cosecha de los cultivos energéticos.

Como conclusión de estos primeros estudios se concretó que la generación eléctrica a partir de los cultivos energéticos estudiados era viable en plantas de mediana y elevada potencia, debido a los importantes ingresos obtenidos por la venta de la electricidad generada. Para rentabilizar los sistemas de menor potencia, se requerían incentivos económicos para disminución de los costes de inversión y del cultivo, y la generación adicional de calor para aumentar la eficiencia de conversión energética de los sistemas [2].

En cuanto a los costes del cultivo, se determinó que los factores que afectan a la adaptación y productividad de colza e. y chopo en España, y a su consecuente rentabilidad económica para la producción de energía son: **(a)** el tipo de variante de especie vegetal incorporada en el cultivo, **(b)** la adecuación de la maquinaria agrícola tradicional para su cosecha.

La aprobación del Real Decreto 661/2007 [3] a lo largo de los años de realización del proyecto Agrosost permitió un cambio en la magnitud de la generación de energía producida a partir de la biomasa. Las nuevas tarifas eléctricas permiten un incremento significativo de los beneficios obtenidos en las plantas eléctricas con biomasa de mediana y elevada potencia, así como la viabilidad de nuevas plantas de menor potencia, no rentables antes de la aprobación de la mencionada ley.

El presente Capítulo 8 tiene como objetivo principal el estudio de la viabilidad económica de la generación de electricidad a partir del uso de colza e. y chopo como combustibles, considerando las

tarifas eléctricas vigentes antes y después de la aprobación del Real Decreto 661/2007. La resolución de este objetivo se ha efectuado mediante tres grandes apartados. Los objetivos de cada apartado son descritos a continuación:

- (a) Análisis del coste final de la biomasa (colza e. y chopo) dispuesta en una planta de generación eléctrica. Para el cálculo se ha considerado las siguientes etapas incluidas en el sistema de bioenergía: el cultivo, la carga, el transporte y la descarga de la biomasa en la planta de valorización energética final.
- (b) Análisis de viabilidad económica de la generación eléctrica a partir de los cultivos energéticos seleccionados, considerando las tarifas eléctricas vigentes antes de la aprobación del Real Decreto 661/2007, y asignadas en el Real Decreto 1432/2002 [4] y Real Decreto 809/2006 [5].
- (c) Análisis de viabilidad económica de la generación eléctrica considerando las tarifas eléctricas aprobadas en el Real Decreto 661/2007.

## 8.2. El sistema de Bioenergía

Para efectuar el análisis de viabilidad de la generación eléctrica con colza e. y de chopo como combustibles, se ha definido un sistema de bioenergía (ver Figura VIII.1) compuesto de diversos subsistemas o etapas: (Subsistema 1) Cultivo y cosecha, (Subsistema 2) Transporte, y (Subsistema 3) Producción de energía.

En el sistema de bioenergía de **colza e.**, la etapa de cultivo (Subsist. 1) cubre un periodo de 1 año, del cual durante 4 meses se realizan las operaciones agrícolas. En la cosecha, la biomasa de colza e. es empacada y dispuesta en el campo en forma de montículos por tal de reducir su contenido en humedad mediante secado natural ( $\leq 20\%$  de humedad).

Una vez la biomasa ha perdido su humedad, ésta es transportada a la planta de generación eléctrica en función del requerimiento de combustible de biomasa para obtener un funcionamiento continuo de la planta (Subsist. 2). El suministro de la biomasa de colza e. se compone de tres etapas: carga de pacas en el remolque del camión, transporte y descarga en la planta final. La carga de pacas se realiza con los mismos tractores agrícolas que operan en el cultivo, modificados tecnológicamente por la adición de un frontal elevador-cargador.

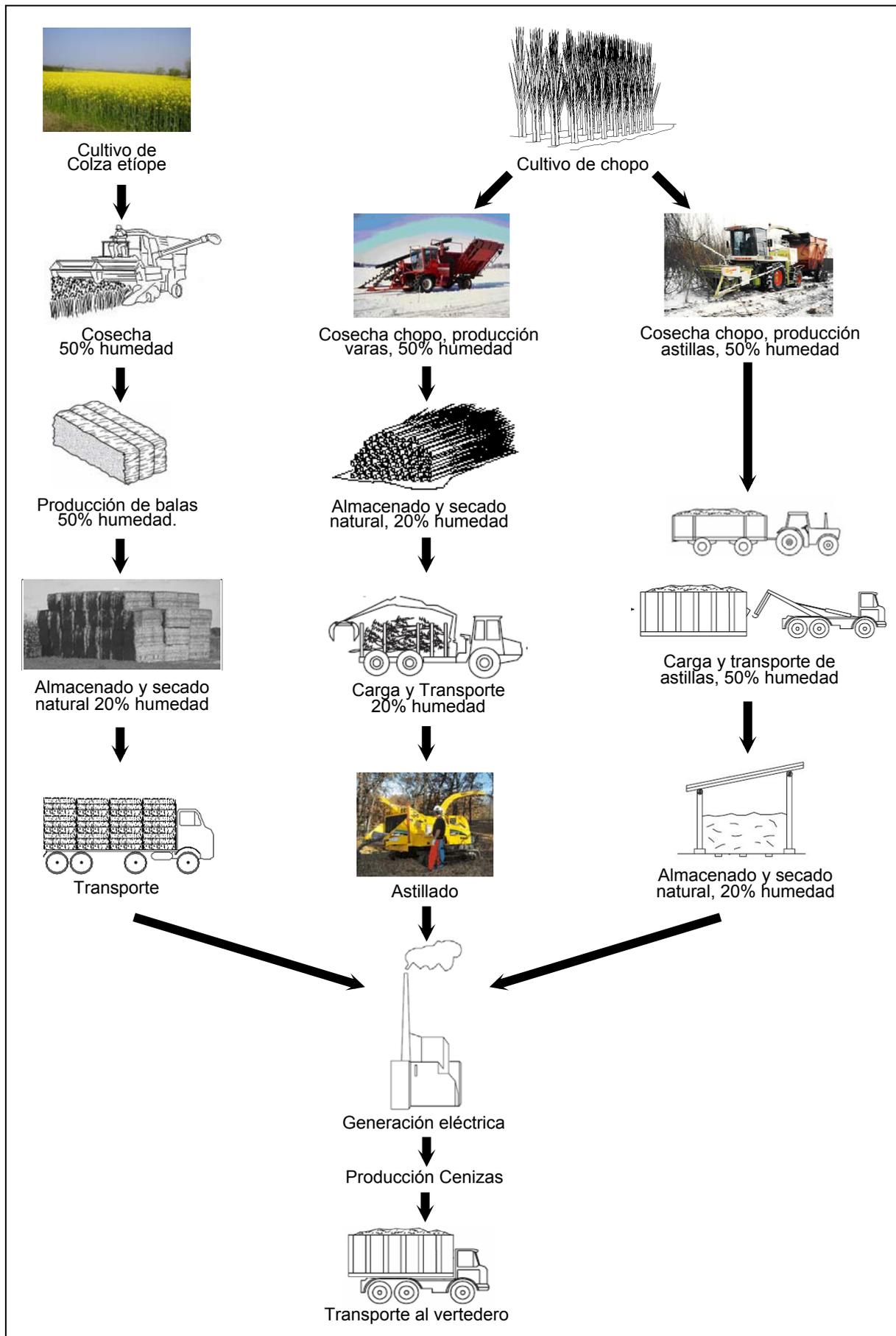
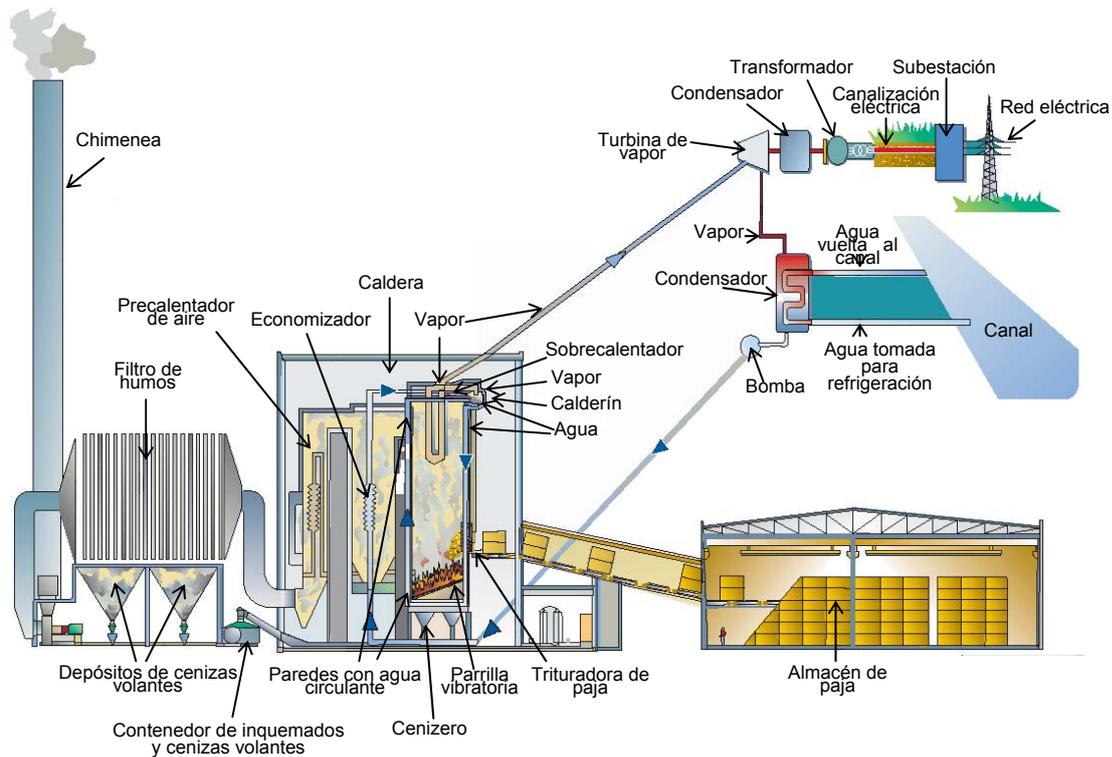


Figura VIII.1. Esquema del sistema de bioenergía



**Figura VIII.2. Planta de generación eléctrica con biomasa de Sangüesa (25 MW).**

Fuente: Adaptado de [6].

El transporte de las pacas se realiza con camiones de 16 Mg de carga útil. La frecuencia del transporte dependerá de la necesidad periódica de combustible de biomasa de la planta eléctrica que se debe suministrar.

Finalmente la descarga de las balas se produce mediante la acción de carretillas elevadoras eléctricas o toros industriales en la propia planta de generación eléctrica (Subsist. 3).

En la planta, la biomasa es almacenada en un recinto cerrado o en un área exterior cubierta. La biomasa es transferida hacia la caldera de combustión mediante mecanismos de transporte automáticos (cinta transportadora o sinfín transportador) en función del requerimiento de combustible de ésta. Los gases de combustión generados en el horno son conducidos al sistema de limpieza de gases, más simple o complejo dependiendo de la magnitud de la planta eléctrica y del volumen de gas a tratar. Los sistemas comúnmente utilizados son: multiciclón, filtro de mangas, precipitador electrostático y sistema de desulfuración de gases (éste último, si se requiere). Los componentes que forman parte de las plantas eléctricas incluidas en el análisis son mostrados en la Figura VIII.2.

Como residuo de la combustión de la biomasa se producen cenizas. En el estudio se ha considerado el transporte y la disposición al vertedero de este residuo como parte del Subsist. 3. La

disposición de las cenizas como fertilizantes en la zona de cultivo es una alternativa evaluable que contribuye a la reducción del uso de fertilizantes químicos en la cosecha. Esta sustitución repercute en el coste total de la producción del cultivo y en el impacto ambiental asociado. No se ha evaluado esta alternativa debido a la falta de información detallada sobre la composición físico-química de las cenizas.

En el sistema de bioenergía de **chopo**, la etapa de cultivo (Subsist. 1) considera tres ciclos de rotación del cultivo a lo largo de 16 años, siendo 5 años el período de crecimiento del chopo en cada ciclo. Al final de cada ciclo la biomasa es cosechada durante los meses de otoño e invierno, período en que los árboles mantienen estado de letargo y no contienen hojas. En estas condiciones el desgaste de las cuchillas de la maquinaria cosechadora es menor. Se ha asumido que la biomasa de chopo tiene un contenido inicial de humedad del 50% cuando es cosechada. Se han evaluado los siguientes métodos de cosecha: la producción de astillas y la producción de haces de varas de alta densidad. En la producción de astillas en la cosecha (150 días/año), la biomasa es triturada y cargada en el remolque directamente para efectuar su transporte (subsistema 2). Las astillas son transportadas a la planta de generación eléctrica donde serán almacenadas y secadas en condiciones controladas (mediante sensores de temperatura y humedad)

Por otro lado, en la producción de haces de varas en la cosecha, la biomasa es dispuesta en el campo en forma de montículos para reducir su contenido de humedad a través de secado natural ( $\leq 20\%$  de humedad). Posteriormente, los haces son transportados a la planta de generación eléctrica en función de la necesidad de suministro del combustible de biomasa (Subsist. 2).

La carga de los haces de chopo al camión se produce mediante la acción de una grúa con pinza instalada en la parte posterior del remolque, y descargados en planta mediante toros cargadores eléctricos o por simple vuelque de la carga. El tiempo de carga y descarga es variable en función de la habilidad del operario-conductor en el manejo de la grúa de carga.

Para ambas formas de chopo, el transporte desde el campo hasta la planta de generación eléctrica se realiza mediante camiones de 16 Mg de carga útil, aplicando los límites de carga y volumen autorizados.

En la generación eléctrica con chopo, se han asumido los mismos componentes tecnológicos que caracterizan las plantas de generación eléctrica con colza e. (Figura VIII.2). Sin embargo se

incorporan diferencias concretas en la configuración de las plantas: Las astillas de biomasa necesitan un sistema de almacenado más grande y complejo que en el caso de las balas de colza e., por tal de controlar la humedad del combustible de biomasa de chopo antes de ser consumida por la caldera de combustión. En el caso de los haces de chopo, se requiere de un triturador-astilladora de grandes dimensiones para adaptar la forma del combustible de biomasa a astillas y permitir el correcto funcionamiento del mecanismo de transporte automático de biomasa (transportador sinfín) hasta la caldera.

Se ha asumido como parte del Subsist. 3 el transporte de las cenizas generadas por la combustión de biomasa y su disposición al vertedero, debido a las mismas razones atribuidas a la colza e.

### 8.3. Escenarios evaluados

#### 8.3.1. Escenarios evaluados anteriores a la aprobación de las nuevas tarifas eléctricas

Debido al valor relativamente bajo de las tarifas eléctricas que eran pagadas a los sistemas de generación eléctrica con biomasa antes de la aprobación del Real Decreto 661/2007 [3], el primer análisis de viabilidad económica realizado en el proyecto Agrosost [1] se orientó hacia plantas de generación eléctrica de mediana y gran magnitud. Para realizar el análisis con ambos combustibles de biomasa, se definieron una serie de casos de estudio o “escenarios” que se diferencian por el valor de las siguientes variables:

- Potencias de planta de generación eléctrica ( $MW$ ): 10, 25 y 49 MW.
- Productividad agrícola anual ( $Pr$ ): 8 Mg b.s./ha para la colza e. y 13,5 Mg b.s./ha para el chopo (0% contenido de humedad). Los valores asumidos han sido considerados como alcanzables en experiencias españolas (Agrosost [1]).
- Porcentajes de ocupación del suelo agrícola alrededor de la planta de generación eléctrica ( $Cd$ ): 10 y 90%. Se ha asumido la distribución de los cultivos energéticos en el territorio en forma de mosaico.

- La producción de varas y de astillas en la cosecha del chopo.

El elevado contenido en azufre de la colza e. hace que en su combustión se genere un volumen considerable de gases de SO<sub>2</sub> (Ver Tabla VIII.1). Según el Real Decreto 430/2004 [7], los sistemas de combustión de potencia igual o superior a 50MW, deben controlar sus emisiones de SO<sub>2</sub> mediante la instalación de un sistema de desulfuración de gases hasta obtener un nivel de emisión máximo permitido de 200 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>. Estos sistemas suponen importantes inversiones y costes O+M adicionales a los de la propia planta eléctrica con biomasa que pueden comprometer la viabilidad de la generación eléctrica (Ver Tabla VIII.2). Por este motivo, para el análisis se ha escogido un tamaño de planta de 49MW.

La combinación de las variables mencionadas genera un total de 6 escenarios para el análisis de viabilidad de la generación eléctrica con colza e. (Tabla VIII.3), y de 12 escenarios para el chopo (Tabla VIII.4). El análisis del coste de biomasa de colza e. y chopo asume las distintas distancias de transporte y necesidades de combustible de biomasa definidas para cada escenario.

**Tabla VIII.1. Cálculo de la emisión de SO<sub>2</sub> en la combustión de la colza e. y desulfuración necesaria**

Composición estequiométrica colza e.		Moles oxidados por 100 kg colza e.	
C	46,30 %	CO <sub>2</sub>	3,86 Kmoles
H	6,10 %	H <sub>2</sub> O	3,05 Kmoles
N	0,70 %	N <sub>2</sub>	0,03 Kmoles
S	0,49 %	SO <sub>2</sub>	0,0153 Kmoles
Cl	0,41 %	O <sub>2</sub> intrínseco	1,20 Kmoles
O	38,30 %		
Cenizas	7,70 %	O <sub>2</sub> necesarios para la reacción	4,20 Kmoles
Total	100,00 %	N <sub>2</sub> (del aire)	15,80 kmoles
Kmoles generados en la reacción estequiométrica (base seca)			19,70 kmoles
Kmoles generados con estandarización al 6% O <sub>2</sub>			
	Kmoles O <sub>2</sub> necesarios	1,65	Kmoles
	Kmoles N <sub>2</sub> asociados	6,22	kmoles
Kmoles totales generados (base seca)			
Volumen de gas generado		617,61	m <sup>3</sup> N/100 Kg colza e
Concentración SO <sub>2</sub> en los gases de combustión sin formación sulfatos		1587	mg SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> N
Concentración SO <sub>2</sub> en los gases de combustión con formación sulfatos		<b>476 - 714</b>	mg SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> N
Límite legal establecido (RD 430/2004)		200	mg SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> N
Eficiencia proceso de desulfuración		58 - 72	%

**Tabla VIII.2. Costes sobre sistemas de desulfuración de gases de combustión (US\$, 2001)**

Tipo de Torre de Limpieza	Tamaño de la unidad (MW)	Inversión (\$/kW)	Costes O+M <sup>A</sup> (\$/kW)	Costes anuales (\$/kW)	Coste por tonelada de SO <sub>2</sub> eliminado (\$/Mg)
Húmedo	> 400	100 – 250	2 – 8	20 – 50	200 – 500
	< 400	250 – 1.500	8 – 20	50 - 200	500 – 5.000
Aspersión en seco	> 200	40 – 150	4 – 10	20 – 50	150 – 300
	< 200	150 – 1.500	10 - 300	50 - 500	500 – 4.000

A – Factor de capacidad > 80%. Fuente: Adaptado de [8,9,10]

**Tabla VIII.3. Variables analizadas en los escenarios para el cultivo de colza e.**

Escenarios para colza e.	<i>Pr</i> (Mg b.s./ha-año)	<i>MW</i>	<i>Cd</i> (%)
Esc. b1	8	10	90
Esc. b2	8	10	10
Esc. b3	8	25	90
Esc. b4	8	25	10
Esc. b5	8	49	90
Esc. b6	8	49	10

**Tabla VIII.4. Variables analizadas en los escenarios para el cultivo de chopo.**

Escenarios para chopo	<i>Pr</i> (Mg b.s./ha-año)	Biomasa cosechada	<i>MW</i>	<i>Cd</i> (%)
Esc. ch1	13,5	Haces	10	90
Esc. ch2	13,5	Haces	10	10
Esc. ch3	13,5	Haces	25	90
Esc. ch4	13,5	Haces	25	10
Esc. ch5	13,5	Haces	49	90
Esc. ch6	13,5	Haces	49	10
Esc. ch7	13,5	Astillas	10	90
Esc. ch8	13,5	Astillas	10	10
Esc. ch9	13,5	Astillas	25	90
Esc. ch10	13,5	Astillas	25	10
Esc. ch11	13,5	Astillas	49	90
Esc. ch12	13,5	Astillas	49	10

### 8.3.2. Escenarios evaluados después de la aprobación de las nuevas tarifas eléctricas

La aprobación del Real Decreto 661/2007 [3] ha permitido un aumento en el valor de las tarifas eléctricas asignadas en las actividades de producción de energía eléctrica en régimen especial, y más significativamente en la generación eléctrica con biomasa de cultivos energéticos. El aumento promueve la instalación de nuevos sistemas de producción de energía con biomasa de baja potencia, competitivos en un contexto de producción de energía renovable descentralizada.

Para el nuevo análisis de viabilidad económica, se han añadido 6 nuevos escenarios para cada tipo de cultivo de biomasa, correspondientes a la adición de tres tamaños de planta eléctrica de potencia inferior a los ya evaluados: 1, 2 y 5MW. En cuanto a los escenarios que tratan el chopo como combustible, a modo de simplificar el número de escenarios evaluados, se considerará como parte del sistema de bioenergía la forma del combustible de biomasa producida en la cosecha (astillas o fajos) que contenga un menor coste cuando la biomasa es suministrada en la planta final. La Tabla VIII.5 resume las características principales del conjunto de escenarios que van a ser evaluados considerando el valor de las tarifas eléctricas definidas en el Real Decreto 661/2007.

## 8.4. Obtención y suministro de la biomasa al punto de consumo

### 8.4.1. Área de cultivo necesaria para el suministro de biomasa

La cantidad de combustible de colza e. y chopo necesaria para la operación de las plantas de generación eléctrica depende del poder calorífico medio y humedad de la biomasa suministrada (Tabla VIII.6) y de las características operativas de la planta eléctrica. Las variables que intervienen en este cálculo se expresan en la Tabla VIII.7 (Ecuación 1).

**Tabla VIII.5. Características principales de los escenarios evaluados en el nuevo análisis de viabilidad**

Escenarios para colza e.	MW	Cd (%)	Escenarios para chopo	MW	Cd (%)
Esc. b1	10	90	Esc. ch1	10	90
Esc. b2	10	10	Esc. ch2	10	10
Esc. b3	25	90	Esc. ch3	25	90
Esc. b4	25	10	Esc. ch4	25	10
Esc. b5	49	90	Esc. ch5	49	90
Esc. b6	49	10	Esc. ch6	49	10
Esc. b7'	1	90	Esc. ch7'	1	90
Esc. b8'	1	10	Esc. ch8'	1	10
Esc. b9'	2	90	Esc. ch9'	2	90
Esc. b10'	2	10	Esc. ch10'	2	10
Esc. b11'	5	90	Esc. ch11'	5	90
Esc. b12'	5	10	Esc. ch12'	5	10

**Tabla VIII.6. Características físico-químicas de los cultivos energéticos analizados**

Concepto	Unidades	Colza e. [11]	Populus sp [12]
PCI (Poder Calorífico Inferior)	kJ/kg b.s.	17.730	18.200
Contenido humedad	% peso, b.h.	20,0	20,0
Carbono	% peso, b.s.	46,30	48,19
Hidrógeno	% peso, b.s.	6,10	5,9
Nitrógeno	% peso, b.s.	0,70	0,57
Azufre	% peso, b.s.	0,49	0,05
Cloro	% peso, b.s.	0,41	-
Oxígeno	% peso, b.s.	38,30	43,49
Cenizas	% peso, b.s.	7,70	1,8

**Tabla VIII.7. Expresiones para el cálculo del área de cultivo necesaria en el suministro de biomasa de una planta eléctrica**

<p><b>Biomasa suministrada en planta</b></p> $B = \frac{MW \cdot HO \cdot 3600}{\eta \cdot PCI} \quad (\text{Ecuación 1})$	<p>B = Consumo anual de biomasa de la planta eléctrica (Mg b.s./año).                      HO = Horas operativas anuales de la planta, 8000 horas.                      η = Eficiencia de la planta eléctrica: 25% para 10 MW, 28% para 25MW y 30% para 50 MW.                      PCI = Poder Calorífico Inferior de la biomasa, MJ/Mg b.s.</p>
<p><b>Area de cultivo</b></p> $A_{\text{Colza e.}} = B_{\text{Colza e.}} \cdot Pr_{\text{Colza e.}}^{-1} \quad (\text{Ecuación 2})$ $A_{\text{chopo}} = B_{\text{chopo}} \cdot Pr_{\text{poplar}}^{-1} \quad (\text{Ecuación 3})$	<p>A = Área de cultivo, ha.                      Pr = Productividad del cultivo, Mg (b.s.)/ha.</p>

Asumiendo que la productividad de los cultivos energéticos estudiados es media para cada año, el número de hectáreas necesarias para el suministro de cada planta eléctrica se calcula en función del combustible requerido anualmente por la planta (Ecuaciones 2 y 3).

### 8.4.2. Transporte necesario para el suministro de biomasa

El tipo de transporte y de las operaciones de carga y descarga de los cultivos energéticos se diferencian en función de la forma de biomasa que se debe transportar. Por otro lado, para todos los escenarios se puede establecer una metodología de cálculo común que considere la masa transportada, su densidad, y los tiempos de carga y descarga.

Para determinar la logística necesaria para cada caso de estudio, en primer lugar se debe determinar la capacidad de carga real de un camión. Éste cálculo considera los límites legales sobre peso y volumen transportados por un camión determinado, así como la densidad de la carga (Tabla VIII.8). Para todos los tipos de biomasa evaluados (pacas de colza e., astillas y haces de chopo), el factor que limita la capacidad de transporte del camión no es el peso (Carga Útil) si no el volumen máximo autorizado. El número de camiones requeridos diariamente para el suministro de cada planta dependerá de la capacidad de transporte diario de cada uno de ellos. La capacidad de transporte depende del tiempo que emplea cada camión en el recorrido por carretera, y del tiempo de carga y descarga de la biomasa (Tabla VIII.9).

Para el cálculo del transporte de colza e., se asume el funcionamiento conjunto de dos cargadores y dos descargadores por camión.

### 8.4.3. Costes unitarios para el transporte de biomasa

La inversión de cada maquinaria implicada en el suministro de colza e. es la siguiente:

- Camión de transporte de 16 Mg Carga Útil (26 Mg PMA). Inversión media de 70.000 € [13].

**Tabla VIII.8. Capacidad de transporte de biomasa para camiones de 26 t PMA (16 Mg carga útil)**

	Capacidad de carga del camión (m <sup>3</sup> )	Densidad de la biomasa (kg/m <sup>3</sup> )	Carga transportada en cada camión (t/camión) (CC)
Balas de colza e.	47*	150	7,1
Haces de chopo	47*	310	14,6
Astillas de chopo	39	280	10,9

\*Nota: Se considera que la carga puede sobresalir 0,5 m por encima del límite de altura de la caja. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla VIII.9. Ecuaciones para el cálculo de camiones necesarios para el suministro de biomasa**

<p><b>Distancia media de transporte</b></p> $D = \left( \frac{A}{2 \cdot \pi \cdot Cd \cdot 100} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 4})$	<p>D = Distancia media de transporte, del cultivo hasta la planta, km. Cd = Ocupación del cultivo en el territorio, 10 - 90%.</p>
<p><b>Viajes diarios por camión</b></p> $V_{pd}^{B. \text{carinata}} = \frac{h}{0,86 + 2D/60} \quad (\text{Ecuación 5})$ $V_{pd}^{Ch. \text{Fajos}} = \frac{h}{1,29 + 2D/60} \quad (\text{Ecuación 6})$ $V_{pd}^{Ch. \text{Astillas}} = \frac{h}{0,65 + 2D/60} \quad (\text{Ecuación 7})$	<p>Vpd = Número de viajes diarios por camión. h = Jornada laboral del conductor del camión, 8 h.</p> <p>Donde: 0,86 (h) = 0,42 (h de carga) + 0,28 (h descarga) + 0,16 (h incidencias) 1,29 (h) = 0,80 (h de carga) + 0,33 (h descarga) + 0,16 (h incidencias) 0,65 (h) = 0,33 (h de carga) + 0,16 (h descarga) + 0,16 (h incidencias)</p>
<p><b>Camiones necesarios para cada caso de estudio</b></p> $Ctr = \frac{B(b.h.) \cdot 24}{V_{pd} \cdot CC \cdot HO} \quad (\text{Ecuación 8})$	<p>Ctr = Camiones de transporte necesarios B (b.h.)= Consumo anual de biomasa de la planta eléctrica (Mg b.h./año). CC = Capacidad de carga de un camión, Mg b.h./camión HO = Horas operativas anuales de la planta, 8000 horas.</p>

- Carretillas eléctricas elevadoras para la descarga en planta. Inversión media de 27.000 € [14].

En la operación de carga de colza e. al camión se asume el funcionamiento de los mismos tractores agrícolas que operan en el cultivo, modificados tecnológicamente mediante la instalación de un frontal elevador.

En cuanto a la logística de suministro del chopo, la inversión de la maquinaria utilizada es la siguiente:

- Camión de transporte de 26 Mg PMA. Inversión media de 70.000 € [13].
- Instalación de una grúa forestal o pluma cargadora para los haces de chopo. Inversión media de 28.000 € [16].

Se ha asumido que la descarga de astillas y de haces de chopo en planta se efectúa mediante el vuelco de la carga. Para todos los equipos incluidos en la carga, el transporte y la descarga de la biomasa en la planta de generación eléctrica, se ha considerado un período de amortización de la inversión de 7 años.

#### 8.4.4. Costes de las operaciones de carga, transporte y descarga

Los costes operativos relativos a la carga, transporte y descarga de colza e. y chopo incluyen los siguientes conceptos:

- Consumo de combustible fósil (gasóleo) por la maquinaria agrícola y/o por los camiones.
- Sueldo de los transportistas/operarios.

Para la colza e., el consumo de gasóleo de la maquinaria agrícola en la carga de biomasa se ha asumido en 10 l/h [15] (valor de consumo obtenido en experiencias sobre laboreo agrícola realizadas mediante el proyecto “Agrosost” (2004-2007) [1]. El coste del gasóleo consumido es de 0,67 €/l [19]. El consumo total de combustible fósil relacionado con el transporte de colza e. se ha calculado a partir del consumo del conjunto de máquinas dedicadas a la carga y el transporte. Éste consumo considera los siguientes conceptos:

- Horas de carga de biomasa por los tractores agrícolas.
- El total de kilómetros estimados recorridos por los camiones en un año;
- El consumo de gasoil por kilómetro recorrido;

En la descarga de colza e. no se agregado un consumo de combustible fósil debido al funcionamiento eléctrico de las carretillas descargadoras.

El coste operativo total por la mano de obra para el suministro de colza e. se ha calculado a partir de **(a)** las horas empleadas en la carga de biomasa, y **(b)** del número de transportistas y descargadores necesarios para cada escenario:

- Coste horario cargador: 12,82 €/hora [16].
- Sueldo conductor camión: 21.080 €/año [16].
- Sueldo descargador (conductor de toro): 9480 €/año [17].

Para ambos cultivos, se ha asumido como consumo de gasóleo de los camiones de carretera el valor de 0,335 l/km [18]. Este valor corresponde al consumo medio del camión cuando éste se encuentra cargado y vacío. Se ha asumido como coste del gasóleo para el transporte el valor de 0,9751 €/l basado en el precio medio del gasóleo en el año 2006 [19].

En cuanto a la logística del chopo (astillas y haces), los costes operativos totales consideran los siguientes conceptos: **(a)** el consumo de gasoil realizado por los camiones para el transporte de la biomasa, y **(b)** los sueldos de los conductores de los camiones. El consumo de gasóleo de los camiones se ha calculado siguiendo la misma metodología utilizada para el transporte de colza e.

En los escenarios basados en el transporte de astillas, se ha asumido un sueldo del transportista correspondiente al período de operación de la fase de recogida de chopo en el campo (150 días/año). La cantidad total percibida por trabajador se ha fijado en 10.540 €/año.

Para los casos de estudio basados en el transporte de haces de chopo, se ha asumido un coste laboral superior debido a la función adicional del conductor del camión en el manejo de la grúa de carga en la carga de los haces de chopo (25.960 €/año [16]). A diferencia de los casos sobre transporte de astillas, el transporte de haces es efectuado durante todo el año, en función del requerimiento de biomasa de las planta eléctricas evaluadas en el análisis de viabilidad.

Para ambos cultivos, el coste de mantenimiento se ha asumido como el equivalente al 50% de la amortización de los sistemas de transporte.

## **8.5. Coste final de la biomasa de colza e. suministrada a una planta de generación eléctrica**

La Tabla VIII.10 resume los costes para las etapas del sistema de bioenergía anteriores a la valorización energética de la biomasa de colza e. en la planta eléctrica final.

### **8.5.1. Coste de producción agrícola y cosecha de colza e.**

Según los resultados obtenidos en las parcelas experimentales de colza e. implantadas para el proyecto "Agrosost" (2004-2007) [1], el coste total del cultivo y de la cosecha de colza e. en forma de pacas es de 474 €/ha·año. El coste del cultivo de colza se ha descrito en detalle en el anterior Capítulo 6.

En base al coste señalado de producción de colza en una hectárea de cultivo, si se asume una productividad de 8 Mg (b.s.)/ha·año, el coste de las pacas producidas en la cosecha antes de ser cargadas al camión es de 59,3 €/Mg b.s.

Según los resultados mostrados en la Tabla VIII.10, el cultivo y la producción de pacas en el campo representan el coste más importante sobre el coste final de las pacas dispuestas en la planta eléctrica final (87-90% sobre el coste final).

**Tabla VIII.10. Evaluación de costes en la logística de carga, transporte y descarga de Colza e.**

Escenarios	Esc. b1	Esc. b2	Esc. b3	Esc. b4	Esc. b5	Esc. b6	Esc. b7'	Esc. b8'	Esc. b9'	Esc. b10'	Esc. b11'	Esc. b12'
Cd (%)	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10
Potencia planta (MW)	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
Total de Biomasa (Mg b.s.)	64.980	64.980	145.030	145.030	265.313	265.313	14.770	14.770	23.210	23.210	36.920	39.920
Total de Biomasa (Mg b.h.)	81.220	81.220	181.290	181.290	331.641	331.641	18.460	18.460	29.010	29.010	46.150	46.150
Área de cultivo necesaria (ha)	8.120	8.120	18.130	18.130	33.160	33.160	1.850	1.850	2.900	2.900	4.620	4.620
Radio Medio de Transporte (km)	3,8	11,4	5,7	17,0	7,7	23,0	1,8	5,4	2,3	6,8	2,9	8,6
Viajes diarios teóricos por camión*	8,1	6,5	7,6	5,6	7,2	4,9	8,7	7,7	8,6	7,4	8,4	7,0
Carga diaria transportada por camión (Mg b.h.)	57	46	54	40	51	35	61	54	60	52	59	49
<b>Logística de carga**</b>												
Consumo combustible (miles €)	70	70	150	150	270	270	15	15	23	23	37	37
Costes laborales (miles €)	130	130	280	280	510	510	28	28	45	45	71	71
TOTAL Costes de carga (miles €)	200	200	430	430	780	780	43	43	68	68	108	108
TOTAL Costes de carga (€/Mg b.s.) (A)	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
<b>Logística de transporte</b>												
Camiones necesarios	4	5	10	14	20	29	0,9	1,0	1,4	1,7	2,3	2,8
Camiones adquiridos	4	5	10	14	20	29	1	1	1	2	2	3
Inversión (miles €)	280	350	700	980	1.400	2.030	70	70	70	140	140	210
Amortización (miles €/año)	40	50	100	140	200	290	10	10	10	20	20	30
Mantenimiento (miles €/año)	20	20	50	70	100	140	5	5	7	8	12	14
Consumo combustible (miles €/año)	30	90	90	280	230	700	3	9	6	18	12	37
Costes laborales (miles €/año)	90	110	210	290	410	600	19	22	30	35	49	49
TOTAL Costes de transporte (miles €)	180	280	450	780	940	1.730	37	46	53	81	93	140
TOTAL Costes de transporte (€/Mg b.s.) (B)	2,8	4,3	3,1	5,4	3,5	6,5	2,5	3,1	2,3	3,5	2,5	3,8
<b>Logística de descarga</b>												
Carretillas elevadoras adquiridas	2	2	5	5	10	10	0,5	0,5	0,9	0,9	1,4	1,4
Inversión (miles €)	70	70	150	150	270	270	10	10	20	20	40	40
Amortización (miles €/año)	10	10	20	20	40	40	1	1	3	3	6	6
Costes laborales (miles €/año)	20	20	50	50	100	100	5	5	8	8	13	13
TOTAL Costes de descarga (miles €)	30	30	70	70	140	140	6	6	11	11	19	19
TOTAL Costes de descarga (€/Mg b.s.) (C)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,4	0,4	0,5	0,5
<b>TOTAL Suministro biomasa (€/Mg b.s.) (D = A+B+C)</b>	<b>6,4</b>	<b>7,9</b>	<b>6,6</b>	<b>8,9</b>	<b>6,9</b>	<b>9,9</b>	<b>6,1</b>	<b>6,7</b>	<b>5,6</b>	<b>6,8</b>	<b>5,9</b>	<b>7,2</b>
Coste Cultivo y cosecha (€/Mg b.s.) (E)	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3
<b>Coste final de la biomasa en planta (€/Mg b.s.) (F=D+E)</b>	<b>65,7</b>	<b>67,2</b>	<b>65,9</b>	<b>68,2</b>	<b>66,2</b>	<b>69,2</b>	<b>65,4</b>	<b>66,0</b>	<b>64,9</b>	<b>66,1</b>	<b>65,2</b>	<b>66,5</b>

Nota: \*En la práctica ocurre un redondeo compensado a lo largo de los días de trabajo. \*\* La carga es efectuada por los mismos tractores agrícolas que operan en el cultivo.

## 8.5.2. Coste de las operaciones de carga, transporte y descarga de colza e.

El conjunto de costes relativos a la carga, transporte y descarga de las pacas de colza e. solamente representan el 10-13% del coste final de la biomasa. Este porcentaje representa el incremento del coste de la biomasa desde que es cosechada en el campo en 6,4-10,0 €/Mg (b.s.).

El transporte es la etapa de la cadena de suministro de mayor coste (43-66%). Los factores que contribuyen en mayor peso en su valor son: el coste laboral y el consumo de gasóleo por los camiones, tanto más grande cuando las distancias recorridas son mayores. Sobre los resultados obtenidos, se puede asumir que una variación en la depreciación de los camiones de transporte no afecta significativamente en el coste final de la etapa de transporte.

El grado de ocupación del cultivo alrededor de la planta sólo afecta a la etapa del transporte. Cuando la ocupación del cultivo en el territorio es menor, la distancia a recorrer por los camiones en el suministro es mayor. En este caso se produce un mayor consumo de combustible fósil y se requiere un mayor número de operarios y de camiones en movimiento para suministrar a una misma planta eléctrica con cultivos energéticos más cercanos. Por otro lado, aún triplicando la distancia de transporte para cada planta eléctrica, el coste final de la biomasa aumenta solamente en 1,4 a 2,4 €/Mg b.s.

La carga de la biomasa contribuye en un 29-48% sobre el coste total de las etapas implicadas en el suministro de biomasa. El coste laboral es la variable de mayor peso en esta etapa. Finalmente, la descarga de la biomasa en la planta eléctrica representa el coste de menor peso en el coste final que supone el suministro de colza e. (5-8% sobre el total).

Se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre el valor del coste final de la biomasa cuando el coste del gasóleo de carretera aumenta un 30 y un 50% sobre el coste inicial considerado de 0,97 €/l [19]. Ver Tabla VIII.11. Según los resultados obtenidos, cuando el coste del gasóleo es de 1,26 €/l (valor 30% superior al inicial), el coste final de la colza e. puede aumentar hasta 0,8 €/Mg b.s. si las distancias de transporte son importantes. Por otro lado, cuando el coste del gasóleo alcanza un valor de 1,46€/l, el coste de la biomasa de colza e. aumenta un máximo de 1,4 €/Mg (b.s.). Cabe destacar que cuando las distancias de transporte son pequeñas, el efecto del incremento del coste del gasóleo

**Tabla VIII.11. Análisis de sensibilidad en el transporte de colza e. (Variación del coste del gasóleo)**

Escenarios	Esc. b1	Esc. b2	Esc. b3	Esc. b4	Esc. b5	Esc. b6
<b>Coste del transporte (€/Mg d.b)</b>						
Coste inicial del gasóleo (0,97€/l <sup>-1</sup> )	2,8	4,3	3,1	5,4	3,5	6,5
Δ = 30%	2,9 (0,1)	4,6 (0,3)	3,3 (0,2)	6,0 (0,6)	3,8 (0,3)	7,3 (0,8)
Δ = 50%	2,9 (0,1)	4,9 (0,6)	3,4 (0,3)	6,4 (1,0)	4,0 (0,5)	7,9 (1,4)

sobre el coste final de la biomasa es menor.

## 8.6. Coste final de la biomasa de chopo suministrada a una planta de generación eléctrica

Las Tabla VIII.12, VIII.13 resumen los costes para los diferentes apartados del sistema de bioenergía anteriores a la valorización energética de la biomasa de chopo en la planta eléctrica final.

### 8.6.1. Coste de producción agrícola y cosecha de chopo

Según los resultados obtenidos en las parcelas experimentales de chopo implantadas para el proyecto “Agrosost” (2004-2007) [1], el coste total del cultivo y de la cosecha de chopo es de 197 €/ha·año cuando la forma final de biomasa cosechada son haces, y de 209 €/ha·año cuando la cosecha conlleva la producción de astillas. Los costes asociados en las etapas del cultivo y cosecha de ambas formas de biomasa de chopo se han descrito en detalle en el anterior Capítulo 6.

En base a los costes señalados sobre producción de biomasa de chopo en una hectárea de cultivo, si se asume una productividad media anual del cultivo 13,5 Mg (b.s.)/ha·año, el coste de los haces de chopo antes de ser cargados al camión es de 14,6 €/Mg b.s. Si en la cosecha se da a cabo el triturado de la biomasa, el coste de las astillas antes de ser transportadas es de 15,5 €/Mg b.s.

Según los resultados mostrados en la Tabla VIII.12 y VIII.13, el cultivo y la producción de fajos de varas y astillas de chopo en el campo representan los costes más importantes sobre el coste final de las astillas consumidas en las plantas de generación eléctrica (71-74% sobre el coste final).

**Tabla VIII.12. Evaluación de costes sobre la carga, transporte, descarga y triturado de haces de chopo**

Caso de estudio	Esc. ch1	Esc. ch2	Esc. ch3	Esc. ch4	Esc. ch5	Esc. ch6
Cd (%)	90	10	90	10	90	10
Potencia planta (MW)	10	10	25	25	49	49
Total de Biomasa (Mg b.s.)	63.300	63.300	141.290	141.290	258.462	258.462
Total de Biomasa (Mg b.h.)	79.120	79.120	176.610	176.610	323.080	323.080
Área de cultivo necesaria (ha)	4.690	4.690	10.470	10.470	19.145	19.145
Radio Medio de Transporte (km)	2,9	8,6	4,3	12,9	5,8	17,5
Viajes diarios teóricos por camión*	5,8	5,1	5,6	4,7	5,4	4,3
Carga diaria transportada por camión (Mg b.h.)	84	74	81	68	79	62
<b>Carga y transporte</b>						
Camiones adquiridos	3,0	3,0	7,0	8,0	12,0	16,0
Inversión (miles €)	290	290	690	780	1.180	1.570
Amortización (miles €/año)	40	40	100	110	170	220
Mantenimiento (miles €/año)	20	20	50	50	90	110
Consumo combustible (miles €/año)	10	30	30	100	80	250
Costes laborales (miles €/año)	70	80	170	200	320	400
TOTAL Costes de carga y transporte (miles €)	140	170	350	460	660	980
<b>TOTAL Costes de carga y transporte (€/Mg b.s.) (A)</b>	<b>2,2</b>	<b>2,7</b>	<b>2,5</b>	<b>3,3</b>	<b>2,6</b>	<b>3,8</b>
<b>Triturado en planta</b>						
Coste triturado (€/Mg b.s.) (B)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
<b>TOTAL SUMINISTRO (€/Mg b.s.) (C = A+B)</b>	<b>5,0</b>	<b>5,5</b>	<b>5,3</b>	<b>6,1</b>	<b>5,4</b>	<b>6,6</b>
Coste Cultivo (€/Mg b.s.) (D)	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
<b>Coste final de la biomasa (€/Mg b.s.) (E=C+D)</b>	<b>19,6</b>	<b>20,1</b>	<b>19,9</b>	<b>20,7</b>	<b>20,0</b>	<b>21,2</b>

**Tabla VIII.13. Evaluación de costes sobre la carga, transporte y descarga de astillas de chopo**

Caso de estudio	Esc. ch7	Esc. ch8	Esc. ch9	Esc. ch10	Esc. ch11	Esc. ch12
Cd (%)	90	10	90	10	90	10
Potencia planta (MW)	10	10	25	25	49	49
Total de Biomasa (Mg b.s.)	63.300	63.300	141.290	141.290	258.462	258.462
Total de Biomasa (Mg b.h.)	126.590	126.590	282.570	282.570	516.920	516.920
Viajes diarios teóricos por camión*	10,7	8,5	10,1	7,4	9,5	6,5
Carga diaria transportada por camión (Mg b.h.)	117	93	110	81	103	71
<b>Carga, transporte y descarga</b>						
Camiones adquiridos	7	9	17	23	33	49
Inversión (miles €)	490	630	1.190	1.610	2.310	3.430
Amortización (miles €/año)	70	90	170	230	330	490
Mantenimiento (miles €/año)	40	50	90	120	170	240
Consumo combustible (miles €/año)	20	50	50	160	130	400
Costes laborales (miles €/año)	80	100	180	250	350	510
TOTAL Carga, transporte y descarga (miles €)	210	290	490	760	980	1.640
<b>TOTAL SUMINISTRO (€/Mg b.s.) (A)</b>	<b>3,3</b>	<b>4,6</b>	<b>3,5</b>	<b>5,4</b>	<b>3,8</b>	<b>6,3</b>
Coste Cultivo (€/Mg b.s.) (B)	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
<b>Coste final de la biomasa (€/Mg b.s.) (C=A+B)</b>	<b>18,8</b>	<b>20,1</b>	<b>19,0</b>	<b>20,9</b>	<b>19,3</b>	<b>21,8</b>

**Tabla VIII.14. Suministro de biomasa de chopo en plantas de generación eléctrica (1, 2 y 5MW)**

Casos de estudio	Esc. ch7'	Esc. ch8'	Esc. ch9'	Esc. ch10'	Esc. ch11'	Esc. ch12'
Cd (%)	90	10	90	10	90	10
Potencia planta (MW)	1	1	2	2	5	5
Biomasa requerida en la planta eléctrica (Mg b.s./año)	14.390	14.390	22.610	22.610	35.960	35.960
Biomasa requerida en la planta eléctrica (Mg b.h./año)	17.980	17.980	28.260	28.260	44.960	44.960
Área de cultivo (ha)	1.070	1.070	1.680	1.680	2.670	2.670
Radio Medio de Transporte (km)	1,4	4,1	1,7	5,2	2,2	6,5
<b>Carga y transporte</b>						
Camiones adquiridos	1	1	1	1	2	2
Inversión (miles €)	100	100	100	100	200	200
Amortización (miles €/año)	10	10	10	10	30	30
Mantenimiento (miles €/año)	4	5	7	7	11	12
Consumo combustible (miles €/año)	1	3	2	7	4	13
Costes laborales (miles €/año)	16	17	25	28	41	45
TOTAL Coste Transporte (miles €)	31	35	44	52	86	100
TOTAL Coste Transporte (miles €) (A)	2,2	2,4	1,9	2,3	2,4	2,8

Coste astillado en planta (€/Mg b.s.)	(B)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
<b>TOTAL suministro biomasa (€/Mg b.s.)</b>	<b>(C=A+B)</b>	<b>5,0</b>	<b>5,3</b>	<b>4,8</b>	<b>5,1</b>	<b>5,2</b>	<b>5,6</b>
Coste cultivo y cosecha (€/Mg b.s.)	(D)	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
<b>Coste final biomasa en planta (€/Mg b.s.)</b>	<b>(E=C+D)</b>	<b>19,6</b>	<b>19,9</b>	<b>19,4</b>	<b>19,7</b>	<b>19,8</b>	<b>20,2</b>

## 8.6.2. Coste de las operaciones de carga, transporte y descarga de chopo

Los costes relacionados con las operaciones de carga, transporte y descarga del chopo en forma de fajos representan el 10-18% del coste final de la biomasa. Cuando el chopo es cosechado en forma de astillas, su transporte y descarga en la planta final representan el 17-29% del coste final de la biomasa.

El transporte de haces de chopo tiene menores costes en comparación con el transporte de las astillas producidas en el campo. Los principales factores que justifican esta diferencia de costes para ambas formas de biomasa de chopo son las siguientes:

- El transporte de chopo recién cortado comporta un transporte adicional de agua en comparación a los haces de chopo, que son apilados en el campo para su secado natural.
- El transporte de astillas se da a cabo en el mismo período en que se produce la cosecha del chopo (150 días/año). La restricción del período de transporte para las astillas comporta un mayor nivel de inversión en maquinaria de transporte en comparación a los haces de chopo.
- La menor carga efectiva de biomasa de astillas en relación a los haces de chopo en el remolque del camión, repercute en mayores consumos de diesel cuando las distancias a recorrer son importantes.
- El almacenado de las astillas en planta comporta costes adicionales no contabilizados en el análisis.

La trituración de los fajos de chopo en la planta final representa la adición de 2,8 €/Mg b.s. sobre el coste de los fajos descargados en la planta eléctrica.

Agregando los costes asociados a las etapas previas de la valorización de la biomasa, el precio final de la astilla de chopo en la planta final es comprendido entre 18,8 y 21,8 €/Mg de materia seca.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad para el análisis del valor del coste final de la biomasa cuando el coste del gasóleo de carretera aumenta un 30 y un 50% sobre el coste inicial considerado de 0,97 €/l [19]. La Tabla VIII.15 muestra que para largas distancias cubiertas por los camiones de transporte, el incremento del coste del gasóleo tiene una influencia significativa en el coste final de la biomasa. El aumento del coste del gasóleo hasta 1,26 €/l supone un aumento máximo del coste de los haces transportados de 0,3 €/Mg b.s., y de 0,5 €/Mg b.s para las astillas. El aumento del coste del gasóleo hasta 1,46 €/l supone un aumento mayor en el coste de la biomasa transportada: 0,5 €/Mg b.s para los haces y 0,9 €/Mg b.s para las astillas de chopo.

Del mismo modo que en los casos evaluados para la colza e., cuando la distancia de transporte entre el campo y la planta final es menor, el incremento en el coste de la biomasa es menos significativo (0,2-0,4 €/Mg b.s.). Los menores valores calculados en el análisis de sensibilidad del transporte para el chopo son atribuidos a la mayor densidad de la carga de biomasa transportada en relación a la colza e.

**Tabla VIII.15. Análisis de sensibilidad en el transporte de chopo (Variación del coste del gasóleo)**

	Caso de estudio	Esc. ch1 / 7	Esc. ch2 / 7	Esc. ch3 / 8	Esc. ch4 / 9	Esc. ch5 / 10	Esc. ch6 / 11
	Cd (%)	90	10	90	10	90	10
	Potencia planta (MW)	10	10	25	25	49	49
	Distancia media de transporte (km)	2,9	8,6	4,3	12,9	5,8	17,5
Haces	<b>Coste del transporte (€/Mg d.b)</b>						
	Coste inicial del gasóleo (0,97€/l <sup>-1</sup> )	2,2	2,7	2,5	3,3	2,6	3,8
	Δ = 30%	2,2 (0,0)	2,8 (0,1)	2,5 (0,0)	3,5 (0,2)	2,7 (0,1)	4,1 (0,3)
	Δ = 50%	2,4 (0,2)	3,0 (0,3)	2,6 (0,1)	3,6 (0,4)	2,7 (0,1)	4,3 (0,5)
Astillas	<b>Coste del transporte (€/Mg d.b)</b>						
	Coste inicial del gasóleo (0,97€/l <sup>-1</sup> )	3,3	4,6	3,5	5,4	3,8	6,3
	Δ = 30%	3,3 (0,0)	4,7 (0,1)	3,6 (0,1)	5,7 (0,3)	3,9 (0,1)	6,8 (0,5)
	Δ = 50%	3,3 (0,0)	4,9 (0,3)	3,7 (0,3)	5,9 (0,5)	4,1 (0,3)	7,2 (0,9)

## 8.7. Inversiones y costes O+M en plantas de generación eléctrica con biomasa

### 8.7.1. Inversiones

Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre la inversión de plantas eléctricas con biomasa de diversas potencias, en su mayoría situadas en el norte de Europa y Estados Unidos. Los costes han sido actualizados a euros y al año 2005 utilizando los índices de Marshall y Shift.

La producción combinada de calor y electricidad en plantas de baja potencia (CHP), presenta diferencias significativas en el valor de la inversión unitaria debido a la complejidad tecnológica del sistema implantado y la extensión de la red de calor instalada. En términos relativos, la inversión por unidad de potencia instalada es inferior en la generación eléctrica que en la producción de calor. Para estos sistemas, la información bibliográfica no ha permitido la distinción en los componentes eléctricos y térmicos incluidos en la inversión por unidad de potencia eléctrica instalada. Los valores de inversión más elevados correspondían a los sistemas que incluían la red de distribución de calor. Estos han sido eliminados del análisis.

Para el cálculo de las inversiones de las plantas eléctricas, se han considerado dos relaciones de inversiones para las distintas escalas o magnitudes de producción de energía (Figura VIII.3).

- (1) Una primera relación de inversiones para plantas de mayor potencia que responden al factor escala en cuanto complejidad y coste de los equipos cuanto la potencia instalada es mayor (Ecuación 9);

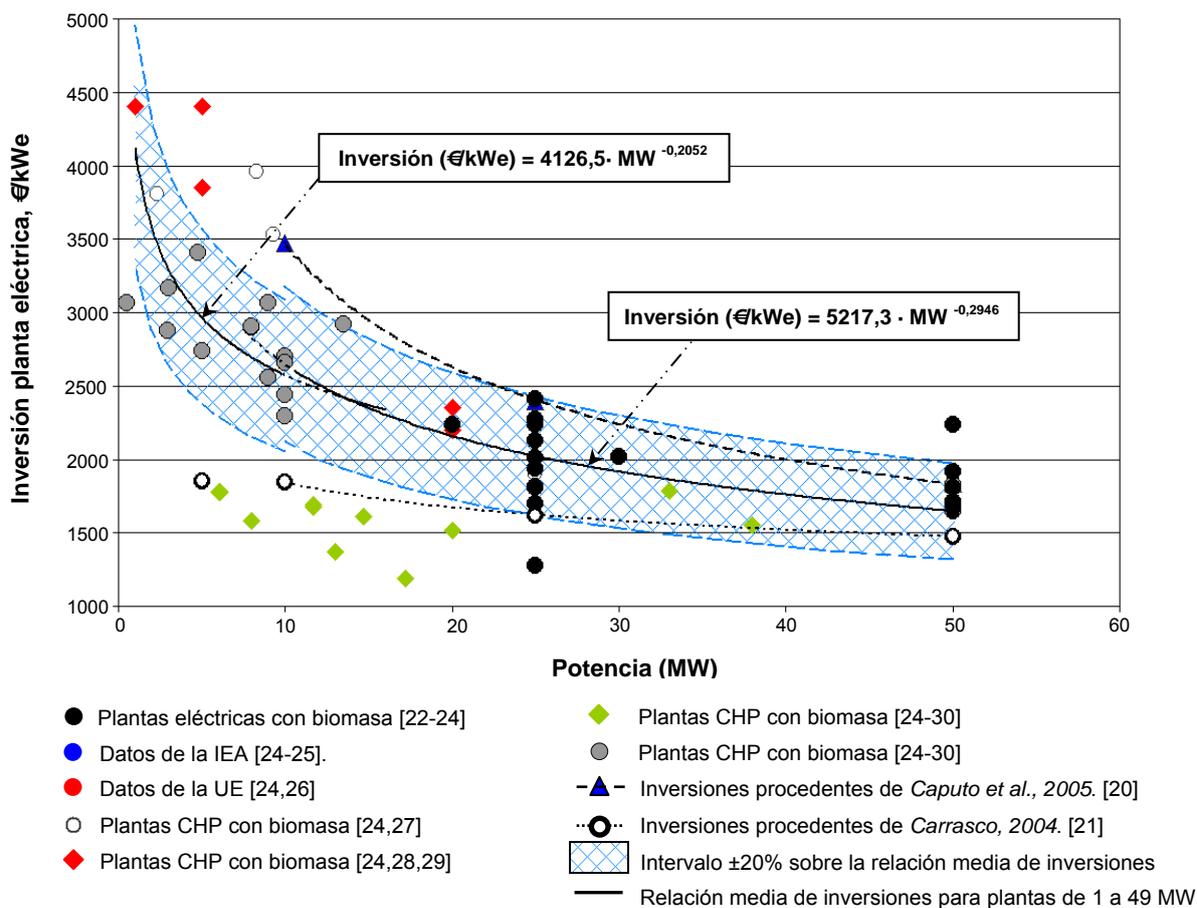


Figura VIII.3. Inversiones en plantas eléctricas de biomasa

(2) Una segunda relación para los tamaños de planta inferiores, que debido al tipo de tecnología instalada, sus inversiones no responden a la complejidad tecnológica y elevado coste proyectado según la primera ecuación de inversiones para plantas de elevada potencia (Ecuación 10).

$$\text{Inversión (€/kWe)} = 5217,3 \cdot \text{MW}^{-0,2946} \quad \text{Para los sistemas de 10, 25 y 49 MW} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\text{Inversión (€/kWe)} = 4126,5 \cdot \text{MW}^{-0,2052} \quad \text{Para los sistemas de 1, 2 y 5 MW} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Los componentes que caracterizan las plantas de generación eléctrica con biomasa evaluadas para ambos cultivos son: el silo, búnquer de recepción de la biomasa o área exterior cubierta para el almacenado, el mecanismo de transporte automático de la biomasa, la caldera de combustión, el sistema turbina-generador de electricidad y el sistema de limpieza de gases. La bibliografía no determina claramente el tipo de sistema de limpieza de gases instalado. La amortización de cada planta se ha calculado para un período de 20 años.

## 8.7.2. Costes O+M y otros costes

Los costes operativos de las plantas eléctricas consideradas en el análisis de viabilidad incluyen los siguientes conceptos: el coste de biomasa y el coste laboral. El coste final de la biomasa es el coste acumulado de las etapas de cultivo, cosecha, carga, transporte y descarga en la planta de generación eléctrica. Los costes laborales se han determinado a partir de los operarios necesarios para cada planta eléctrica. Para las plantas de menor potencia, los costes operativos han sido calculados a partir de la aproximación de los valores señalados en la bibliografía (Tabla VIII.16).

El coste de mantenimiento se ha calculado asumiendo un valor equivalente al 1,5% del valor de inversión. El coste relativo al seguro y otros costes se han calculado como el valor equivalente al 1% del valor de la inversión [20].

**Tabla VIII.16. Costes laborales de las plantas eléctricas**

	Coste anual (€)		Coste anual (€)
Planta 1 MW*	40.000	Planta 10 MW	208.000
Planta 2 MW*	70.000	Planta 25 MW	312.000
Planta 5 MW	144.000	Planta 49 MW	494.000

\*Valores aproximados a partir de la bibliografía. Fuente: Adaptado de Carrasco J., 2006 [21].

### 8.7.3. Generación y disposición de las cenizas

Se ha asumido que las cenizas generadas en la combustión de biomasa son dispuestas a un vertedero situado a una distancia de 25 km respecto a la planta de generación eléctrica. Como tasa de disposición se ha considerado un valor de 72 €/Mg. El coste de su transporte implica la disponibilidad de 1 camión, un conductor y el consumo de gasóleo.

## 8.8. Análisis de viabilidad en la generación eléctrica con cultivos energéticos considerando las tarifas eléctricas del año 2006

El presente apartado muestra el análisis de viabilidad de la generación eléctrica usando los cultivos energéticos de colza e. y chopo como combustibles, en base a los escenarios definidos anteriormente (plantas eléctricas de 10, 25 y 49 MW). Para los casos de estudio sobre chopo, el sistema de bioenergía considera la producción de haces de varas en la cosecha debido a los menores costes calculados en la logística de suministro, en relación a la producción de astillas en el campo. De acuerdo con el objetivo descrito al inicio del presente capítulo, el análisis de viabilidad se ha realizado asumiendo las tarifas eléctricas anteriores a la aprobación de las actuales tarifas que las que se rigen los sistemas de producción de energía con biomasa, aprobadas en el Real decreto 661/2007 [3].

### 8.8.1. Ingresos por la venta de la electricidad producida

Los ingresos obtenidos en las plantas de generación eléctrica se han calculado a partir del total de energía producida y del valor de la tarifa eléctrica aplicada a los sistemas de generación de electricidad con biomasa. Estas tarifas son descritas en el Real Decreto 1432/2002 [4] y el Real Decreto 809/2006 [5]. El total de ingresos percibidos en cada planta eléctrica es mostrado en la Tabla VIII.17.

**Tabla VIII.17. Energía producida e ingresos por la venta de la electricidad para cada planta eléctrica**

<b>Tarifa de Referencia (TR)</b>		0,0776 €/kWh		
<b>Precio de la energía</b>		TR + Bonus (0,4*RT) + Incentivo (0,1*TR) = 0,1087 €/kWh		
<b>Potencia (MW)</b>	<b>Horas operativas (h/año)</b>	<b>Autoconsumo* (%)</b>	<b>Electricidad generada (GWh)</b>	<b>Ingresos por la venta de la energía producida (10<sup>3</sup> €)</b>
10	8000	15	68	7.390
25	8000	15	170	18.480
49	8000	12	345	37.500

\*Fuente: Carrasco J., 2006 [21].

## 8.8.2. Indicadores económicos

Se han utilizado los siguientes indicadores económicos para el análisis de la viabilidad de las plantas eléctricas con biomasa: Período de Retorno de la Inversión (PRI), Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) [31]. El VAN se ha calculado para un periodo de 20 años, tomado como tasa de interés el valor de 4,75% [32].

## 8.8.3. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de colza e.

### 8.8.3.1. Costos de explotación de las plantas eléctricas con colza e.

La Tabla VIII.18 resume los resultados del análisis de viabilidad de las plantas de generación eléctricas a partir de la combustión pacas de colza e.

### 8.8.3.2. Discusión de los resultados

El coste de la biomasa y la amortización de la planta son los conceptos que contribuyen en mayor peso sobre los Costes Totales de las Plantas analizadas (CTP) (62-69% y 15-19% sobre CTP respectivamente). Los costes laborales, de mantenimiento y el resto de costes (disposición de cenizas y seguro) solamente representan el 15-18% sobre los CTP.

Según los resultados, los ingresos obtenidos por la venta de la electricidad producida considerando las tarifas eléctricas aprobadas por el Real Decreto 1432/2002 [4] y el Real Decreto 809/2006 [5], son insuficientes para rentabilizar las plantas eléctricas de 10 MW. Ver Tabla VIII.18. En las plantas eléctricas de 25 y 49 MW, la mayor generación de energía, y por lo tanto de mayores ingresos por la venta de la electricidad producida, resulta una mayor ganancia de beneficios netos. Para estos últimos tamaños de planta, los indicadores económicos muestran valores interesantes

**Tabla VIII.18. Análisis de viabilidad de plantas eléctricas con colza e. como combustible (tarifas eléctricas vigentes en el año 2006)**

	Unidades	Casos de estudio					
		Esc. b1	Esc. b2	Esc. b3	Esc. b4	Esc. b5	Esc. b6
Potencia planta	MW	10	10	25	25	49	49
Inversión	10 <sup>3</sup> €	26.470	26.470	50.530	50.530	81.220	81.220
<b>INGRESOS</b>							
Ingresos	10 <sup>3</sup> €/año	7.390	7.390	18.480	18.480	37.500	37.500
<b>GASTOS</b>							
Costes O+M							
Coste biomasa	10 <sup>3</sup> €/año	4.260	4.360	9.540	9.880	17.560	18.390
Costes laborales	10 <sup>3</sup> €/año	210	210	310	310	490	490
Costes Mantenimiento planta	10 <sup>3</sup> €/año	400	400	760	760	1.240	1.240
<b>TOTAL O+M</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>4.870</b>	<b>4.970</b>	<b>10.610</b>	<b>10.950</b>	<b>19.290</b>	<b>20.120</b>
Otros costes							
Seguros	10 <sup>3</sup> €/año	260	260	500	500	810	810
Disposición cenizas	10 <sup>3</sup> €/año	380	380	850	850	1.560	1.560
<b>Total Otros Costes</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>640</b>	<b>640</b>	<b>1.350</b>	<b>1.350</b>	<b>2.370</b>	<b>2.370</b>
Amortización planta	10 <sup>3</sup> €/año	1.320	1.320	2.530	2.530	4.060	4.060
<b>COSTES TOTALES PLANTA</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>6.830</b>	<b>6.930</b>	<b>14.490</b>	<b>14.830</b>	<b>25.720</b>	<b>26.550</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>							
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	560	460	3.990	3.650	11.780	10.950
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	200	160	1.400	1.280	4.120	3.830
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	360	300	2.590	2.370	7.660	7.120
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	1.680	1.620	5.120	4.900	11.720	11.180
<b>Indicadores Económicos</b>							
PRI	años	15,8	16,3	9,9	10,3	6,9	7,3
VAN (interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	-7,5	-8,4	11,1	8,3	62,2	55,4
TIR	%	0,6	0,1	7,3	6,7	12,9	12,1

para la inversión (VAN y TIR), aunque los valores de PRI se pueden considerar aún elevados (> 7 años).

## 8.8.4. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de chopo

### 8.8.4.1. Costos de explotación de las plantas eléctricas con chopo

La Tabla VIII.19 resume los resultados del análisis de viabilidad de las plantas de generación eléctrica a partir de la combustión de chopo en forma de astillas.

### 8.8.4.2. Discusión de los resultados

Según los resultados calculados, el coste de la biomasa es el componente que contribuye en mayor peso sobre los CTP (35-43%). Este porcentaje es menor en relación a los casos con colza e.

**Tabla VIII.19. Análisis de viabilidad de plantas eléctricas con chopo como combustible (tarifas eléctricas vigentes en el año 2006)**

	Unidades	Casos de estudio					
		Esc. ch1	Esc. ch2	Esc. ch3	Esc. ch4	Esc. ch5	Esc. ch6
Potencia planta	MW	10	10	25	25	49	49
Inversión planta	10 <sup>3</sup> €	26.470	26.470	50.530	50.530	81.220	81.220
<b>INGRESOS</b>							
Ingresos	10 <sup>3</sup> €/año	7.390	7.390	18.480	18.480	37.500	37.500
<b>GASTOS</b>							
Costes O+M							
Coste biomasa	10 <sup>3</sup> €/año	1.250	1.290	2.830	2.880	5.140	5.350
Costes laborales	10 <sup>3</sup> €/año	210	210	310	310	490	490
Costes Mantenimiento planta	10 <sup>3</sup> €/año	400	400	760	760	1.240	1.240
<b>TOTAL O+M</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>1.860</b>	<b>1.900</b>	<b>3.900</b>	<b>3.950</b>	<b>6.870</b>	<b>7.080</b>
Otros costes							
Seguros	10 <sup>3</sup> €/año	260	260	500	500	810	810
Disposición cenizas	10 <sup>3</sup> €/año	80	80	190	190	350	350
<b>Total Otros Costes</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>340</b>	<b>340</b>	<b>690</b>	<b>690</b>	<b>1.160</b>	<b>1.160</b>
<b>Amortización</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>1.320</b>	<b>1.320</b>	<b>2.520</b>	<b>2.520</b>	<b>4.060</b>	<b>4.060</b>
<b>COSTES TOTALES PLANTA</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>3.520</b>	<b>3.560</b>	<b>7.110</b>	<b>7.160</b>	<b>12.090</b>	<b>12.300</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>							
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	3.870	3.830	11.370	11.320	25.410	25.200
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	1.350	1.340	3.980	3.960	8.890	8.820
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	2.520	2.490	7.390	7.360	16.520	16.380
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	3.840	3.810	9.910	9.880	20.580	20.440
<b>Indicadores Económicos</b>							
PRI	años	6,9	6,9	5,1	5,1	3,9	3,9
VAN (interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	22,4	22,0	75,6	75,2	180,8	179,0
TIR	%	13,3	13,2	19,0	18,9	25,0	24,9

debido al menor coste del chopo astillado en la planta eléctrica. La amortización es el segundo componente de mayor valor sobre los CTP (33-37%).

Finalmente, los costes laborales, de mantenimiento y el resto de costes (disposición al vertedero de las cenizas y seguro) solamente representan 23-27% sobre los CTP. Asumiendo los mismos ingresos para las plantas de una misma potencia que utilizan ambos combustibles de biomasa, los resultados económicos muestran una elevada rentabilidad de la generación eléctrica cuando el chopo es el combustible utilizado debido a su menor coste. Los indicadores económicos muestran valores superiores en viabilidad, como es mostrado en la Tabla VIII.19: PRI < 7 años, VAN entre 20 y 180 millones de euros, y TIR > 13%.

## **8.9. Análisis de viabilidad en la generación eléctrica con cultivos energéticos considerando las tarifas eléctricas del año 2007**

La aprobación del Real Decreto 661/2007 [3] ha permitido un aumento en las tarifas eléctricas de las actividades de producción de energía eléctrica en régimen especial, y más significativamente en la generación eléctrica con cultivos energéticos.

El objetivo de este apartado es el análisis de la viabilidad de las plantas de generación eléctrica con los cultivos energéticos de colza e. y chopo descritos anteriormente, incluyendo los nuevos escenarios sobre plantas eléctricas de baja potencia (1, 2 y 5MW) y teniendo en cuenta el valor de las tarifas eléctricas aprobadas por el Real Decreto 661/2007 [3]. Los resultados en los nuevos escenarios permitirán evaluar el potencial económico de estos sistemas a escala local y regional.

### **8.9.1. Ingresos por la venta de la electricidad producida**

El Real Decreto 611/2007 [3] señala que para los sistemas de generación eléctrica con biomasa de cultivos energéticos de potencias inferiores a 2 MW, el ingreso por kWh producido es de 15,889 céntimos de euro (Tarifa 1) durante los primeros 15 años, y de 11,793 céntimos de euro (Tarifa 2) después de ese período. Para potencias mayores de 2 MW, el ingreso por kWh producido disminuye hasta 14,659 céntimos de euro (Tarifa 1) durante los primeros 15 años, y es de 12,347 céntimos de euro (Tarifa 2) después de ese período. El ingreso por venta de electricidad para cada planta de producción de energía es proporcional a la electricidad producida (Tabla VIII.20).

### **8.9.2. Indicadores económicos**

Del mismo modo que en el análisis de viabilidad de la generación eléctrica con colza e. y chopo, el nuevo análisis utilizará los siguientes indicadores para complementar el estudio económico: PRI, VAN y TIR [31]. El VAN se ha calculado para un periodo de 20 años, tomado como tasa de interés el valor de 4,75% [32].

**Tabla VIII.20. Energía total producida e ingresos obtenidos en las plantas de generación eléctrica analizadas.**

Potencia (MW)	Horas funcionamiento anual	Autoconsumo* (%)	Eficiencia eléctrica (%)	Energía producida (GWh)	Ingresos por venta electricidad (10 <sup>3</sup> €)	
					Tarifa 1 (1 <sup>er</sup> - 15 <sup>o</sup> año)	Tarifa 2 (a partir año 15 <sup>o</sup> )
1	8.000	20*	11**	6,4	1.020	750
2	8.000	20*	14**	12,8	2.030	1.510
5	8.000	20	22**	32	4.690	3.950
10	8.000	15	25	68	9.970	8.400
25	8.000	15	28	170	24.920	20.990
49	8.000	12	30	345	50.570	42.590

Nota:\*Se ha asumido el mismo autoconsumo en las plantas de 1, 2 y 5 MW. \*\*Datos asumidos a partir de casos prácticos reales. Fuente: Adaptado de [21]

### 8.9.3. Análisis de sensibilidad

Se ha realizado un análisis de sensibilidad para evaluar la rentabilidad de las plantas eléctricas mediante la variación del valor de las variables que condicionan la viabilidad de éstas en un 20%. Las variables modificadas son:

- La productividad del cultivo: 6 y 10 Mg b.s./ha de colza e; 11 y 16 Mg b.s./ha de chopo.
- La inversión de las plantas eléctricas.

### 8.9.4. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de colza e.

#### 8.9.4.1. Costos de explotación de las plantas eléctricas con colza e.

La Tabla VIII.21 muestra los costos de explotación y los resultados económicos de las plantas eléctricas con colza e. de pequeña potencia (1, 2 y 5MW) y de mediana-elevada potencia (10, 25 y 49MW.).

#### 8.9.4.2. Discusión de los resultados

La aprobación del RD 661/2007 ha permitido la mejora en la viabilidad económica de las plantas de generación eléctrica de 10, 25 y 49MW con biomasa de colza e. como combustible. El aumento en las tarifas eléctricas permite la generación de más ingresos por la electricidad producida, pudiendo cubrir los elevados costes de la biomasa y las inversiones de las plantas que anteriormente no eran rentables (10 MW). El aumento de beneficios es incrementado en proporción a la potencia instalada por el efecto de la economía de escala.

**Tabla VIII.21. Análisis de viabilidad de las plantas eléctricas con colza e. como combustible (tarifas eléctricas del RD 661/2007)**

	Units	Casos de estudio											
		Esc. b1	Esc. b2	Esc. b3	Esc. b4	Esc. b5	Esc. b6	Esc. b7'	Esc. b8'	Esc. b9'	Esc. b10'	Esc. b11'	Esc. b12'
Potencia Planta	MW	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
Cd	%	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10
Inversión	10 <sup>3</sup> €	26.470	26.470	50.530	50.530	81.220	81.220	4,130	4,130	7,160	7,160	14,830	14,830
<b>INGRESOS</b>													
Ingresos des del año 1º al 15º	10 <sup>3</sup> €/año	9.970	9.970	24.920	24.920	50.570	50.570	1.020	1.020	2.030	2.030	4.690	4.690
Ingresos a partir del 15º año	10 <sup>3</sup> €/año	8.400	8.400	20.990	20.990	42.590	42.590	750	750	1.510	1.510	3.950	3.950
<b>GASTOS</b>													
Costes O+M													
Coste biomasa	10 <sup>3</sup> €/año	4.260	4.360	9.540	9.880	17.560	18.390	930	970	1.510	1.530	2.410	2.450
Costes laborales	10 <sup>3</sup> €/año	210	210	310	310	490	490	40	40	70	70	140	140
Costes Mantenimiento planta	10 <sup>3</sup> €/año	400	400	760	760	1.240	1.240	60	60	110	110	220	220
<b>TOTAL O+M</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>4.870</b>	<b>4.970</b>	<b>10.610</b>	<b>10.950</b>	<b>19.290</b>	<b>20.120</b>	<b>1.030</b>	<b>1.070</b>	<b>1.690</b>	<b>1.710</b>	<b>2.770</b>	<b>2.810</b>
Otros costes													
Seguros	10 <sup>3</sup> €/año	260	260	500	500	810	810	40	40	70	70	140	140
Disposición cenizas	10 <sup>3</sup> €/año	380	380	850	850	1.560	1.560	90	90	140	140	220	220
<b>Total Otros Costes</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>640</b>	<b>640</b>	<b>1.350</b>	<b>1.350</b>	<b>2.370</b>	<b>2.370</b>	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>370</b>	<b>370</b>
Amortización planta	10 <sup>3</sup> €/año	1.320	1.320	2.530	2.530	4.060	4.060	210	210	360	360	740	740
<b>COSTES TOTALES PLANTAS</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>6.830</b>	<b>6.930</b>	<b>14.490</b>	<b>14.830</b>	<b>25.720</b>	<b>26.550</b>	<b>1,370</b>	<b>1,410</b>	<b>2,260</b>	<b>2,280</b>	<b>3,880</b>	<b>3,920</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>													
<b>Período des del año 1 al 15</b>													
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	3.140	3.040	10.430	10.090	24.850	24.020	-350	-390	-230	-250	810	770
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	1.100	1.060	3.650	3.530	8.700	8.410	0	0	0	0	280	270
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	2.040	1.980	6.780	6.560	16.150	15.610	-350	-390	-230	-250	530	500
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	3.360	3.300	9.310	9.090	20.210	19.670	-140	-180	130	110	1,270	1,240
<b>Período des del año 16 al 20</b>													
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	1.570	1.470	6.500	6.160	16.870	16.040	-620	-660	-750	-770	70	30
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	550	510	2.280	2.160	5.900	5.610	0	0	0	0	20	10
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	1.020	960	4.230	4.000	10.970	10.430	-620	-660	-750	-770	50	20
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	2.340	2.280	6.760	6.530	15.030	14.490	-410	-450	-390	-410	790	760
<b>Indicadores económicos</b>													
PRI	años	7,9	8,0	5,4	5,6	4,0	4,1	-	-	55,1	65,1	11,7	12,0
VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	14,1	13,3	62,5	59,6	164,8	157,9	-6,5	-7,0	-6,6	-6,9	0,3	-0,1
TIR	%	10,7	10,4	17,4	16,9	24,4	23,7	-	-	-	-	5,0	4,7

Por otro lado, en las plantas de menor potencia (1, 2 y 5 MW), la rentabilidad es insuficiente debido, básicamente, a los elevados costes por el consumo de biomasa (63-67 €/Mg b.s. colza e.), proporcionalmente más elevados a las plantas de menor potencia por las menores eficiencias de conversión eléctrica y mayores autoconsumos.

Para el conjunto de los casos analizados, la viabilidad de la generación eléctrica depende del factor escala. Mientras que para los sistemas mayores de 10 MW la cantidad de energía producida y el valor en su venta pueden hacer interesante la implantación de estas plantas en un escenario regional, las plantas de menor potencia (1, 2 y 5MW) requieren un aumento en los beneficios por la electricidad producida o una disminución en los gastos anuales generados.

Para ello es necesario aumentar la eficiencia de transformación energética de las plantas a través de: **(a)** mejorar la tecnología por tal de aumentar la eficiencia eléctrica de estas plantas, **(b)** considerar la producción adicional de calor, **(c)** reducir el coste de la biomasa.

Si el coste de la biomasa de colza e. no es reducido desde la fase de cultivo, la generación eléctrica en plantas de 1, 2 y 5 MW puede seguir siendo inviable aunque se haya mejorado la eficiencia de conversión.

La producción combinada de calor y electricidad conlleva la instalación de una red de distribución de calor. La inversión necesaria para la implantación de esta red depende de la complejidad y extensión de ésta. A diferencia de los países nórdicos, la demanda de calor en los países mediterráneos es menor a menos que las plantas estén situadas en lugares estratégicos como polígonos industriales donde puedan ser abastecidos con el calor producido.

#### **8.9.4.3. Análisis de sensibilidad: Variación de la productividad agrícola de colza e.**

Se ha realizado un análisis de sensibilidad de la viabilidad en la generación eléctrica para los tamaños de planta estudiados, considerando las siguientes productividades agrícolas: 6 y 10 Mg b.s./ha·año (variación del 20% sobre la productividad base asumida en el análisis de casos). Ver Tabla VIII.22.

**Tabla VIII.22. Análisis de sensibilidad (colza e.): productividad agrícola**

		Unidades	Casos de estudio											
			Esc. b1	Esc. b2	Esc. b3	Esc. b4	Esc. b5	Esc. b6	Esc. b7'	Esc. b8'	Esc. b9'	Esc. b10'	Esc. b11'	Esc. b12'
Potencia planta eléctrica		MW	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
6 Mg/ha	Coste de las pacas de colza e.	€/Mg b.s.	<b>85,3</b>	<b>87,3</b>	<b>85,8</b>	<b>88,4</b>	<b>86,2</b>	<b>89,7</b>	<b>82,9</b>	<b>85,6</b>	<b>84,8</b>	<b>86,1</b>	<b>85,0</b>	<b>86,4</b>
	PRI	años	10,5	10,8	6,8	7,0	4,8	5,0	-	-	-	-	18,8	19,5
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	3,5	2,4	38,4	35,3	120,8	113,2	-10,2	-10,7	-12,5	-12,9	-6,3	-6,7
	TIR	%	6,4	5,9	13,0	12,5	19,8	19,0	-	-	-	-	-2,2	-2,9
Esc. Base 8 Mg/ha	Coste de las pacas de colza e.	€/Mg b.s.	<b>65,6</b>	<b>67,1</b>	<b>65,8</b>	<b>68,1</b>	<b>66,3</b>	<b>69,2</b>	<b>63,1</b>	<b>65,7</b>	<b>64,9</b>	<b>66,1</b>	<b>65,2</b>	<b>66,5</b>
	PRI	años	7,9	8,0	5,4	5,6	4,0	4,1	-	-	55,1	65,1	11,7	12,0
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	14,1	13,3	62,5	59,6	164,8	157,9	-6,5	-7,0	-6,6	-6,9	0,3	-0,1
	TIR	%	10,7	10,4	17,4	16,9	24,4	23,7	-	-	-	-	5,0	4,7
10 Mg/ha	Coste de las pacas de colza e.	€/Mg b.s.	<b>53,7</b>	<b>55,1</b>	<b>53,9</b>	<b>55,9</b>	<b>54,3</b>	<b>56,9</b>	<b>51,3</b>	<b>53,7</b>	<b>53,0</b>	<b>54,2</b>	<b>53,3</b>	<b>54,5</b>
	PRI	años	6,9	7,0	4,8	4,9	3,6	3,7	137,7	-	18,4	19,4	9,6	9,7
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	20,5	19,7	76,7	74,4	191,0	185,2	-4,3	-4,7	-3,3	-3,6	3,9	3,6
	TIR	%	13,0	12,8	19,9	19,5	27,1	26,5	-	-	-4,1	-5,7	7,8	7,6
<b>% Variación media del VAN</b>		$\Delta$ ( $\pm$ %)	60,3	65,0	30,6	32,8	21,3	22,8	45,4	42,9	69,7	67,4	1.700	5.150

**Tabla VIII.23. Análisis de sensibilidad (colza e.): inversión de la planta eléctrica**

		Unidades	Casos de estudio											
			Esc. b1	Esc. b2	Esc. b3	Esc. b4	Esc. b5	Esc. b6	Esc. b7'	Esc. b8'	Esc. b9'	Esc. b10'	Esc. b11'	Esc. b12'
Potencia planta eléctrica		MW	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
-20% Invers.	Inversión	10 <sup>6</sup> €	<b>21,2</b>	<b>21,2</b>	<b>40,4</b>	<b>40,4</b>	<b>65,0</b>	<b>65,0</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>11,9</b>	<b>11,9</b>
	PRI	años	6,5	6,6	4,4	4,5	3,3	3,4	-	-	35,8	40,9	9,4	9,6
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	18,2	17,5	70,3	67,5	177,5	170,6	-5,4	-5,9	-4,8	-5,1	3,1	2,8
	TIR	%	14,0	13,6	22,0	21,4	30,4	29,6	-	-	-	-	7,9	7,5
Esc. base	Inversión	10 <sup>6</sup> €	<b>26,5</b>	<b>26,5</b>	<b>50,5</b>	<b>50,5</b>	<b>81,2</b>	<b>81,2</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>7,2</b>	<b>7,2</b>	<b>14,8</b>	<b>14,8</b>
	PRI	años	7,9	8,0	5,4	5,6	4,0	4,1	-	-	55,1	65,1	11,7	12,0
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	14,1	13,3	62,5	59,6	164,8	157,9	-6,5	-7,0	-6,6	-6,9	0,3	-0,1
	TIR	%	10,7	10,4	17,4	16,9	24,4	23,7	-	-	-	-	5,0	4,7
+20% Invers.	Inversión	10 <sup>6</sup> €	<b>31,8</b>	<b>31,8</b>	<b>60,6</b>	<b>60,6</b>	<b>97,5</b>	<b>97,5</b>	<b>4,9</b>	<b>4,9</b>	<b>8,6</b>	<b>8,6</b>	<b>17,8</b>	<b>17,8</b>
	PRI	años	9,2	9,4	6,4	6,5	4,8	4,9	-	-	95,4	122,7	14,0	14,4
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	10,1	9,2	54,5	51,7	152,2	145,4	-7,6	-8,1	-8,6	-8,8	-2,8	-3,2
	TIR	%	8,4	8,1	14,3	13,8	20,3	19,7	-	-	-	-	2,7	2,4
<b>% Variación media del VAN</b>		$\Delta$ ( $\pm$ %)	28,7	31,2	12,6	13,3	7,7	8,0	16,9	15,7	28,8	26,8	983,3	3.000

Una disminución en la productividad agrícola de colza e. produce un aumento del coste final de la biomasa y, consecuentemente, eleva el coste operativo de las plantas de generación eléctrica. En base a los nuevos valores calculados del indicador VAN, una disminución del 20% de la productividad agrícola puede arriesgar la viabilidad de las plantas de 10 y 25 MW, e influir muy negativamente en las plantas de menor potencia, que no podrían asumir el elevado coste de la biomasa.

En el caso contrario, un aumento de la productividad agrícola en un 20% contribuye en la disminución del coste de la biomasa hasta niveles aceptables en las plantas de 5 y 10MW, mejorando sus resultados económicos.

En las plantas de mayor potencia, una variación del 20% de la productividad agrícola afectaría en más de un 60% al valor del VAN en plantas de 10 MW, en más de un 30% en las plantas de 25 MW y en un 20% en las plantas de mayor potencia.

#### **8.9.4.4. Análisis de sensibilidad: Variación de la inversión en planta**

El análisis de sensibilidad muestra como una variación del valor de la inversión en un  $\pm 20\%$  afecta en menor grado a la viabilidad de las plantas eléctricas que la variación de la productividad agrícola. En las plantas de menor potencia (1, 2 y 5 MW), una disminución de la inversión no resuelve la falta de rentabilidad de estos sistemas, debido a que se mantienen los elevados costes operativos por el alto coste y elevado consumo de biomasa.

El aumento del 20% de la inversión repercute en la evolución negativa de los indicadores económicos. Como ha sido señalado en el anterior análisis de sensibilidad, solamente las plantas de mayor potencia pueden asumir un aumento de costes respecto al valor inicial considerado debido a los mayores ingresos previstos por la venta de la electricidad generada.

### **8.9.5. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica a partir de chopo**

#### **8.9.5.1. Costos de explotación de las plantas eléctricas con chopo**

La Tabla VIII.24 muestra los costos de explotación y los resultados económicos de las plantas eléctricas con chopo de pequeña potencia (1, 2 y 5 MW) y de mediana-elevada potencia (10, 25 y 49 MW).

### **8.9.5.2. Discusión de los resultados**

Como ya ha sido demostrado anteriormente, el menor coste del chopo como combustible en comparación al de la colza e. es el factor que contribuye a la rentabilidad de los sistemas de generación eléctrica de cualquier tamaño (des de 1 hasta 49 MW, y mayor potencia). El coste de la biomasa representa el 35-43% de los costes totales de las plantas de todos los tamaños. La amortización contribuye en un 31-38% y el resto de costes O+M en un 23-28%, ambos sobre los costes totales.

La aprobación de las tarifas eléctricas para la generación de energía con cultivos energéticos como el chopo contribuye en la promoción de estos sistemas debido a su rentabilidad. En los indicadores económicos se muestran valores muy interesantes en cuanto a viabilidad.

Para las plantas de generación eléctrica mayores de 10 MW, los PRI calculados son inferiores a 4,8 años; los valores VAN son superiores a 41,6 millones de euros, valor septuplicado en plantas de 49 MW; y los TIR mínimos son de 20%.

Para las plantas de menor potencia, los PRI calculados son inferiores a 10 años; los valores VAN son superiores a 1,2 millones de euros para 1MW instalado, y mayores cuanto más elevada es la potencia instalada; y el valor mínimo de los TIR es de 8%.

En las plantas de generación eléctrica de 1, 2 y 5MW con chopo, los indicadores económicos muestran valores muy significativos. Según los resultados calculados, sería viable la implantación de estos sistemas en un contexto de valorización energética de escala regional y local.

### **8.9.5.3. Análisis de sensibilidad: Variación de la productividad agrícola de chopo**

Una variación del  $\pm 20\%$  de la productividad agrícola del chopo respecto al valor inicial asumido de 13,5 Mg b.s./ha·año, afecta de un modo poco significativo a la viabilidad de las plantas eléctricas. Los nuevos valores de los indicadores económicos muestran una variación del VAN del 2-3% en plantas de mediana-elevada potencia, y de más del 10% en las plantas de 1 y 2 MW, ambos porcentajes respecto a los valores de los escenarios inicialmente estudiados.

Tabla VIII.24. Análisis de viabilidad de las plantas eléctricas chopo como combustible (tarifas eléctricas del RD 661/2007)

	Unidades	Casos de estudio											
		Esc. ch1	Esc. ch2	Esc. ch3	Esc. ch4	Esc. ch5	Esc. ch6	Esc. ch7'	Esc. ch8'	Esc. ch9'	Esc. ch10'	Esc. ch11'	Esc. ch12'
Potencia planta	MW	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
Cd	%	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10
Inversión	10 <sup>3</sup> €	26,470	26,470	50,530	50,530	81,220	81,220	4,130	4,130	7,160	7,160	14,830	14,830
<b>INGRESOS</b>													
Ingresos des del año 1º al 15º	10 <sup>3</sup> €/año	9,970	9,970	24,920	24,920	50,570	50,570	1,020	1,020	2,030	2,030	4,690	4,690
Ingresos a partir del 15º año	10 <sup>3</sup> €/año	8,400	8,400	20,990	20,990	42,590	42,590	750	750	1,510	1,510	3,950	3,950
<b>GASTOS</b>													
Costes O+M													
Coste biomasa	10 <sup>3</sup> €/año	1.240	1.270	2.810	2.880	5.140	5.350	280	290	440	450	710	730
Costes laborales	10 <sup>3</sup> €/año	210	210	310	310	490	490	40	40	70	70	140	140
Costes Mantenimiento planta	10 <sup>3</sup> €/año	400	400	760	760	1.240	1.240	60	60	110	110	220	220
<b>TOTAL O+M</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>1.850</b>	<b>1.880</b>	<b>3.880</b>	<b>3.950</b>	<b>6.870</b>	<b>7.080</b>	<b>380</b>	<b>390</b>	<b>620</b>	<b>630</b>	<b>1.070</b>	<b>1.090</b>
Otros costes													
Seguros	10 <sup>3</sup> €/año	260	260	500	500	810	810	40	40	70	70	140	140
Disposición cenizas	10 <sup>3</sup> €/año	80	80	190	190	350	350	20	20	30	30	50	50
<b>Total Otros Costes</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>340</b>	<b>340</b>	<b>690</b>	<b>690</b>	<b>1.160</b>	<b>1.160</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>200</b>
Amortización planta	10 <sup>3</sup> €/año	1.320	1.320	2.530	2.530	4.060	4.060	210	210	360	360	740	740
<b>COSTES TOTALES DE LA PLANTA</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>3.510</b>	<b>3.540</b>	<b>7.090</b>	<b>7.160</b>	<b>12.090</b>	<b>12.480</b>	<b>650</b>	<b>660</b>	<b>1.080</b>	<b>1.090</b>	<b>2.010</b>	<b>2.030</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>													
<b>Período des del año 1 al 15</b>													
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	6.460	6.430	17.830	17.760	39.480	38.270	370	360	950	940	2.680	2.660
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	2.260	2.250	6.240	6.220	13.470	13.390	130	130	330	330	940	930
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	4.200	4.180	11.590	11.540	25.010	24.880	240	230	620	610	1.740	1.730
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	5.520	5.500	14.100	14.060	29.070	28.940	450	440	980	970	2.480	2.470
<b>Período des del año 16 al 20</b>													
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	4.880	4.860	13.900	13.830	30.500	30.290	100	90	430	420	1.940	1.920
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	1.710	1.700	4.870	4.840	10.680	10.600	30	30	150	150	680	670
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	3.180	3.160	9.040	8.990	19.830	19.690	70	60	280	270	1.260	1.250
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	4.500	4.480	11.560	11.510	23.890	23.750	280	270	640	630	2.000	1.990
<b>Indicadores económicos</b>													
PRI	años	4,8	4,8	3,6	3,6	2,8	2,8	9,2	9,4	7,3	7,4	6,0	6,0
VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	41,6	41,3	123,6	122,9	277,6	275,9	1,2	1,1	4,6	4,4	15,7	15,6
TIR	%	20,2	20,1	27,6	27,5	35,7	35,5	8,3	7,9	11,8	11,7	15,6	15,5

**Tabla VIII.25. Análisis de sensibilidad (chopo): productividad agrícola**

		Unidades	Escenarios											
			Esc. ch1	Esc. ch2	Esc. ch3	Esc. ch4	Esc. ch5	Esc. ch6	Esc. ch7'	Esc. ch8'	Esc. ch9'	Esc. ch10'	Esc. ch11'	Esc. ch12'
Potencia de la planta eléctrica		MW	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
11 Mg/ha	Coste chopo astillado en planta	€/Mg b.s.	<b>23,0</b>	<b>23,4</b>	<b>23,3</b>	<b>23,7</b>	<b>23,2</b>	<b>24,0</b>	<b>22,9</b>	<b>23,2</b>	<b>22,7</b>	<b>23,1</b>	<b>23,2</b>	<b>23,6</b>
	PRI	años	4,9	4,9	3,7	3,7	2,8	2,9	9,8	9,8	7,7	7,7	6,2	6,2
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	39,8	39,5	119,6	119,1	270,5	268,8	0,8	0,8	3,9	3,9	14,7	14,6
	TIR	%	19,6	19,5	27,0	26,9	35,0	34,8	7,2	7,2	11,0	11,0	15,0	14,9
Esc. Base 13,5 Mg/ha	Coste chopo astillado en planta	€/Mg b.s.	<b>19,6</b>	<b>20,1</b>	<b>19,9</b>	<b>20,4</b>	<b>19,9</b>	<b>20,7</b>	<b>19,6</b>	<b>19,9</b>	<b>19,4</b>	<b>19,7</b>	<b>19,8</b>	<b>20,2</b>
	PRI	años	4,8	4,8	3,6	3,6	2,8	2,8	9,2	9,4	7,3	7,4	6,0	6,0
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	41,6	41,3	123,6	122,9	277,6	275,9	1,2	1,1	4,6	4,4	15,7	15,6
	TIR	%	20,2	20,1	27,6	27,5	35,7	35,5	8,3	7,9	11,8	11,7	15,6	15,5
16 Mg/ha	Coste chopo astillado en planta	€/Mg b.s.	<b>17,4</b>	<b>17,8</b>	<b>17,5</b>	<b>18,1</b>	<b>17,6</b>	<b>18,4</b>	<b>17,3</b>	<b>17,6</b>	<b>17,1</b>	<b>17,4</b>	<b>17,5</b>	<b>17,9</b>
	PRI	años	4,7	4,7	3,5	3,5	2,8	2,8	8,8	8,8	7,1	7,1	5,9	5,9
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	42,7	42,5	126,4	125,6	282,5	280,8	1,5	1,5	5,0	5,0	16,3	16,3
	TIR	%	20,5	20,5	28,1	28,0	36,1	36,0	8,9	8,9	12,4	12,4	16,0	16,0
<b>% Variación media del VAN</b>		$\Delta$ (±%)	3,5	3,6	2,8	2,6	2,2	2,2	29,2	31,8	12,0	12,5	5,1	5,4

**Tabla VIII.26. Análisis de sensibilidad (chopo): inversión de la planta eléctrica**

		Unidades	Escenarios											
			Esc. ch1	Esc. ch2	Esc. ch3	Esc. ch4	Esc. ch5	Esc. ch6	Esc. ch7'	Esc. ch8'	Esc. ch9'	Esc. ch10'	Esc. ch11'	Esc. ch12'
Potencia de la planta eléctrica		MW	10	10	25	25	49	49	1	1	2	2	5	5
-20% Invers.	Inversión	10 <sup>6</sup> €	<b>21,2</b>	<b>21,2</b>	<b>40,4</b>	<b>40,4</b>	<b>65,0</b>	<b>65,0</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>11,9</b>	<b>11,9</b>
	PRI	años	3,9	3,9	2,9	2,9	2,3	2,3	7,3	7,5	5,9	5,9	4,8	4,8
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	45,7	45,5	131,4	130,8	290,3	288,5	2,0	1,9	5,9	5,9	18,6	18,4
	TIR	%	25,2	25,1	34,3	34,2	44,2	44,0	11,7	11,3	15,7	15,7	20,2	20,0
Esc. base	Inversión	10 <sup>6</sup> €	<b>26,5</b>	<b>26,5</b>	<b>50,5</b>	<b>50,5</b>	<b>81,2</b>	<b>81,2</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>7,2</b>	<b>7,2</b>	<b>14,8</b>	<b>14,8</b>
	PRI	años	4,8	4,8	3,6	3,6	2,8	2,8	9,2	9,4	7,3	7,4	6,0	6,0
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	41,6	41,3	123,6	122,9	277,6	275,9	1,2	1,1	4,6	4,4	15,7	15,6
	TIR	%	20,2	20,1	27,6	27,5	35,7	35,5	8,3	7,9	11,8	11,7	15,6	15,5
+20% Invers.	Inversión	10 <sup>6</sup> €	<b>31,8</b>	<b>31,8</b>	<b>60,6</b>	<b>60,6</b>	<b>97,5</b>	<b>97,5</b>	<b>4,9</b>	<b>4,9</b>	<b>8,6</b>	<b>8,6</b>	<b>17,8</b>	<b>17,8</b>
	PRI	años	5,7	5,7	4,2	4,2	3,3	3,3	11,0	11,0	8,8	8,9	7,2	7,2
	VAN (tasa interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	37,4	37,2	115,7	115,1	265,0	263,3	0,4	0,4	3,1	3,0	12,7	12,6
	TIR	%	16,7	16,6	23,1	23,0	30,0	29,7	5,7	5,7	9,0	8,8	12,4	12,3
<b>% Variación media del VAN</b>		$\Delta$ (±%)	10,0	10,0	6,4	6,4	4,6	4,6	66,7	68,2	30,4	33,3	18,8	18,6

#### **8.9.5.4. Análisis de sensibilidad: Variación de la inversión en planta**

La variación de la inversión afecta de un modo más significativo en la viabilidad de las plantas eléctricas que la variación de la productividad agrícola del chopo. Este hecho es contrario a los casos estudiados con colza e., donde la influencia de la productividad agrícola sobre la viabilidad de la generación eléctrica es mayor debido al coste más elevado de la biomasa de colza.

El incremento o disminución de la inversión hasta un 20% tampoco comprometería la viabilidad de generación eléctrica con chopo para ningún tamaño de planta evaluado.

### **8.10. Conclusiones**

Del trabajo documentado en este capítulo se extraen las siguientes conclusiones:

- La aprobación del Real Decreto 661/2007 ha comportado un aumento significativo en las tarifas eléctricas pagadas por la electricidad generada con cultivos energéticos. Este hecho promueve la descentralización de la generación de energía renovable y la implantación de nuevas experiencias de producción de electricidad a partir de cultivos energéticos en un escenario local y regional.

#### **Generación eléctrica con Colza e.**

- Valores de productividad agrícola inferiores a 8 Mg b.s./ha hacen que la generación eléctrica con colza e. sea inviable en las plantas de generación eléctrica inferiores a 10 MW.
- Debido al elevado contenido de azufre de la biomasa de colza e, las plantas de generación eléctrica de igual os superior a 50MW requieren sistemas de desulfuración de gases para el tratamiento de sus emisiones. La instalación supone un incremento en la inversión y la agregación de nuevos costes O+M que limitan la generación de beneficios en sistemas de producción de energía de elevada potencia.
- La variación de la inversión en las plantas eléctricas con colza e. no implica la mejora significativa de la viabilidad para los tamaños de planta evaluados. La variación de la productividad agrícola es un factor que puede comprometer la viabilidad de estos sistemas.

- Asumiendo una productividad agrícola de la colza e. de 8 Mg b.s./ha·año, el coste final de esta biomasa dispuesta en una planta de generación eléctrica es de 63 – 69 €/Mg b.s.
- El coste de cultivo es factor que contribuye en mayor peso sobre el coste final del combustible de colza e. (87-90% sobre el coste final, asumiendo una productividad agrícola de 8 Mg b.s./ha).
- La carga, el transporte y la descarga de la biomasa en las plantas de generación eléctrica supone un coste añadido al coste de la colza en la cosecha de 6-10 €/Mg, representando un 10-13% sobre el precio final de la biomasa en planta.
- Aun triplicando el valor de la distancia a recorrer por los camiones del transporte, la distinta ocupación del cultivo en el territorio sólo contribuye en un incremento del coste de la colza e. de 1,4 - 2,4 €/Mg.

### **Generación eléctrica con chopo**

- La producción eléctrica a partir de chopo es viable económicamente para todos los casos de estudio seleccionados (1 a 49MW) debido al bajo coste relativo de producción de este cultivo energético (Siendo implantado en zonas donde el riego no afecte significativamente a la economía del proceso).
- Una variación del 20% del valor de la inversión de las plantas eléctricas o de la productividad agrícola del chopo no compromete la viabilidad de la generación eléctrica para ningún tamaño de planta evaluado.
- Asumiendo una productividad agrícola del chopo de 13,5 Mg b.s./ha.año, el coste final de la astilla dispuesta en la planta de generación eléctrica es de 19,6 - 20,7 €/Mg b.s. cuando el chopo es cosechado en forma de haces, y de 18,8 - 21,8 €/Mg b.s. cuando el chopo es triturado en su cosecha y seguidamente transportado (En el cálculo no se considera la pérdida de biomasa en ambas formas debido al almacenado y transporte).
- El coste de cultivo es factor que contribuye en mayor peso sobre el coste final del combustible de chopo (71-79% sobre el coste final, asumiendo una productividad agrícola de 13,5 Mg b.s./ha).
- La opción económicamente óptima entre las alternativas de cosecha y transporte estudiadas para la generación eléctrica con chopo es la producción de haces secados en el campo.

- La producción eléctrica utilizando chopo como combustible constituye una de las alternativas para cumplir el objetivo propuesto con cultivos energéticos por el vigente Plan de Energías Renovables Nacional.

## 8.11. Referencias

- [1] Proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología: "Evaluación de la Sostenibilidad Medio Ambiental de Cultivos Energéticos mediante el Análisis de Ciclo de Vida (Proyecto AGROSOST)". Referencia CTM 2004-05800-C03-01/TECNO. Diciembre 2004-2008.
- [2] Puy, N.; Martínez, S.; Bartrolí-Almera, J.; Rigola, M., Bartrolí-Molins, J.; Rieradevall, J. (2005). A viability analysis of sustainable implementation of energy production systems using biomass in Catalonia (Spain). 14th European Biomass Conference & Exhibition. Biomass for Energy Industry and Climate Protection. 17-21 Octubre, París (Francia).
- [3] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Real decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. BOE núm. 126 (2007).
- [4] Ministerio de Economía; Real Decreto 1432/2002, de 27 de diciembre, por el que se establece la metodología para la aprobación o modificación de la tarifa eléctrica media o de referencia y se modifican algunos artículos del Real Decreto 2017/1997, de 26 de diciembre, por el que se organiza y regula el procedimiento de liquidación de los costes de transporte, distribución y comercialización a tarifa, de los costes permanentes del sistema y de los costes de diversificación y seguridad de abastecimiento. BOE núm. 313 (2002).
- [5] Ministerio de Economía; Real Decreto 809/2006, de 30 de junio, por el que se revisa la tarifa eléctrica a partir del 1 de julio de 2006. BOE núm. 156 (2006).
- [6] Acciona Energía (2008). Planta de Biomasa por combustión de paja en Sangüesa. [En línea] Disponible en: <http://www.acciona-energia.com/> (Consulta: Julio 2008).
- [7] Ministerio de la Presidencia; Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. BOE núm. 69 (2004).
- [8] Energy Information Administration, Official Energy Statistics from the U.S. Government (EIA) (2002). EIA-767 Database; Annual Steam-Electric Plant Operation and Design Data, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.eia.doe.gov/> (Consulta: Noviembre 2008)
- [9] Srivastava, R.K. y Josewicz, W. (2001) Flue Gas Desulfurization: The State of the Art. Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 5, pp. 11676-1688.
- [10] Srivastava R.K. (2000), Controlling SO<sub>2</sub> emissions: a review of technologies. US EPA/600/R-00/093. [En línea] Disponible en: <http://www.epa.gov> (Consulta: Marzo 2008).
- [11] Llorente, M.J.F. et al (2006). Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering. Fuel. Vol. 85 (14-15), pp. 2081-2092.
- [12] Sáez, F. et al (2005) PAHs reduction from poplar biomass combustion process. DER-CIEMAT, Madrid.
- [13] Comunicación personal de Volvo Truck España S.A (Consulta: Febrero 2006).

- [14] Comunicación personal de Todaew S.A. Concesionario Oficial de la marca Toyota (Consulta: 2006).
- [15] Comunicación personal de Pilar Ciria (CIEMAT) (Consulta: Febrero 2006).
- [16] Arnó, J. y Masip, J. (2003) Cost horari de la màquinaria forestal. Quaderns d'Infomació Tècnica 7. Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona. Barcelona (España).
- [17] Resolución de 4 de abril de 2003, de la Dirección General de Trabajo, por la que se dispone la inscripción en el registro y publicación del Convenio Colectivo de la empresa BL, Servicios Logísticos Integrales, S.L. Madrid. BOE nº 94 (2003)
- [18] Volvo Truck (2006). Emission from Volvo's Truck Emissions, standard diesel fuel. [En línea] Disponible en: <http://www.volvotruck.com> (Consulta: Febrero 2006)
- [19] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2006). Precios Carburantes. Comparación entre 2005-2006. [En línea] Disponible en: <http://www.mityc.es/Petroleo/Seccion/PRecios/Informes/InformesAnuales> (Consulta: Febrero 2006)
- [20] Caputo, A.C. et al. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. Biomass & Bioenergy. Vol. 28. pp.: 35-51.
- [21] Carrasco, J.E. y Esteban, L.S. (2004). Análisis económico de centrales de generación eléctrica con biomasa. CIEMAT.
- [22] VandenBroek, R.; Faaij, A. y van Wijk, A. (1995). Biomass combustion, Power Generation Technologies. Energy from biomass: an assessment of two promising systems for energy production. Background report 4.1. Department of Science, Tecnology and Society. Utrecht University (The Netherlands).
- [23] VandenBroek, R.; Faaij, A. y van Wijk, A. (1996). Biomass combustion for power generation. Biomass & Bioenergy. Vol. 11 (4) pp. 271-281.
- [24] Marshall & Shift. Cost Index. Chemical Engineering 2007.
- [25] International Energy Agency (2003). Renewables for power generation, Status and Prospects. 2003 Edition. Paris (Francia).
- [26] European Commission (1998). Biomass conversion technologies, achievement and prospects for heat and power generation. European Commission Directorate-General Science, Research and Development. 1998. Bruselas.
- [27] The Centre for Biomass Technology (1998). Straw for energy Production. Technology – Environment – Economy. Second Edition. Dinamarca.
- [28] Bundesinitiative Bioenergie (2002). Markt- und Kostenentwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Alemania.
- [29] Emde B. (2005). Energetische Nutzung von Biomasse in Südwestfalen. Fachbereich Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften Fachhochschule Südwestfalen. Südwestfalen, Alemania.
- [30] European Commission (2004). Small-scale biomass CHP technologies: Situation in Finland, Denmark and Sweden. OPET Report 12. VTT Processes and Finnish District Heating Association.
- [31] R. Brealey & S. Myers (1990). Principios de Finanzas Corporativas. McGraw Hill. 2ª Ed. 1990. España.
- [32] Banco Central Europeo (2006). [En línea] Disponible en: <http://www.ecb.int/home/html/indexen.html> (Consulta: Octubre 2006)

Capítulo 9.

**Análisis de viabilidad de la generación  
eléctrica con biomasa de elevado  
contenido en azufre.**

**Análisis Coste-Beneficio relativo a la  
emisión de SO<sub>2</sub>**

---



## 9. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIOMASA DE ELEVADO CONTENIDO EN AZUFRE. ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO RELATIVO A LA EMISIÓN DE SO<sub>2</sub>

### 9.1. Introducción y objetivos

Como se ha demostrado en el capítulo anterior, la combustión de la colza e. genera emisiones con un elevado contenido de azufre. Según la legislación vigente (Real Decreto 430/2004), cuando las emisiones en la combustión de biomasa superan la concentración de 200 mg SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>N, es obligatoria la instalación de sistemas de desulfuración de los gases de combustión en las instalaciones de potencia mayor de 50MW. Esta legislación no afecta por tanto a plantas de combustión de baja potencia.

Para satisfacer la legislación, la solución que se puede adoptar cuando se utiliza un único combustible es limitar la capacidad de la planta a 49 MW, en cuyo caso no requiere tratamiento. Alternativamente se puede mezclar la biomasa que contiene azufre (Tabla IX.1) con otra biomasa/combustible que no contenga azufre en la proporción suficiente para cumplir los criterios de emisión. Una tercera vía es llevar la biomasa con contenido en azufre a la co-combustión en plantas térmicas que utilizan carbón que disponen de sistemas avanzados para el tratamiento de los gases de combustión con SO<sub>x</sub>.

El presente Capítulo 8 se centra en el estudio de dos alternativas de combustión para el análisis de la generación eléctrica a partir del uso de estos tipos de combustibles. Las alternativas de combustión analizadas son las siguientes:

- Co-combustión de carbón con Colza e. en plantas térmicas con quema de carbón;
- Mezcla de cultivos energéticos en plantas de generación eléctrica con biomasa.

La combustión conjunta de carbón con biomasa (co-combustión) en plantas térmicas presenta ventajas económicas y ambientales: **(a)** Existen incentivos económicos que promueven el uso de la biomasa en la generación eléctrica (Real Decreto 661/2007), **(b)** Se produce una reducción del balance de emisiones que contribuyen al Cambio Climático y la disminución de gases de SO<sub>2</sub> que generan la lluvia ácida [1], y **(c)** Es posible la venta de créditos de emisión de CO<sub>2</sub> asignados a las

**Tabla IX.1. Análisis elemental de la biomasa**

Grupo	Subgrupo	C	H	O	N	S	Cl	F
Madera sin tratar	Hojas	49,1	6,0	42,6	2,22	0,09	-	-
	Corteza	53,7	5,8	40,2	0,38	0,06	0,021	-
	Roble	49,9	6,2	43,7	0,2	0,05	0,024	-
	Abedul	48,8	6,08	44,9	0,15	0,04	-	-
	Haya	49,1	6,01	44,6	0,25	0,02	0,008	0,001
	Álamo	49,7	6,06	43,9	0,38	0,03	0,034	-
	Sauce	49,8	6,09	43,1	0,61	0,06	0,02	0,003
	Madera dura tropical	47,8	5,95	45	1,21	0,19	0,483	-
	Otras maderas duras	50,3	6,02	43,3	0,27	0,04	0,032	0,002
	Pino/abeto	51,3	6,14	42,3	0,15	0,07	0,05	-
	Otras maderas blandas	51,8	6,36	41,6	0,28	0,19	0,061	-
Otras	51,1	6,1	42,4	0,41	0,03	0,041	-	
Hierbas	Alfalfa	50,3	5,94	40,6	2,69	0,19	0,427	-
	Algodón	48,3	5,92	44,6	1,38	0,41	0,085	-
	Lino	50	5,79	43	0,79	0,13	0,22	-
	Caña de azúcar	48,5	5,98	44,7	1,14	0,1	0,067	-
	Otras hierbas	49,3	5,9	42,6	1,75	0,16	0,55	-
	Flores/Plantas de jardín	51,4	5,37	41	1,07	0,51	0,631	-
	Miscantus	49,6	5,74	43,9	0,52	0,08	0,213	0,002
	Yute	52	7,38	39	2,37	0,25	-	-
Paja	Trigo	49	5,93	43,8	0,77	0,16	0,507	0,001
	Maíz/Cereal	44,6	5,67	42,2	0,96	0,08	0,223	-
	sorgo	48,2	5,73	43,7	0,91	0,08	0,332	-
	Colza (para biodiesel)	50,8	6,43	40	2,22	0,5	0,33	-
	Cebada	48,3	6,03	44,4	0,77	0,16	0,458	-
	Arroz	48,9	6,03	43,3	0,98	0,13	0,46	-
	centeno	49,2	6,09	44,1	0,59	0,09	0,243	-
Cultivos industriales	Almendros	49,8	6,13	43	0,97	0,04	0,04	-
	Olivos	51,2	6,42	41,2	1,31	0,13	0,146	-
	Nogal	53,3	6,38	39,4	1,07	0,09	0,024	-
	Girasol	51,5	6,01	41,6	0,88	0,14	0,08	-
	Coco	46,8	5,52	47,5	0,32	0,23	0,291	-
	Cacao	51,7	5,93	38,2	3,41	0,21	0,052	0,001
	Avellana	49	5,76	44,3	0,73	0,55	-	-

Fuente: Adaptado de [2].

instalaciones de combustión de combustibles fósiles que describe el Real Decreto 1370/2006 (Plan Nacional de Asignación de derechos de emisiones de CO<sub>2</sub>).

Conjuntamente a los incentivos mencionados, el precio internacional del carbón ha aumentado en los últimos años debido a la creciente demanda internacional de éste recurso por los países industrializados. A modo de ejemplo, el precio de referencia del carbón Noroeste-europeo se ha incrementado desde 31,6 a 63,7 dólares americanos (US\$) la tonelada en el período 2002-2006, alcanzando un máximo de 71,9 US\$/tonelada en el año 2004 [3]. Cabe señalar que el precio del carbón puede adoptar una tendencia ascendente similar a la del precio del barril de petróleo.

La mezcla de colza e. con otro combustible de biomasa con bajo contenido en azufre puede permitir la supresión del sistema de desulfuración si los gases emitidos cumplen los límites legales

establecidos. Para efectuar una correcta mezcla de combustibles de biomasa es necesario conocer las características de los combustibles implicados y de los gases producidos en su combustión.

Por otro lado, cualquier combustión sin eliminación del SO<sub>x</sub> en los gases de combustión genera externalidades ambientales en la emisión de SO<sub>2</sub>. Esta externalidad se traduce en un coste sobre la salud humana y en posibles daños en el entorno físico (destrucción de bosques, daños en cultivos.). La instalación de un sistema de desulfuración permite la reducción de las externalidades generadas por la emisión excesiva de SO<sub>2</sub>. Por otro lado, limitar la capacidad de una planta a 49 MW puede ser una solución económica, pero no necesariamente correcta desde el punto de vista ambiental. Por ello se ha realizado un análisis Coste-Beneficio para contrastar ambos criterios. El análisis Coste-Beneficio permite disponer de una imagen más clara del impacto ambiental, particularmente sobre la salud humana, y de lo apropiado que pueda ser hacer inversiones adicionales de recursos económicos, siempre escasos.

## 9.2. Metodología del estudio

Se ha estudiado la viabilidad económica de dos alternativas para la combustión de Colza e. como cultivo energético con elevado contenido en azufre:

- Co-combustión de Colza e. con carbón en una planta térmica de carbón de mediana potencia (300 MW)
- Mezcla y combustión conjunta de Colza e. con otro combustible de biomasa de bajo contenido en azufre (Chopo) en la proporción suficiente para no requerir un tratamiento de eliminación de SO<sub>x</sub> de los gases de combustión, en plantas de generación eléctrica de pequeña-mediana potencia: 25 y 50 MW.

La viabilidad económica de las alternativas mencionadas será comparada con la viabilidad resultante del uso de una potencia menor a la limitante según la ley: 49 MW. Los datos procederán de los resultados obtenidos en el Capítulo anterior (Capítulo 8).

## 9.2.1. Co-combustión de carbón con biomasa en la generación eléctrica

### 9.2.1.1. Características de las plantas eléctricas con quema de carbón

Para el análisis se ha considerado un tamaño de referencia de planta termoeléctrica de carbón de 300 MW. La rentabilidad de la quema de carbón para esta potencia será comparada con la proporcionada por dos co-combustiones definidas por los siguientes ratios de potencias brutas asociadas al consumo de cada combustible:

- 275 MW de carbón + 25 MW de Colza e.
- 250 MW de carbón + 50 MW de Colza e.

Los principales componentes que caracterizan a una planta termoeléctrica de carbón son los siguientes: **(a)** la caldera de combustión, **(b)** el precipitador electrostático para el control de partículas y **(c)** el sistema de desulfuración húmedo con piedra caliza preparada (Figura IX.1). Para el estudio de costes de la planta se ha utilizado el modelo *Integrated Environmental Control Model* (IECM) [4,5]. Los costes operativos de las plantas eléctricas analizadas se muestran en la Tabla IX.2. Los costes directos e indirectos de la inversión han sido adaptados de estudios previos [6,7]. La amortización se ha calculado para un período de 20 años.

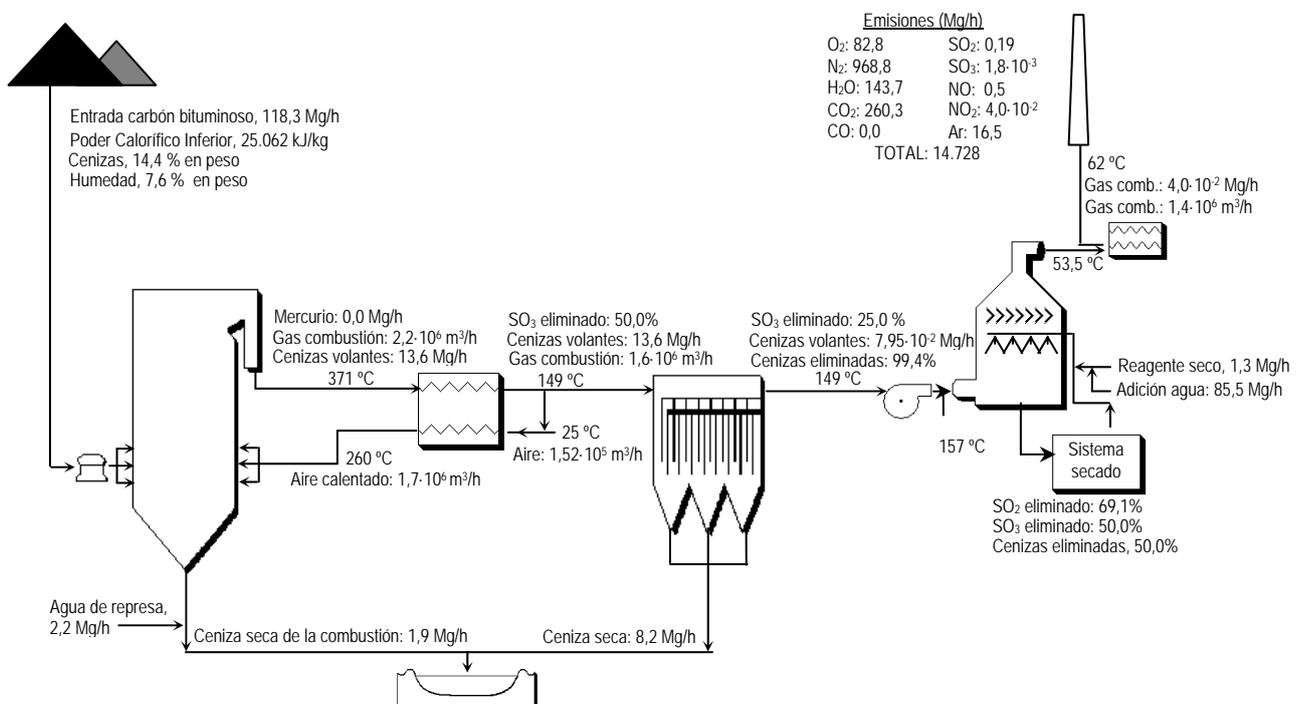


Figura IX.1. Diagrama de proceso de una planta termoeléctrica de carbón de 300MW (IECM)

**Tabla IX.2. Parámetros operativos de la planta de 300 MW con carbón**

	Unidades	Valor
Potencia eléctrica neta <sup>(a,b)</sup>	MW	275,7
Horas operativas <sup>(a)</sup>	h/año	6.575
Factor de capacidad <sup>(a)</sup>	%	75
Coste del carbón consumido	€/Mg	45
Coste de la biomasa consumida	€/Mg b.s.	65
Coste de la caliza	€/Mg	11,3
Coste agua	€/1000 l	0,657
Número de trabajadores	-	100
Coste labor	€/h	18,7

(a) Valores dados por el IECM; (b) Se incluye el autoconsumo de la planta. 1\$US = 1,323 (año 2006).

**Tabla IX.3. Características físico-químicas del carbón bituminoso.**

Concepto	Units	C. bituminoso [8]
PCI (Poder Calorífico Inferior)	kJ/kg b.s.	25,060
Contenido humedad	% peso, b.h.	7,6
Carbono	% peso, b.s.	71,5
Hidrógeno	% peso, b.s.	3,91
Nitrógeno	% peso, b.s.	1,79
Azufre	% peso, b.s.	0,50
Cloro	% peso, b.s.	-
Oxígeno	% peso, b.s.	6,69
Cenizas	% peso, b.s.	15,61

### **9.2.1.2. Características y costes de los combustibles intervenidos en el análisis**

Para el análisis de viabilidad, se ha seleccionado un carbón bituminoso actualmente usado como combustible en plantas térmicas españolas [8]. Sus propiedades físico-químicas se resumen en la Tabla IX.3. Se ha asumido coste del carbón de 45 €/Mg de acuerdo a los precios actuales del mercado internacional del carbón [3].

Para el combustible de biomasa, se ha asumido un precio medio de la colza e suministrada en planta de 65 €/Mg b.s. de acuerdo a los valores calculados en el Capítulo anterior. Las características físico-químicas de la colza e. se muestran en la Tabla VIII.6.

### **9.2.1.3. Ingresos obtenidos por la venta de electricidad producida**

La Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, es la que revisa los costes y ajusta las tarifas para la venta de energía eléctrica y las tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica que aplican las empresas. Se ha asumido como ingreso por la venta de electricidad

producida con carbón, el valor equivalente a la tarifa básica aplicada a la conexión de larga utilización de una corriente mayor de 145kV, de 55,3 €/MWh [9].

Para el cálculo del ingreso de la electricidad producida a partir de la combustión de biomasa se ha considerado las mismas tarifas adoptadas en el Capítulo 7 (del Real Decreto 611/2007 [10])

### **9.2.1.4. Indicadores económicos**

Para determinar la viabilidad económica de las plantas de 300 MW consideradas en el estudio, se han utilizado los siguientes indicadores económicos: PRI, VAN y TIR [11]. El VAN se ha calculado para un periodo de 20 años, tomando como tasa de interés el valor de 4,75% [12].

## 9.2.2. La mezcla de combustibles de biomasa en la generación eléctrica

### **9.2.2.1. Mezcla de cultivos energéticos necesaria para evitar un sistema de desulfuración**

La mezcla de combustibles de biomasa de Colza e. y de chopo que permite evitar la instalación del sistema de desulfuración en la generación eléctrica se ha determinado a partir de: La composición elemental de ambas biomásas (Tabla VII.6) y la cantidad media de azufre que, por mineralización y deposición en las cenizas, es evitada de ser emitida a la atmósfera en forma de gases de SO<sub>2</sub> (37,5%) [13,14]. Se ha considerado un nivel máximo de emisión de SO<sub>2</sub> de 200 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>, valor indicado en el Real Decreto 430/2004 [15].

### **9.2.2.2. Suministro de biomasa en las plantas eléctricas**

Se ha calculado el requerimiento de combustible de biomasa para las plantas eléctricas evaluadas y el coste asociado a éste suministro en la planta eléctrica final (cultivo, cosecha, carga, transporte y descarga). La metodología utilizada para el cálculo del coste de la biomasa se describe en el apartado 8.4. *Obtención y suministro de la biomasa al punto de consumo*, del Capítulo 8. Se han adoptado las mismas productividades agrícolas para la colza e y el chopo: 8 Mg b.s./ha para la colza e., y 13,5 Mg b.s./ha para el chopo.

A modo de simplificar el número de casos de estudios para evaluar, se ha considerado un porcentaje de ocupación de los cultivos energéticos alrededor de la planta de generación eléctrica del 50%.

### **9.2.2.3. Inversiones y costes O+M de las plantas eléctricas con biomasa analizadas**

Se ha analizado la viabilidad de la generación eléctrica de la mezcla de los dos cultivos en la proporción necesaria para evitar el sistema de desulfuración. Los tamaños de planta analizados son: 25 y 50 MW. Se ha asumido las mismas características tecnológicas y la metodología para el cálculo del coste (inversión, O+M) de los equipos que conforman las plantas de generación eléctrica con biomasa, descritas en el anterior apartado 8.7. *Inversiones y costes O+M en plantas de generación eléctrica con biomasa*, del Capítulo 8.

A diferencia de los casos anteriormente analizados en el Capítulo 8, el siguiente análisis de viabilidad considerará la instalación de un sistema de desulfuración en las plantas de generación eléctrica con biomasa de 25 y 50 MW.

Se ha elegido como mecanismo de desulfuración la Oxidación Forzada con Piedra Caliza debido a los costes de inversión y O+M más bajos en relación a otros sistemas como la aspersion en seco. La inversión del equipo de desulfuración se ha calculado en función de la cantidad de azufre que es necesario eliminar [15,14], adoptando la metodología de cálculo empleada por *Srivastava, K., 2000*, aprobada por la EPA [16]. Los costes directos e indirectos de la inversión del equipo de desulfuración se han calculado a partir estudios previos sobre sistemas de combustión de biomasa [6,7]. La amortización del sistema de desulfuración se ha calculado para un periodo de 20 años.

Los costes operativos y de mantenimiento del sistema de desulfuración se han calculado mediante el modelo de cálculo de costes de desulfuración de gases aprobado por la EPA [16].

### **9.2.2.4. Ingresos obtenidos por la venta de electricidad producida**

Para el cálculo del ingreso de la electricidad producida a partir de la combustión de biomasa se ha considerado las mismas tarifas adoptadas en el Capítulo 7 (según el Real Decreto 611/2007 [10]).

### **9.2.2.5. Indicadores económicos**

Para determinar la viabilidad económica de biomasa consideradas en el estudio, se han utilizado los siguientes indicadores económicos: PRI, VAN y TIR [11]. El VAN se ha calculado para un periodo de 20 años, tomando como tasa de interés el valor de 4,75% [12].

## **9.3. Análisis de viabilidad de las alternativas de combustión en la generación eléctrica con combustibles de alto contenido en azufre**

### **9.3.1. Co-combustión de carbón con biomasa**

#### **9.3.1.1. Costes de explotación de las plantas de co-combustión de carbón y colza e.**

La Tabla IX.4 muestra los costos de explotación y los resultados económicos de las plantas eléctricas de carbón y co-combustión de carbón con colza e.: **(C.1)** combustión única de carbón y **(C.2 y C.3)**.co-combustión de carbón y Colza e. en las proporciones indicadas anteriormente.

#### **9.3.1.2. Discusión de los resultados**

La inversión necesaria para la construcción de una nueva planta térmica de carbón es muy elevada, siendo no-rentable si se asumen los costes de inversión. La adaptación de una planta térmica convencional a una de co-combustión de carbón con biomasa no implica un cambio drástico en la configuración. La inversión adicional resultante de esta adaptación es asumible como alternativa a la construcción de una nueva planta térmica de co-combustión.

En la operación de las plantas de co-combustión, la menor densidad energética de la Colza e. respecto al carbón y su más elevado coste, repercuten en un aumento de las toneladas absolutas de combustible consumido en la planta eléctrica y en un incremento del coste operativo. La composición química de los combustibles de carbón y colza e. muestra un contenido similar en azufre (Tabla IX.3 y Tabla VIII.6). El uso de una cantidad superior de colza por kWh producido repercute en el aumento

**Tabla IX.4. Análisis económico y financiero de la generación eléctrica en una planta térmica de carbón y de co-combustión de carbón con biomasa de 300 MW.**

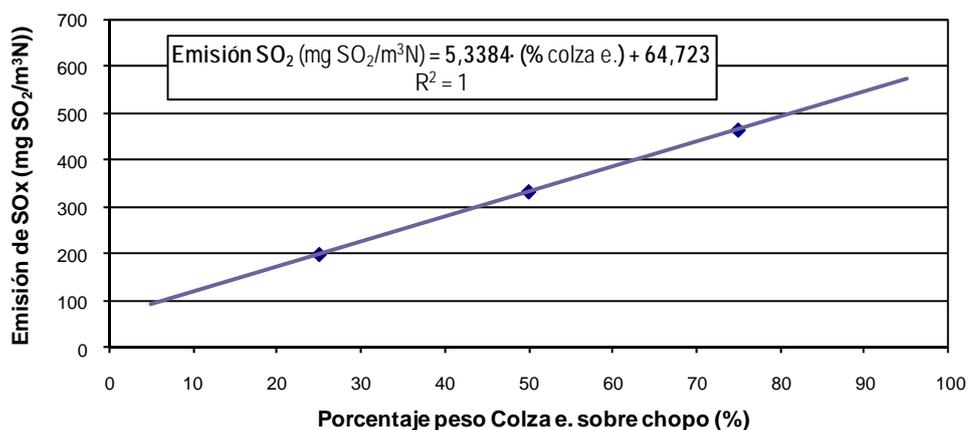
	Unidades	Casos de estudio		
		C.1	C.2	C.3
Potencia bruta por combustible				
Colza e.	MW	-	25	50
Carbón	MW	300	275	250
Inversiones				
Planta eléctrica	10 <sup>3</sup> €	433.520	435.220	436.920
Sistema desulfuración	10 <sup>3</sup> €	51.500	51.630	51.760
<b>TOTAL Inversión</b>	<b>10<sup>3</sup> €</b>	<b>485.020</b>	<b>486.850</b>	<b>488.680</b>
<b>INGRESOS</b>				
Ingresos des del año 1º al 15º	10 <sup>3</sup> €/año	99.700	113.540	127.390
Ingresos a partir del 15º año	10 <sup>3</sup> €/año	99.700	110.050	120.400
<b>GASTOS</b>				
Costes O+M				
Carbón	10 <sup>3</sup> €/año	34.980	32.070	29.150
Biomasa	10 <sup>3</sup> €/año	-	9.270	18.540
<b>TOTAL combustible</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>34.980</b>	<b>41.340</b>	<b>47.690</b>
Laborales	10 <sup>3</sup> €/año	3.990	3.990	3.990
Consumo agua/vapor	10 <sup>3</sup> €/año	4.540	4.540	4.540
Mantenimiento planta	10 <sup>3</sup> €/año	5.240	5.270	5.290
<b>TOTAL O+M</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>48.750</b>	<b>55.140</b>	<b>61.510</b>
Costes O+M planta desulfuración				
Reactivos (piedra calcita)	10 <sup>3</sup> €/año	110	120	130
Laborales	10 <sup>3</sup> €/año	1.120	1.120	1.120
Consumo agua/vapor	10 <sup>3</sup> €/año	100	100	100
Mantenimiento	10 <sup>3</sup> €/año	1.510	1.510	1.520
<b>TOTAL O+M desulfuración</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>2.840</b>	<b>2.850</b>	<b>2.880</b>
Otros costes				
Administración y otros	10 <sup>3</sup> €/año	1.000	1.000	1.000
Disposición cenizas	10 <sup>3</sup> €/año	4.240	4.230	4.210
<b>Total Otros Costes</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>5.240</b>	<b>5.230</b>	<b>5.210</b>
Amortización planta	10 <sup>3</sup> €/año	21.680	21.760	21.850
Amortización Sist. desulfuración	10 <sup>3</sup> €/año	2.580	2.580	2.590
<b>Total Amortización</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>24.260</b>	<b>24.340</b>	<b>24.440</b>
<b>COSTES TOTALES PLANTA</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>81.090</b>	<b>87.560</b>	<b>94.040</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>				
<b>Período des del año 1 al 15</b>				
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	18.610	25.980	33.350
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	6.510	9.090	11.670
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	12.100	16.890	21.680
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	36.360	41.230	46.120
<b>Período des del año 16 al 20</b>				
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	18.610	22.490	26.360
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	6.510	7.870	9.230
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	12.100	14.620	17.130
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	36.360	38.960	41.570
<b>Indicadores Económicos</b>				
PRI	años	13,3	11,8	10,6
VAN (interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	-99,6	26,9	76,1
TIR	%	1,8	5,4	6,5

del consumo de piedra caliza en el proceso de desulfuración. En el resto de variables de operación y mantenimiento, no se perciben variaciones significativas en cuanto a costes calculados para la combustión de carbón y la co-combustión con biomasa.

La diferencia entre las tarifas eléctricas según el tipo de combustible utilizado muestra una clara tendencia en ingresos percibidos: el uso de combustibles renovables conlleva mayores ingresos y beneficios netos que el uso de carbón en la generación eléctrica. El análisis económico y financiero muestra como la rentabilidad es mejorada cuanto mayor es la proporción de biomasa utilizada en la planta térmica de carbón (Tabla IX.4).

### 9.3.2. La mezcla de combustibles de biomasa

La mezcla de combustibles de biomasa compuesta por el 25% de colza e. y el 75% de chopo (en peso seco) genera en su combustión un nivel de emisiones de SO<sub>2</sub> inferior a 200 mg/m<sup>3</sup>N (~197 mg/m<sup>3</sup>N) (Ver Figura IX.2). Un aumento del 5% la proporción de chopo sobre colza e. mantendría un margen de seguridad en la emisión de SO<sub>2</sub>. Esta proporción permitiría el ahorro del sistema de desulfuración en las plantas eléctricas con biomasa analizadas.



**Figura IX.2. Emisión teórica de SO<sub>2</sub> en la combustión de la mezcla de colza e. y chopo**

Nota: Se considera la formación de sulfatos en el horno (55-70%) [13,14].

### 9.3.2.1. Costes de explotación de las plantas eléctricas de 25 y 50 MW con biomasa

La Tabla IX.5 muestra los costos de explotación y los resultados económicos de las plantas eléctricas con biomasa de 25 y 50MW para el análisis de la viabilidad de la mezcla del 25% de Colza e. con el 75% de chopo y el uso por separado de ambas biomosas en la generación eléctrica.

**Tabla IX.5. Análisis de viabilidad de la generación eléctrica de biomasa con los cultivos energéticos de colza e. y chopo**

	Unidades	Casos de estudio					
		C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
Potencia Planta	MW	25	25	25	50	50	50
Ratio de Combustible utilizado							
Colza e.	%	100	25	0	100	25	0
Chopo	%	0	75	100	0	75	100
Inversiones							
Planta eléctrica	10 <sup>3</sup> €	50.530	50.530	50.530	82.390	82.390	82.390
Sistema desulfuración	10 <sup>3</sup> €	36.040	0	0	40.200	0	0
<b>TOTAL Inversión</b>	<b>10<sup>3</sup> €</b>	<b>86.570</b>	<b>50.530</b>	<b>50.530</b>	<b>122.590</b>	<b>82.390</b>	<b>82.390</b>
<b>INGRESOS</b>							
Ingresos des del año 1º al 15º	10 <sup>3</sup> €/año	24.920	24.920	24.920	51.600	51.600	51.600
Ingresos a partir del 15º año	10 <sup>3</sup> €/año	20.990	20.990	20.990	43.460	43.460	43.460
<b>GASTOS</b>							
Costes O+M							
Colza e.	10 <sup>3</sup> €/año	9.470	2.370	0	17.890	4.450	0
Chopo	10 <sup>3</sup> €/año	0	2.140	2.840	0	4.120	5.490
TOTAL combustible	10 <sup>3</sup> €/año	9.470	4.510	2.840	17.890	8.570	5.490
Laborales	10 <sup>3</sup> €/año	310	310	310	490	490	490
Mantenimiento planta	10 <sup>3</sup> €/año	760	760	760	1.240	1.240	1.240
Planta Desulfuración	10 <sup>3</sup> €/año	510	0	0	950	0	0
<b>TOTAL O+M</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>11.050</b>	<b>5.580</b>	<b>3.910</b>	<b>20.570</b>	<b>10.300</b>	<b>7.220</b>
Otros costes							
Administración y otros	10 <sup>3</sup> €/año	500	500	500	820	820	820
Disposición cenizas	10 <sup>3</sup> €/año	1.060	460	260	1.970	860	490
<b>Total Otros Costes</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>1.560</b>	<b>960</b>	<b>760</b>	<b>2.790</b>	<b>1.680</b>	<b>1.310</b>
Amortización planta	10 <sup>3</sup> €/año	2.530	2.530	2.530	4.120	4.120	4.120
Amortización Sist. desulfuración	10 <sup>3</sup> €/año	1.800	0	0	2.010	0	0
<b>Total Amortización</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>4.330</b>	<b>2.530</b>	<b>2.530</b>	<b>6.130</b>	<b>4.120</b>	<b>4.120</b>
<b>COSTES TOTALES PLANTA</b>	<b>10<sup>3</sup> €/año</b>	<b>16.940</b>	<b>9.070</b>	<b>7.200</b>	<b>29.490</b>	<b>16.100</b>	<b>12.650</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>							
<b>Período des del año 1 al 15</b>							
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	7.980	15.850	17.720	22.110	35.500	38.950
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	2.790	5.550	6.200	7.740	12.430	13.630
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	5.190	10.300	11.520	14.370	23.080	25.320
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	9.520	12.830	14.050	20.500	27.200	29.440
<b>Período des del año 16 al 20</b>							
Beneficio bruto	10 <sup>3</sup> €/año	4.050	11.920	13.790	13.970	27.360	30.810
Impuestos	10 <sup>3</sup> €/año	1.420	4.170	4.830	4.890	9.580	10.780
Beneficio neto	10 <sup>3</sup> €/año	2.630	7.750	8.960	9.080	17.780	20.030
Beneficios diferenciales	10 <sup>3</sup> €/año	6.960	10.280	11.490	15.210	21.900	24.150
<b>Indicadores Económicos</b>							
PRI	años	9,1	3,9	3,6	6,0	3,0	2,8
VAN (interés = 4,75 %)	10 <sup>6</sup> €	29,1	107,3	122,8	126,9	252,4	280,9
TIR	%	17,9	25,0	27,5	24,4	32,8	35,6

### **9.3.2.2. Discusión de los resultados**

El coste de la biomasa es el componente que contribuye en mayor proporción sobre los costes totales de las plantas (40 – 56% sobre el total). El coste final de la colza e. en la planta eléctrica es comprendido entre 64,6 - 66,5 €/Mg. Para el chopo, el coste final de la biomasa una vez dispuesta en la planta fina es de 20,1- 21,2 €/Mg.

Los resultados en el análisis de los casos de estudio muestran como la rentabilidad de las plantas que utilizan colza e. como único combustible es inferior a las que utilizan chopo. Las causas son definidas en el apartado de conclusiones del Capítulo 8. Por otro lado, la mezcla compuesta por el 25% de colza e. y el 75% de chopo, muestra unos resultados económicos positivos con elevados beneficios netos debido a la exclusión del sistema de desulfuración en el cálculo de inversiones de las plantas eléctricas y al menor coste del chopo como combustible en relación a la Colza e.

La economía de escala contribuye a la generación de más beneficios netos cuanto mayor es la potencia instalada, y por lo tanto, los ingresos por la venta de la electricidad producida.

### **9.3.3. Comparación de resultados entre las alternativas propuestas para la combustión**

La Tabla IX.6 compara la viabilidad del uso de colza e. en la generación eléctrica mediante las siguientes alternativas de combustión:

- Co-combustión de colza e. en una central térmica de carbón de 300 MW en un ratio de potencia bruta asociada al consumo de combustible, equivalente a 50MW colza e. + 250 MW carbón.
- Combustión de colza e. en una planta de generación eléctrica con biomasa de 50 MW.
- Combustión de colza e. en una planta de generación eléctrica con biomasa de 49 MW.

El consumo de colza e. en plantas de generación eléctrica de 49 MW (no están obligadas a tener un control de sus emisiones en SOx) es la opción económicamente óptima entre las alternativas propuestas. Aún obteniendo más beneficios netos que el resto de alternativas, no es la opción más aconsejable desde el punto de vista ambiental.

La limpieza de los gases SO<sub>2</sub> en este tipo de plantas repercute en la mejora de la calidad de las emisiones a un coste que puede no ser asumido por la empresa si no está obligada a realizar este tipo de tratamiento.

La co-combustión de colza e. con carbón en una planta térmica de carbón convencional puede ser otra alternativa eficaz para la valorización de este combustible, debido a que la mayoría de este tipo de plantas en España ya han sido amortizadas a lo largo de su operación. El consumo de colza e. con carbón se traduce en el incremento de ingresos debido a los incentivos asociados al consumo de biomasa. Además, la venta de créditos de emisión de CO<sub>2</sub> por la sustitución en el uso de carbón añadiría más beneficios brutos a los obtenidos por la electricidad generada.

A modo de plantear una opción económicamente rentable para la valorización energética de colza e., la co-combustión de este combustible con carbón en centrales térmicas de elevada potencia sería la opción más adecuada. La elección de otra alternativa implica la necesidad de invertir en una nueva instalación con complejos mecanismos de limpieza de gases que garanticen la misma calidad de los gases emitidos en una co-combustión.

**Tabla IX.6. Resultados económicos entre las alternativas de combustión propuestas para la colza e.**

	VAN (millones de €)
Co-combustión 50MW colza e. + 250 MW carbón, en central térmica carbón convencional	76,1
Combustión colza e. en planta eléctrica con biomasa 50 MW	126,9
Combustión colza e. en planta eléctrica con biomasa 49 MW	161,4

## 9.4. Análisis Coste-Beneficio de la desulfuración de los gases de combustión

En la combustión conjunta de colza e con otro tipo de biomasa con un bajo contenido en azufre, el SO<sub>2</sub> presente en el gas de combustión se encuentra en fase diluida por el resto de gases. Aunque los límites de emisión sean cumplidos según la legislación pertinente, el SO<sub>2</sub> es liberado a la atmósfera. El análisis Coste-Beneficio compara el coste de la externalidad negativa provocada por la emisión del SO<sub>2</sub> en la combustión de la colza e., y el coste técnico de su eliminación mediante un sistema de desulfuración en una planta de generación eléctrica.

Para determinar el coste de la externalidad de 1 Mg de SO<sub>2</sub> emitida se ha utilizado los datos disponibles del proyecto ExternE [17]. El coste de eliminación de 1 Mg de SO<sub>2</sub> se ha calculado mediante el modelo de cálculo para la desulfuración descrito por la EPA (“EPA Desulphurisation Modelling Cost” [16]). Se ha considerado el método de la Oxidación Forzada con Piedra Caliza como mecanismo de desulfuración.

El análisis coste-beneficio muestra los costes involucrados con y sin tratamiento de los gases emitidos, así como los beneficios derivados de reducir las externalidades, cuantificando monetariamente los impactos generados (Tabla IX.7).

La reducción de las cantidades emitidas de SO<sub>2</sub> comporta un coste del tratamiento equivalente a 6.260 €/Mg de SO<sub>2</sub> y 4.290 €/Mg de SO<sub>2</sub> para las plantas de generación eléctrica de 25 y 50MW, respectivamente. Por otro lado, la externalidad evitada de su emisión tiene un coste marginal de 264 €/Mg de SO<sub>2</sub> (datos ExternE [17]).

El análisis Coste-Beneficio muestra como el coste del tratamiento del SO<sub>2</sub> es muy superior, en un orden de magnitud a los beneficios que se derivan de las externalidades evitadas con su tratamiento, lo cual justifica que el dinero, considerado como un recurso escaso, pueda ser utilizado en muchas otras aplicaciones ambientales con mayor beneficio, y reduce la crítica que se pueda hacer al limitar la potencia de 49 MW para esquivar el tratamiento del SO<sub>x</sub>. Alternativamente, la co-combustión en plantas que disponen de tratamiento se perfila como una solución conveniente para limitar las externalidades.

**Tabla IX.7. Análisis Coste-Beneficio relativo al tratamiento de emisiones de SO<sub>2</sub> en la combustión de Colza e. en plantas de generación eléctrica de 25 y 50 MW.**

	Unidades	Planta de generación eléctrica	
		25 MW	50 MW
Inversión de la desulfuración (A)	10 <sup>3</sup> €	36.040	40.200
Costes totales O+M (B)	10 <sup>3</sup> €	10.200	19.000
TOTAL Costes desulfuración (C = A+B)	10 <sup>3</sup> €	46.240	59.200
SO <sub>2</sub> emitido en 20 años (sin tratamiento) (D)	Mg	11.370	21.225
SO <sub>2</sub> emitido en 20 años (con tratamiento) (E)	Mg	3.980	7.430
SO <sub>2</sub> evitado de ser emitido en 20 años (F= D-E)	Mg	7.390	13.795
Coste de eliminación de SO <sub>2</sub> (G = C/F)	€/Mg SO <sub>2</sub>	6.260	4.290
Beneficio a partir de externalidades evitadas (H)	€/Mg SO <sub>2</sub>	264	264

## 9.5. Conclusiones

Las conclusiones principales que se obtienen del presente capítulo son las siguientes:

- La co-combustión de colza e. con carbón en la generación eléctrica presenta ventajas económicas y ambientales en relación a la instalación de nuevas plantas de combustión de biomasa, debido a lo siguiente:
  - **(a)** La mayoría de plantas térmicas de carbón en España ya han sido amortizadas,
  - **(b)** Existen incentivos económicos que promueven la co-combustión,
  - **(c)** Es posible la venta de créditos de emisión de CO<sub>2</sub> por la sustitución del carbón en la combustión por otro combustible renovable.
- La adaptación de una planta térmica de carbón a una planta de co-combustión de biomasa no requiere cambios tecnológicos significativos para su correcto funcionamiento.
- En plantas de generación térmica/eléctrica exclusivamente con biomasa, la instalación de sistemas de desulfuración para la adaptación de las emisiones a las permitidas según la legislación, puede ser evitada mediante la mezcla de combustibles. Ejemplo: 25% de colza e. con el 75% de chopo (combustible de biomasa con bajo contenido en azufre).
- El análisis Coste-Beneficio muestra como el coste del tratamiento del SO<sub>2</sub> es muy superior a los beneficios que se derivan de las externalidades evitadas por su tratamiento.

## 9.6. Referencias

- [1] National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2000). Biopower FactSheet. Biomass Co-firing: A Renewable Alternatives for Utilities. [En línea] Disponible en: <http://www.nrel.gov/> (Consulta: Noviembre 2008)
- [2] Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) (2008). Database Phyllis. [En línea] Disponible en: [www.ecn.nl/phyllis/](http://www.ecn.nl/phyllis/) (Consulta: Agosto 2008)
- [3] British Petroleum (2007). BP Statistical review of World Energy 2007. Coal. [En línea] Disponible en: <http://www.bp.com> (Consulta: Julio 2008).
- [4] National Energy Technology Laboratory (NETL) (2008), Integrated Environmental Control Model (IECM). [En línea]. Disponible en: <http://www.netl.doe.gov/> (Consulta: Agosto 2008)
- [5] Marshall & Shift Cost Index. Chemical Engineering, 2007.
- [6] Caputo, A.C. et al. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. Biomass & Bioenergy. Vol. 28. pp.: 35-51.
- [7] U.S. EPA (1988). Carbon Adsorption for Control of VOC Emissions: Theory and Full scale system performance. EPA-450/3-88-012. Research Triangle Park, NC.
- [8] Comunicación Personal des de Museu de les Mines de Cercs. 2008.
- [9] Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de enero de 2008. BOE núm. 312.
- [10] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Real decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. BOE núm. 126 (2007).
- [11] Brealey, R. & Myers, S. (1990) Principios de Finanzas Corporativas. Mc Graw Hill. 2ª Edición. España.
- [12] Banco Central Europeo (2006). [En línea] Disponible en: <http://www.ecb.int/home/html/indexen.html> (Consulta: Octubre 2006).
- [13] Llorente, M.J.F. et al (2006). Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering. Fuel. Vol. 85 (14-15), pp. 2081-2092.
- [14] Llorente, M.J.F. et al (2006). Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion. Fuel. Vol. 85 (9) pp. 1157-1165.
- [15] Ministerio de la Presidencia; Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. BOE núm. 69 (2004).
- [16] Srivastava R.K. (2000), Controlling SO<sub>2</sub> emissions: a review of technologies. US EPA/600/R-00/093. [En línea] Disponible en: <http://www.epa.gov> (Consulta: Marzo 2008).
- [17] European Commission (2005) Externe-Externalities of Energy. A Research Project of the. [En línea] Disponible en: <http://www.externe.info> (Consulta: Setiembre 2008).

Capítulo 10.

**Caracterización físico-química de la  
biomasa de colza (*Brassica napus*)**

---



## 10. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA BIOMASA DE COLZA (*Brassica napus*)

### 10.1. Introducción y objetivos

La producción de energía a partir de los residuos agrícolas representa una alternativa de elevado potencial debido a la disponibilidad y características caloríficas de la biomasa residual. Aunque los cultivos leñosos como el viñedo, el olivar y los frutales generan anualmente una cantidad significativa de residuos (549.000 Mg b.s./año) resultantes de operaciones de poda y de arranque, los residuos herbáceos se cuantifican en Cataluña en mayor número (1,12 millones de Mg/año), siendo aprovechados para su uso como forraje para la ganadería.

La colza (*Brassica napus*) es el cultivo energético herbáceo más extendido en Cataluña. Su productividad se deriva a la producción de biodiesel a partir del grano recogido que representa la retirada del 30% de la biomasa generada en el cultivo [1].

En términos de disponibilidad del cultivo, la UE es el mayor productor de colza a nivel internacional con  $18,3 \cdot 10^6$  Mg anuales, seguido de China ( $10,4 \cdot 10^6$  Mg), Canadá ( $8,9 \cdot 10^6$  Mg) y la India ( $7,1 \cdot 10^6$  Mg) [2]. A su vez, Alemania y Francia concentran el 54% de la producción de colza de la UE. A escala regional, Cataluña representa la segunda comunidad autónoma con más superficie de cultivo de colza para biodiesel de España (2810 ha en el 2007) [3]. La productividad puede llegar a ser de 3830 kg de grano/ha (9% humedad) para algunas especies híbridas [4].

La producción de biodiesel a partir del grano de colza puede ser complementada con la producción de energía a partir de la biomasa residual generada en la cosecha del cultivo. Actualmente no se conocen experiencias en Europa sobre valorización energética de los residuos de biomasa de colza (*B. napus*). La biomasa residual generada en cada cosecha es enterrada para facilitar el retorno de nutrientes en el suelo.

La valorización energética de la biomasa residual de colza requiere el análisis físico-químico del propio material y de las cenizas generadas en la combustión. Algunos estudios destacan el elevado contenido en azufre de la biomasa de colza, que puede comportar problemas en la combustión [5]. Las cenizas pueden ser retornadas al campo como fertilizantes, cerrando parte del ciclo de los

nutrientes que han sido previamente absorbidos para el crecimiento de la biomasa y la formación del grano. El retorno de los nutrientes presentes en las cenizas en el campo de cultivo comporta reducciones en el uso de fertilizantes de origen sintético, repercutiendo en el coste del cultivo.

Por otro lado, la viabilidad en la producción de energía con colza depende en cierto grado de los costes asociados a la logística para el suministro del combustible de biomasa en una planta de valorización energética. El transporte de biomasa con un contenido elevado de humedad contribuye al encarecimiento del coste del material suministrado y finalmente valorizado. El grado de humedad de la biomasa puede afectar a la eficiencia de su combustión y a la operatividad de la planta de valorización energética. Por estos motivos, el secado natural de la biomasa en el mismo campo anterior a la recogida para su transporte, contribuye en la disminución del coste final de esta biomasa.

El trabajo presentado en este Capítulo se basa en la caracterización físico-química de la biomasa residual de la colza (*Brassica napus*) y de sus cenizas para la producción de energía. Con la colaboración del IRTA se inició un estudio para la valoración de la capacidad de aprovechamiento del residuo vegetal de la colza (aproximadamente el 70% de la planta) y como área para identificar las técnicas requeridas de caracterización físico-química de la biomasa y la iniciación experimental en dichas técnicas. El análisis experimental presentado en este Capítulo tiene siguientes objetivos:

- La caracterización físico-química y del potencial energético de la biomasa de colza;
- El análisis elemental de las cenizas obtenidas en la combustión de la colza. Permitirá conocer qué cantidad de minerales han sido volatilizados en la combustión y qué cantidad aun residen en las cenizas para ser dispuestos a modo de fertilizantes en la tierra del cultivo.
- El estudio del secado natural de la biomasa de colza por la implicación de la humedad en el poder calorífico del material.

La resolución de los objetivos mencionados se ha efectuado mediante el desarrollo de tres grandes apartados. El trabajo realizado ha seguido la siguiente metodología, descrita a continuación.

- Obtención y preparación de muestras en el cultivo para el análisis
- Métodos estandarizados para la caracterización,
- Dispositivos y técnicas experimentales utilizadas.

## 10.2. Metodología experimental

### 10.2.1. Obtención y preparación de las muestras de biomasa de colza

Las muestras de biomasa de colza (*Brassica napus*) fueron obtenidas en la cosecha del grano en una parcela agrícola situada a 2 kilómetros del municipio de Caldes de Malavella (provincia de Girona). La cosecha fue realizada en la campaña de verano (2 de julio del 2008).

La cosechadora utilizada en los trabajos de campo fue de marca NewHolland TC54. Como resultado de la cosecha se obtuvieron dos tipos de biomasa: (Fracción A) Fracción suelta procedente del corte de la parte terminal de la colza, y (Fracción B) tallos o estacas de colza, de 50-60 cm de longitud, enraizados en el suelo (Figura X.1).

En el campo se trazó un rectángulo de 6 m<sup>2</sup> en el cual se retiró la biomasa residual existente (fracción A y B). La biomasa recogida fue apilada sobre un tejido sintético permeable de 5 m<sup>2</sup> de superficie, y cubierta por el mismo tipo de tejido (Figura X.2) para permitir su secado natural sin pérdidas de material por efectos del viento.

El seguimiento de la pérdida de humedad de la biomasa se realizó mediante la recogida periódica de muestras en el montículo, cada 2 ó 3 días. El análisis de la influencia del secado en función de la profundidad del montículo se realizó mediante la extracción de dos tipos de muestra:

- *Muestra exterior*, extraída en la parte superficial del montículo, en contacto directo con las corrientes de aire;
- *Muestra interior*, extraída a partir de 15 cm de profundidad en el montículo, guarecida de las corrientes de aire.

Para cada tipo de muestra (muestra exterior e interior) se distinguieron cuatro secciones en el tallo y el ramaje en función de los siguientes diámetros (Figura X.2):

- Muestra 1 →  $\Phi > 1,5$  cm
- Muestra 2 →  $1 \text{ cm} < \Phi < 1,5$  cm.
- Muestra 3 →  $0,5 \text{ cm} < \Phi < 1$  cm.
- Muestra 4 →  $\Phi < 0,5$  cm.



**Figura X.1. Cultivo y cosecha de colza. Preparación de la de biomasa para el secado natural**

(1) Cultivo de colza (*Brassica napus*), Mayo 2008; (2,3) Detalle colza. Se observan las vainas con el grano de colza formadas; (4) Cosecha de la colza, Julio 2008; (5) Descarga grano colza en remolque; (6) Residuos biomasa colza en la cosecha: A) Fracción suelta, B) tallos enraizados; (7) Detalle tallos colza después de la cosecha; (8) Labrado post-cosecha, Agosto 2008; (9) Montículo de biomasa de colza para el estudio del secado natural, Julio 2008.

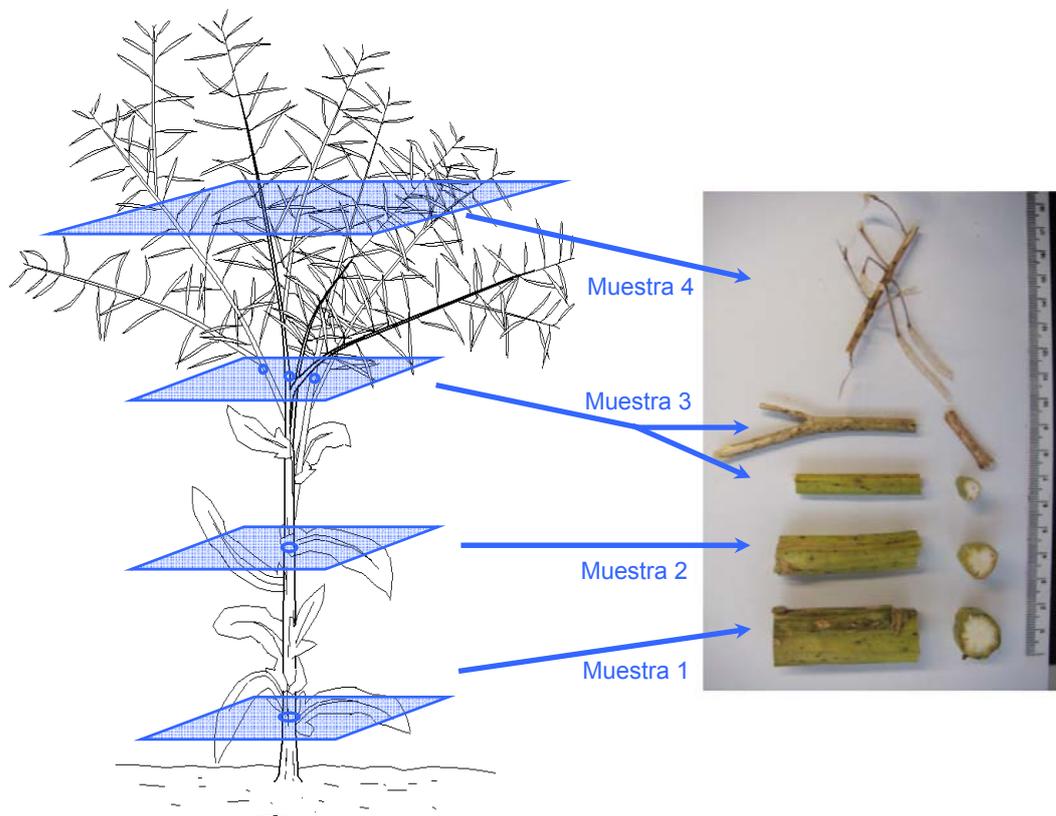


Figura X.2. Distinción del tipo de muestra según el tamaño del diámetro de la colza

## 10.2.2. Métodos estandarizados para la caracterización de la biomasa

El aprovechamiento energético de la biomasa a nivel internacional ha impulsado la adaptación y creación de métodos estandarizados que facilitan la caracterización y análisis físico-químico de la biomasa como combustible renovable, en muchos casos adaptando los métodos de caracterización del carbón. El conjunto de métodos aplicables para el análisis de la biomasa son mostrados en la Tabla X.1. Algunos de los métodos citados han sido publicados como normas UNE, y otros son publicados desde el país de origen de la norma.

## 10.2.3. Técnicas y dispositivos experimentales para la caracterización físico-química de la biomasa de colza

### 10.2.3.1. Caracterización elemental (C,H,N,S)

El análisis elemental se emplea para la determinación rápida de C, H, N y S en muestras orgánicas e inorgánicas, sólidas o líquidas, volátiles y no volátiles, medidos en porcentaje respecto al

**Tabla X.1. Métodos estandarizados para la caracterización de la biomasa**

	Estándar de referencia	Título
General	CEN/TS 14588:2003	Solid biofuels (SB) - Terminology, definitions and descriptions
	CEN/TS 14961:2005	SB - Fuel specifications and classes
Muestreo	UNE-CEN/TS 14778-1 2007 EX	SB - Sampling - Part 1: Methods for sampling
	UNE-CEN/TS 14779 2007 EX	SB - Sampling – Methods for preparing sampling plans and sampling certificates
	UNE-CEN/TS 14780 2007 EX	SB - Methods for sample preparation
Contenido de humedad	UNE-CEN/TS 14774-1 2007 EX	SB - Methods for determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Reference method
	UNE-CEN/TS 14774-2 2007 EX	SB - Methods for determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Simplified method
	UNE-CEN/TS 14774-3 2007 EX	SB - Methods for determination of moisture content - Oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis sample
Poder calorífico	DIN 51900-1	Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, calculation of NCV
	DIN 51900-2	Determination of the gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of the Net Calorific Value.
Análisis último	CEN/TS 15104:2005	SB - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen - Instrumental methods
	CEN/TS 15289:2006	SB - Determination of total content of sulphur and chlorine
	ASTM D5373-02(2007)	Test Methods for Instrumental Determination of C, H and N in Laboratory Samples of Coal and Coke
	ASTM E1757	Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis
Determinación cenizas	CEN/TS 14775:2004	SB - Method for the determination of ash content
	CEN/TS 15290:2006	SB - Determination of major elements
	CEN/TS 15297:2006	SB - Determination of minor elements
	ASTM E1755-01	Standard Test Method for Ash in Biomass

peso. La técnica de análisis es automatizada y se basa en la combustión de una muestra colocada en una cápsula de estaño mediante una corriente de helio enriquecido con oxígeno (Temperatura entre 950 y 1200°C). La oxidación cuantitativa es conseguida mediante la circulación de la mezcla de gases a través de una zona con un catalizador oxidante (WO<sub>3</sub>) y otra zona con cobre puro. Los catalizadores reducen los ácidos nitrogenados (NO<sub>x</sub>) y el anhídrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) formados en la combustión a N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Los compuestos oxidados formados (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) son arrastrados por una corriente de gas inerte o gas portador (He) a través de un horno de reducción hasta el valorador.

A partir de este punto se pueden realizar dos técnicas de análisis: **(a)** Separación de los distintos elementos en una columna cromatográfica y detección de la conductividad térmica (en un DCT) proporcional a la concentración de cada componente; **(b)** Detección de los productos de la combustión (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub>) mediante la técnica del infrarrojo (IR).

Se han realizado dos ensayos sobre análisis elemental de la biomasa de colza en dos dispositivos. El primer ensayo se dio a cabo en el *Servei d'Anàlisi Química* de la *Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)* mediante un analizador *EuroEA* (Figura X.3). El segundo ensayo se realizó en el *Servei de Recursos Científics i Tècnics* de la *Universitat Rovira i Virgili (URV)* de Tarragona. El último dispositivo fue un analizador *EA1108 Carbo Erba-ThermoQuest*. Ambos dispositivos basan la

detección y cuantificación de los gases originados en la combustión en la cromatografía de gases. Las muestras de biomasa fueron molidas y secadas mediante una Termobalanza de infrarrojos.

### 10.2.3.2. Análisis de elementos: Espectrometría de masas en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)

La técnica de ICP-MS es una técnica analítica que permite el análisis simultáneo de diluciones (normalmente acuosas) de los elementos presentes en la tabla periódica que tienen un potencial de ionización menor que el del argón a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt). La técnica se caracteriza por su elevada precisión y sensibilidad. El dispositivo de análisis se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas) (Figura X.4).



Figura X.3. Analizador elemental (C,H,N y S), EuroEA Elemental Analyzer

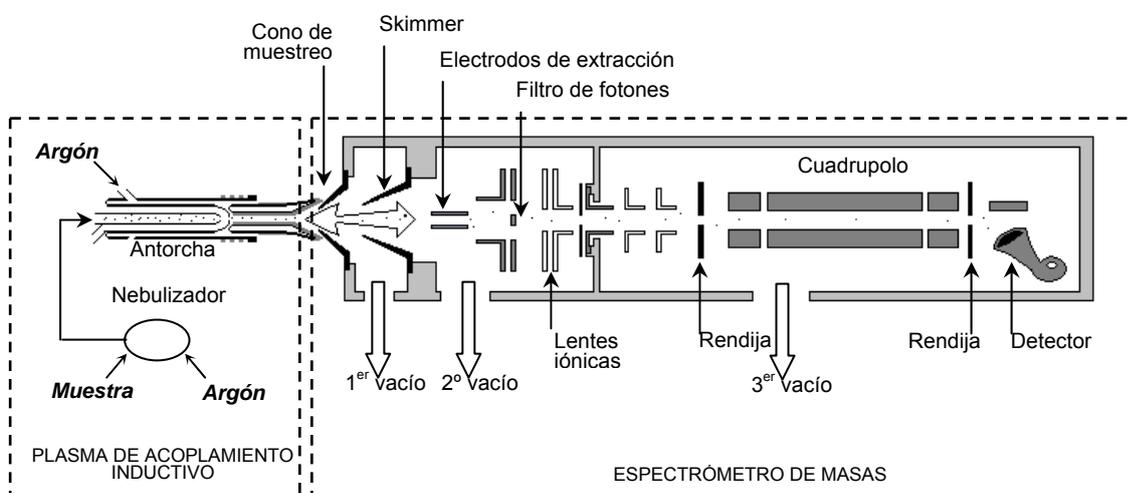


Figura X.4. Esquema del funcionamiento de un (ICP-MS)

La muestra (en forma líquida) es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción del gas argón. El aerosol formado es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por la una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000K. Los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfase de vacío creciente, y allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llega al detector donde se evalúa su abundancia.

El análisis de los elementos químicos de la biomasa parte de una digestión oxidativa en medio ácido de una muestra seca triturada (0% humedad), representativa de la biomasa de colza. Los reactivos utilizados para la digestión ácida son los siguientes: ~0,3 g de muestra + 8 ml de HNO<sub>3</sub>, 65% + 2 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 30% + agua destilada (enrase hasta 50 ml).

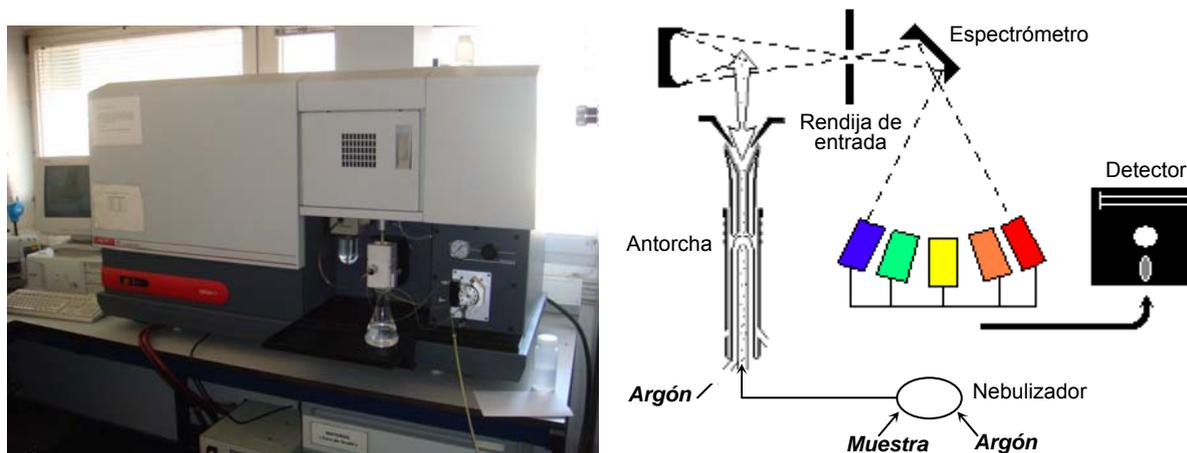
La digestión se produjo mediante un dispositivo microondas siguiendo el siguiente programa de calentamiento: **(a)** 3 min para incrementar a 85°C; **(b)** 9 min para incrementar a 145°C; **(c)** 4 min para incrementar a 200°C; y **(d)** 14 min a 200°C.

Los elementos químicos analizados mediante esta técnica son: Al, Si, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd y Pb. El dispositivo utilizado para el análisis fue de la marca *Agilent 7500c*, modelo *G3155A ICP-MS*. El análisis de los elementos seleccionados mediante la técnica ICP-MS se realizó en el *Servei d'Anàlisi Química* de la *Universitat de Girona* (UdG).

### **10.2.3.3. Análisis de elementos: Espectrometría de emisión atómica en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES)**

La técnica de ICP-AES es una técnica analítica que permite el análisis simultáneo de numerosos elementos y se caracteriza por su precisión y sensibilidad. La técnica de emisión atómica es más antigua que la absorción atómica, aunque esta última se desarrolló más rápidamente que la emisión atómica.

El principio de la emisión atómica parte de la emisión de una radiación des de un analito. En general, un dispositivo de ICP-AES se divide en tres partes: **1)** la fuente de atomización, **2)** los sistemas ópticos de dispersión de la longitud de onda ( $\square$ ) y del detector, y **3)** los sistemas de



**Figura X.5. Dispositivo ICP-AES empleado en el estudio y esquema de su funcionamiento**

adquisición y tratamiento de datos.

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol a partir de la acción del gas argón. El aerosol formado es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético. La muestra excitada, emite ondas con longitudes de onda características de sus elementos. Un espejo refleja la luz hacia la entrada del espectrómetro, donde las ondas son separadas e identificadas mediante un dispositivo detector (Figura X.5).

Las muestras líquidas de biomasa analizadas son las mismas digestiones preparadas para el análisis con el dispositivo ICP-MS. El dispositivo ICP-AES utilizado es de la marca *Liberty R.L, Varian*, equipado con un nebulizador *V- Groove*. Mediante esta técnica han sido cuantificados los siguientes elementos: Na (589,592 nm), Mg (285,213 nm), Ca (317,933 nm), P(213,618 nm) y K (769,896 nm). El análisis se dio a cabo en el laboratorio de Análisis Química de la UdG.

#### **10.2.3.4. Análisis Térmico de la biomasa: Termogravimetría (TG) y Análisis Térmico Diferencial (ATD)**

La **Termogravimetría (TG)** se basa en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando ésta es sometida a un cambio de temperatura en una atmósfera controlada. Esta variación puede ser una pérdida o una ganancia de masa, según si existe o no una reacción química con la atmósfera envolvente. La termogravimetría puede utilizarse conjuntamente con otras técnicas, como

el Análisis Térmico Diferencial (ATD) o la Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB), para la obtención de datos complementarios sobre el comportamiento térmico de una muestra.

El **Análisis Térmico Diferencial (ATD)** es una técnica cualitativa que detecta la diferencia de temperatura entre la muestra y un material de referencia (térmica, física y químicamente inerte) en función del tiempo o de la temperatura cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. La técnica indica la temperatura a la cual tiene lugar el cambio de energía y si el proceso es endotérmico o exotérmico. Con un calibrado adecuado es posible convertir el análisis en semicuantitativo y obtener información sobre el calor involucrado en el proceso.

Se realizaron dos ensayos sobre TG a partir de dos muestras representativas de biomasa molida: **(Muestra 1)** Biomasa fresca obtenida al principio del período de secado en el campo, y **(Muestra 2)** Biomasa con un contenido de humedad del 0%, obtenida al final del período de secado (humedad obtenida mediante la acción de una Termobalanza).

En los ensayos, las muestras de biomasa se colocaron en un crisol de porcelana de 0,2 gramos de peso. La rampa de temperatura fue común en ambas valoraciones: 10K por minuto, con un flujo de aire de entrada de 40,0 ml/min. El dispositivo utilizado fue una Termobalanza con análisis térmico diferencial de alta temperatura (TG-DTA) TGA851e de la marca Mettler Toledo (Figura X.6). La resolución de la balanza es de 1  $\mu\text{g}$  de peso y de 0,5  $^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Los ensayos se realizaron en el laboratorio del Área de Recerca del Servei de Física de la UdG.



**Figura X.6. Dispositivo TG-DTA Mettler Toledo**

### **10.2.3.5. Análisis térmico de la biomasa: Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

La **Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)** es una técnica cuantitativa que permite obtener información del calor involucrado en el proceso de reacción de una muestra al elevar su temperatura en condiciones controladas. La DSC puede ser de flujo de calor o de potencia compensada. En el primer caso, se mide la variación en el flujo de calor entre la muestra y la referencia cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. En el segundo caso se mide la potencia que hay que aportar o retirar del sistema para que la muestra y la muestra de referencia se mantengan a la misma temperatura cuando se somete la muestra a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. En los últimos años se está extendiendo el uso de equipos de DSC modulado (MDSC). Su característica principal es que mediante la tecnología de modulación de la temperatura es posible separar el flujo total de calor en la componente cinética y en la termodinámica ( $C_p$ ).

Se realizó un ensayo experimental de DSC de una muestra representativa de biomasa con un contenido de humedad del 0%. El dispositivo utilizado fue un *DSC 822* de la marca *Mettler Toledo* (Figura X.7). La precisión de temperatura del aparato es de  $0,1^{\circ}\text{C}$  comprendido en el rango de determinación de  $50$  a  $700^{\circ}\text{C}$ . La rampa de temperatura aplicada en la muestra fue de  $10^{\circ}\text{K}/\text{min}$ , con un flujo de entrada de aire de  $40$  ml/min. El ensayo se realizó en el laboratorio del *Àrea de Recerca del Servei de Física* de la UdG.



**Figura X.7. Dispositivo DSC Mettler Toledo**

### 10.2.3.6. Análisis del poder calorífico

El dispositivo que permite la determinación del poder calorífico de un combustible es la Bomba Calorimétrica. Este dispositivo dispone de un soporte donde se coloca la muestra sólida a analizar en forma de pastilla, una cámara de combustión donde se efectúa la combustión mediante oxígeno a elevada presión (30 bar), y una camisa adiabática de agua que absorbe el calor liberado por el combustible, evitando la fuga de calor que afecte al proceso. No obstante, el calor que absorbe el agua no es el poder calorífico del combustible debido a la consideración de los siguientes factores: la absorción de calor por la propia bomba y la liberación del calor del hilo de algodón en la combustión de la muestra.

Debido a que los gases producidos durante la combustión se encuentran a temperaturas bastante bajas y a que el ensayo se lleva a cabo a alta presión, la mayor parte del agua presente en los productos condensa, por lo cual el poder calorífico que se está determinando es el superior.

Se ha realizado la determinación del poder calorífico de la biomasa de colza mediante dos técnicas. La primera técnica se basa en la determinación del Poder Calorífico Superior (PCS) mediante una bomba calorimétrica adiabática, modelo *IKA C4000* (Figura X.8). El análisis se realizó en los laboratorios del *Centre d'Estudis de la Construcció i Anàlisi de Materials* (CECAM-Celrà).

El resultado obtenido fue contrastado con el PCS calculado mediante el uso de la fórmula de Milne, segunda técnica utilizada basada en el cálculo del poder calorífico a partir de la composición elemental de la materia estudiada. La fórmula de Milne es la siguiente:

$$PCS_{\text{Milne}} \text{ (MJ/kg)} = 0,341 \cdot C + 1,322 \cdot H - 0,12 \cdot O - 0,12 \cdot N + 0,0686 \cdot S - 0,0153 \cdot \text{ceniza} \quad (\text{Ecuación 10.1})$$

donde: C, H, O, N, S y cenizas son las fracciones másicas de la muestra seca.

El cálculo del Poder Calorífico Inferior (PCI) requiere la cuantificación del Hidrógeno presente en la muestra, contenido de humedad (porcentaje en peso) y el calor procedente de la condensación del vapor de agua formada en el ensayo de combustión de la biomasa (597 Kcal/kg agua condensada). La relación entre PCS y PCI es la siguiente:

$$PCI \text{ (kcal/kg)} = PCS \text{ (kcal/kg)} - 597 \cdot (9 \cdot H + H_2O) \quad (\text{Ecuación 10.2})$$

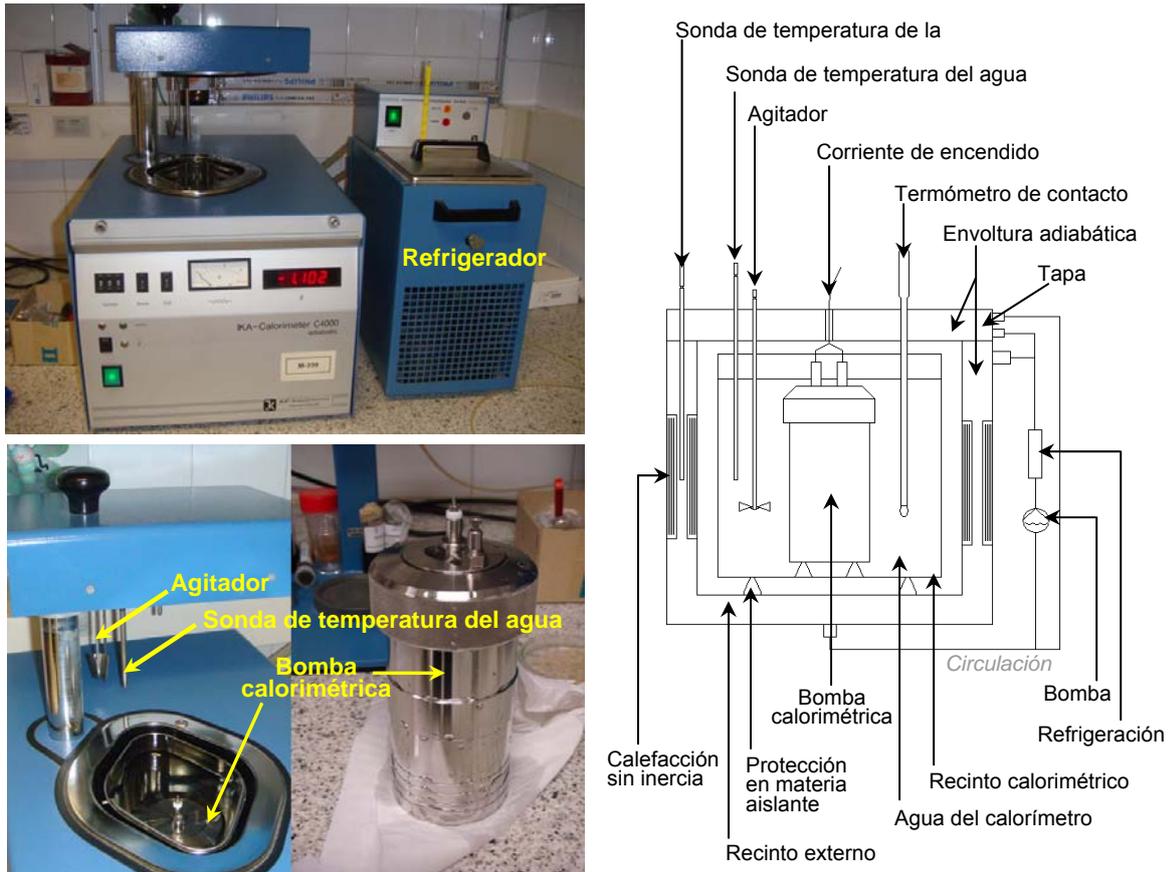


Figura X.8. Bomba Calorimétrica Adiabática (IKA C4000)

Donde:  $H$  es el porcentaje de hidrógeno contenido en la muestra de biomasa, y  $H_2O$ , es el porcentaje de humedad.

### 10.2.3.7. Determinación del contenido de cenizas

La determinación del contenido en cenizas se ha realizado siguiendo la norma ASTM E1755-01 (“*Standard Method for the Determination of Ash in Biomass*”), que consiste en el cálculo de porcentaje de residuo generado después de una oxidación seca a 550°C durante 3 horas en un horno. Los resultados han sido expresados en forma de peso de muestra seca (Termobalanza 105°C). El ensayo se realizó en el *Laboratorio de Ingeniería Química y Ambiental (LEQUIA)* de la UdG.

## 10.2.4. Técnicas y dispositivos experimentales para la caracterización físico-química de las cenizas

Se han realizado diversos análisis para conocer la composición físico-química de las cenizas de la biomasa de colza a partir del residuo generado en la combustión de esta biomasa en un horno a 550°C. Es necesario mencionar que las condiciones industriales de generación de cenizas alcanzan los 1000-1200°C, y no 550°C como muestra el procedimiento estandarizado. Aunque los resultados sobre composición de las cenizas no se ajusten a los obtenibles en una planta de valorización energética real, el manejo de técnicas y conclusiones obtenidas en los resultados, pueden servir de base metodológica para un futuro estudio de escala industrial.

### 10.2.4.1. Análisis elemental (C,H,N,S)

El análisis elemental de las cenizas de la biomasa de colza se basa en la caracterización cuantitativa de C, H, N y S presentes en las cenizas en forma de carbonatos, sulfatos, sulfuros, compuestos de nitrógeno e hidratados. Se han realizado dos análisis a partir de una misma muestra en un analizador *EA1108 Carbo Erba-ThermoQuest*. El ensayo se realizó en el *Servei de Recursos Científics i Tècnics* de la URV de Tarragona.

### 10.2.4.2. Análisis aproximado de carbonatos: Termogravimetría en cenizas de biomasa

Se ha utilizado la técnica de la termogravimetría para el cálculo aproximado de la cantidad de carbonatos presentes en las cenizas. La pérdida de peso de la muestra de ceniza está asociada a la calcinación de los compuestos carbonatados por efecto de la temperatura. El dispositivo utilizado es un *TGA851e* de la marca *Mettler Toledo* (Figura X.6). El rango de temperaturas a la que fue sometida la muestra fue de 100°C a 1200°C, a un ritmo de calentamiento de 10°K/min, en una atmósfera de aire con una corriente de entrada de 40 ml/min. El ensayo se realizó en el laboratorio del *Àrea de Recerca del Servei de Física* de la UdG.

#### **10.2.4.3. Análisis de elementos: Espectrometría de emisión atómica en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES)**

Se ha utilizado la técnica de ICP-AES para la determinación de los siguientes elementos químicos presentes en las cenizas de biomasa: Ca (317,933 nm), K (769,896 nm), Na (589,592 nm), Mg (285,213 nm), P (213,618 nm), Si (251,611 nm), Al (396,152 nm), Fe (259,940 nm), Cu (324,754 nm), Mn (257,610 nm), Pb (220,353 nm), Zn (202,551 nm) y Cd (228,802 nm).

El análisis se ha determinado a partir de la digestión de las cenizas en un medio ácido. Las cantidades de muestra y reactivos utilizados para la digestión son: ~250 mg de cenizas + 2 ml de HCl 37% + 5 ml de HNO<sub>3</sub> 65% + 1 ml de HF 30% + 2 ml de agua MiliQ. La digestión se produjo mediante un dispositivo microondas siguiendo el siguiente programa de calentamiento: **(a)** 3 min para incrementar a 85°C; **(b)** 9 min para incrementar a 145°C; **(c)** 4 min para incrementar a 200°C; y **(d)** 14 min a 200°C.

A continuación, las muestras se calentaron en un horno microondas (700W) siguiendo un programa de digestión basado en dos etapas:

- Una primera etapa de 10 minutos hasta llegar a la temperatura de 210°C y mantenimiento a esta temperatura durante 20 minutos seguido de 50 minutos de enfriamiento.
- La segunda etapa tiene por objetivo la neutralización del HF, mediante 2,5 ml de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> al 5%. Se calentó la muestra durante 10 minutos hasta llegar a 220°C, temperatura que se mantuvo durante 10 minutos, seguida del enfriamiento de la muestra. Tras la digestión, la muestra se transfirió cuantitativamente a un matraz de 100ml y se enrasó con agua MilliQ para ser analizada por ICP-AES.

#### **10.2.4.4. Análisis estructural de las cenizas: Difractómetro de Rayos X de Polvo (DRX)**

Se ha realizado un análisis estructural de las cenizas de la biomasa de colza mediante la técnica de difracción de rayos X (Figura X.9). Esta técnica se basa en el análisis de las radiaciones emitidas por una muestra en polvo al ser sometida a un haz de rayos X ligeramente divergentes. La reflexión de rayos X producida por la muestra en diferentes ángulos y en haces más o



**Figura X.9. Dispositivo DRX**

menos intensos permite la distinción de compuestos cristalinos en los que el haz de rayos X ha sido incidido. Para que el haz reflejado sea focalizado en la ventana de entrada del contador (o detector), es necesario que el portamuestras bisecte en el ángulo del haz incidente con el eje del contador.

Los diagramas de polvo obtenidos en el análisis tienen múltiples aplicaciones como método y control de materiales cristalinos. De los datos de difracción se puede obtener la siguiente información:

- El espacio interplanar, las dimensiones de la celda unidad y los tipos de red,
- Los índices de Millar de las reflexiones y su intensidad,
- La identificación cualitativa de los componentes químicos,
- El análisis cuantitativo de las mezclas de cristales y su medida.

Cada compuesto cristalino presenta un difractograma de rayos X característico del mismo. Los difractogramas se disponen en ficheros y libros del *Joint Comité on Powder Diffraction Standards* (JCPDS), y son agrupados mediante índices de compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales.

En el diagrama de polvo de una mezcla con distintos compuestos cristalinos, las intensidades relativas de los diagramas superpuestos son proporcionales a las concentraciones de estos compuestos en la muestra. En la práctica se deben tener en cuenta otros factores como la absorción, el tamaño de partícula, la homogeneidad, etc., que influyen en la intensidad de las reflexiones. Si se considera que el cristal no presenta imperfecciones dentro de su red cristalina, se puede asumir que el ensanchamiento de las líneas de difracción es ocasionado principalmente por la medida del cristal, juntamente a la anchura del mismo.

El dispositivo utilizado para el análisis de las cenizas es un Difractómetro de Polvo de la marca *Bruker D8 Advance*, con geometría Theta - 2Theta. El ensayo se realizó en los laboratorios del *Servei d'Anàlisi Química* de la UdG.

### 10.2.5. Técnicas y dispositivos experimentales para la determinación de la humedad en la biomasa de colza

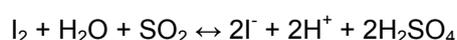
Se ha analizado el secado o pérdida de humedad de la biomasa de colza apilada en el campo. Los análisis han sido realizados cada 2 ó 3 días para los distintos tamaños o diámetros de biomasa diferenciados (*10.2.1. Obtención y preparación de las muestras de biomasa de colza*).

La relación entre contenido de humedad y condiciones meteorológicas que favorecen el secado natural, parte de la obtención de datos sobre humedad relativa y temperatura ambiental de una estación meteorológica cercana, situada en el municipio de *Vilobí d'Onyar* (a menos de 10 km de distancia). Los datos son disponibles vía Internet y publicados por el *Institut Català de Meteorologia*.

El método más utilizado en la determinación de la humedad de muestras sólidas es la gravimetría. Ésta técnica se basa en la pérdida del agua por evaporación en la muestra, y por tanto, de su peso, al haber empleado calor. Las técnicas más comunes para efectuar el secado son: **(a)** estufas de desecación; **(b)** desecación con intermedio; **(c)** desecación al vacío; **(d)** desecación bajo una corriente de aire seco; **(e)** desecación con agentes deshidratantes fuertes; **(f)** desecación bajo una lámpara de infrarrojos, y **(g)** aplicación de microondas.

Por otro lado, existen otras técnicas que no emplean calor para la determinación de la humedad, como:

- **Método de Karl-Fisher:** La muestra se pone en contacto con metanol anhídrido para que éste extraiga todo el agua. Posteriormente se hace una valoración con el reactivo de Kart-Fisher, que contiene I<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. El yodo del reactivo reacciona con el agua, de modo que el punto final de la reacción se detecta gracias al exceso de yodo cuando ya no queda agua. Este exceso se puede detectar de forma visual, fotométrica o electrométicamente.





**Figura X.10. Análisis del contenido de humedad de colza mediante Termobalanza (Sartorius Moisture Analyser)**

- **Resonancia de microondas:** Es una técnica de medición instantánea de la humedad. Se basa en la inferencia del agua de una muestra con el comportamiento de oscilación (resonancia) de una microonda creada por el dispositivo. El consecuente cambio de altura y ancho de la onda es detectado por un sensor, que basándose en una calibración efectuada previamente, mide el contenido de humedad de la muestra. La medición no se limita a la determinación de la humedad en la superficie, sino que detecta también la humedad en el núcleo. El rango de medición se encuentra entre aprox. 0,1 hasta el 85 % de humedad.

La determinación de la humedad en las muestras de colza se ha realizado mediante una termobalanza de infrarrojos *Sartorius Moisture Analyser* (Figura X.10). Las muestras han sido previamente trituradas para aumentar su superficie específica de contacto con el calor y favorecer la evaporación del agua. Algunas muestras han sido analizadas sin previa trituración para el estudio de la capacidad de retención del agua por la misma estructura física de la colza.

## 10.3. Resultados

### 10.3.1. Análisis físico-químico y calorimétrico de la biomasa de colza

#### 10.3.1.1. Análisis físico-químico de la biomasa de colza

La Tabla X.2 resume los resultados obtenidos en la caracterización físico-química de la biomasa de colza (*Brassica napus*) mediante las siguientes técnicas de análisis: poder calorífico, análisis elemental y determinación del contenido de cenizas.

Los valores sobre análisis elemental, poder calorífico y contenido en cenizas de la biomasa de colza se encuentran dentro del rango de valores señalados en la bibliografía (Tabla X.2). La biomasa residual de colza destinada a la producción de biodiesel (*B. napus*) presenta características físico-químicas y caloríficas similares a la colza etíope (*B. carinata*) cultivada para la producción expresa de biomasa. La similitud en las características generales de ambas biomásas permite confirmar la posibilidad del aprovechamiento energético de los residuos de la biomasa de colza.

El valor de azufre obtenido en el análisis elemental de la colza es del 0,44%. Dependiendo del tipo de combustión producido en una caldera, este elemento puede ser emitido en mayor concentración en forma de SO<sub>2</sub> y también fijado en las cenizas en forma de sulfatos junto con el resto de elementos minerales.

La Tabla X.3 resume los resultados obtenidos en la caracterización del resto de elementos minerales seleccionados en la biomasa de colza. Las técnicas utilizadas para la obtención de estos resultados son: ICP-MS y ICP-AES. Actualmente, los elementos cuantificados en la Tabla X.2 y Tabla X.3, son retornados al suelo mediante el arado y entierro de la biomasa después de cada cosecha.

Por otro lado, solamente se detectan diferencias significativas entre los valores experimentales sobre Na y K, y los datos bibliográficos. Mientras que los datos experimentales muestran valores similares entre la concentración de Na y K, según la bibliografía, la relación Na:K varía entre los valores 1:50 a 1:200.

**Tabla X.2. Caracterización físico-química de la biomasa de colza**

	Unidades	Valor	Valores según bibliografía [5]				Valores para <i>Colza etíope</i>	
			Val. medio	Mínimo	Máximo	Desv. Est. (%)	Ref. A [6]	Ref. B [7]
PCS	KJ/Kg b.s.	21.278	22.245	19.384	29.804	16	18.500	18.400
PCI	KJ/Kg b.s.	19.987	20.811	18.234	27.819	16	17.200	17.100
Carbono	% peso, b.s.	52,64	50,8	40,4	62,10	13	46,3	45,7
Hidrógeno	% peso, b.s.	5,74	6,43	4,61	9,10	22	6,1	6,6
Nitrógeno	% peso, b.s.	0,98	2,22	0,80	5,39	75	0,7	1,1
Azufre	% peso, b.s.	0,44	0,50	0,22	0,82	51	0,49	0,17
Cenizas	% peso, b.s.	6,22	5,70	2,90	9,70	33	7,7	5,8

**Tabla X.3. Composición elemental de los elementos minerales presentes en la biomasa de colza**

	Valor (-10 %)	Valor (mg/kg b.s.)	Valores según bibliografía [5]				Paja colza [8]	Madera caducifolio [8]
			Val. medio	Mínimo	Máximo	D. E. (%)		
Calcio (Ca)	1,16	11579,6	11600	11600	11600	-	15000	1200
Sodio (Na)	0,46	4602,1	166	166	166	-	500	50
Potasio (K)	0,44	4393,4	6784	5768	7800	21	10000	800
Fósforo (P)	0,14	1408,0	-	-	-	-	1000	100
Magnesio (Mg)	0,09	899,9	-	-	-	-	700	200
Hierro (Fe)	0,08	759,3	-	-	-	-	100	25
Silicio (Si)	0,05	505,6	400	400	400	0	1000	150
Aluminio (Al)	0,04	379,8	-	-	-	-	50	20
Manganeso (Mn)	0,00	23,3	-	-	-	-	-	83
Zinc (Zn)	0,00	20,4	-	-	-	-	10	10
Cobre (Cu)	0,00	8,1	3,7	2,5	4,6	29	2	2
Cadmio (Cd)	0,00	0,1	0,2	0,1	0,2	36	0,1	0,1
Plomo (Pb)	0,00	0,3	4,1	0,4	11,6	156	2	2

### 10.3.1.2. Análisis térmico de la biomasa

Se han analizado dos muestras de biomasa de colza mediante la técnica de termogravimetría. La Muestra 1 contiene un 53% de humedad y la Muestra 2 un 0% de humedad. La Figura X.11 indica la pérdida de peso detectada mediante el calentamiento de ambas muestras de biomasa en las siguientes condiciones de análisis: (a) 40,0 ml aire/min; (b) incremento de 10 °C/min.

Según los resultados obtenidos, la biomasa de colza seca (0% humedad) experimenta dos pérdidas importantes de masa a lo largo de dos períodos determinados de temperatura: 1er periodo: 220 - 360 °C; 2º periodo: 360 – 500 °C. Estos períodos son nombrados según varios autores como “zonas de reacción” [9].

El final de la primera zona de reacción coincide con el inicio de la segunda zona de reacción. La degradación térmica para ambas zonas se resume en la Tabla X.4. A partir de 500°C la biomasa no experimenta ninguna pérdida de masa importante debido a que ésta ya se encuentra en forma de

Tabla X.4. Degradación térmica en la primera y segunda zonas de reacción.

	Período de degradación	Temperatura inicial de degradación (°C)	Temperatura final de degradación (°C)	Degradación de masa (%)	Tasa de degradación media (%·min <sup>-1</sup> )
Muestra 1	Primero	220	360	50,2	3,6
Muestra 2				26,8	4,0
Muestra 1	Segundo	360	500	56,1	1,9
Muestra 2				23,5	1,7

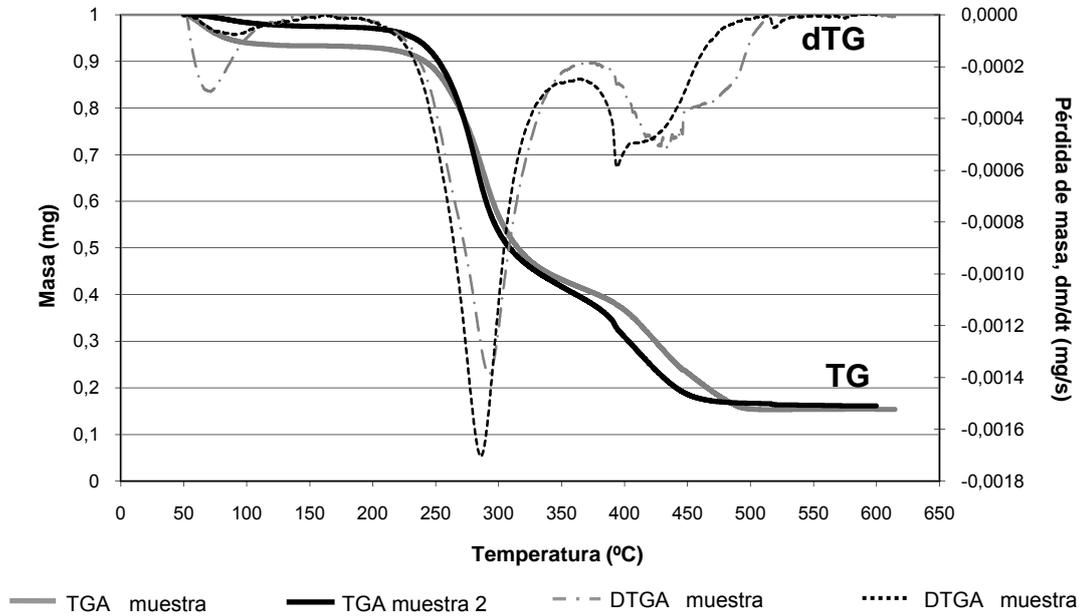


Figura X.11. Termogravimetría (TG) y análisis térmico diferencial (dTG) de la biomasa de colza

cenizas.

El análisis del diferencial de la termogravimetría (DTG) muestra los cambios de velocidad en la pérdida de masa. Se ha aplicado un filtro exponencial sobre los resultados para eliminar las interferencias en los valores experimentales calculados. La relación matemática aplicada es mostrada en la Ecuación 10.3 y Ecuación 10.4.

$$y_{\text{filtrado}}(t) = \alpha \cdot y_{\text{filtrado}}(t-1) + (1-\alpha) \cdot y(t) \quad (\text{Ecuación 10.3})$$

$$\alpha = 1 - [1/(T \cdot ns)] \quad (\text{Ecuación 10.4})$$

Donde:

$y_{\text{filtrado}}(t)$  = valor filtrado en el tiempo  $t$

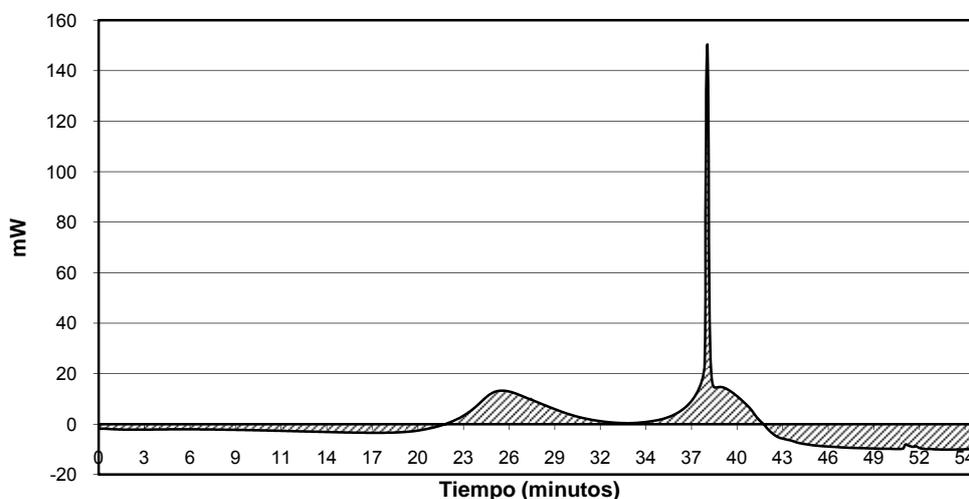
$T$  = constante de tiempo (0,01)

$y(t)$  = valor experimental ( $dpeso/dt$ )

$ns$  = tiempo total del análisis (3388 segundos)

Sobre el gráfico se pueden diferenciar 2 curvas significativas sobre pérdida de masa en las dos zonas de reacción. La primera zona de reacción mantiene una tasa de degradación de materia superior a la segunda zona de reacción (Tabla X.5). Esto es debido a que la fracción “blanda” de la materia (hemicelulosa) es rápidamente degradada a temperaturas relativamente bajas desprendiendo compuestos volátiles que son oxidados en la atmósfera de aire. Cuando la temperatura sigue aumentando, la siguiente fracción menos blanda es degradada térmicamente, finalmente junto con la lignina.

El análisis del calor desprendido en la fragmentación térmica de la estructura de la biomasa de colza a través de la técnica de DSC muestra la correlación entre el inicio de la degradación y el valor térmico del calor desprendido en los procesos de oxidación de los compuestos volátiles (Figura X.12). La integración del área que se encuentra por debajo de la curva (DSC) resulta un valor de 6.825 mJ/mg de muestra, equivalente a 6.825 kJ/kg de colza. Este valor equivale al calor total desprendido, y no es equivalente al poder calorífico total de la muestra debido a que en ningún momento se realiza una combustión completa sino una oxidación parcial de la materia a elevada temperatura.



**Figura X.12. Calorimetría Diferencial de Barrido de la biomasa de colza (0% humedad)**

## 10.3.2. Análisis de las cenizas

### 10.3.2.1. Análisis físico-químico y estructural

En la combustión de la biomasa de colza a 550 °C, se genera una cantidad de cenizas equivalente al 6,22% en peso respecto a la biomasa inicial (0% humedad).

Los elementos químicos de la colza se combinan en la combustión con el oxígeno para generar gases como CO<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>O, y estructuras cristalinas (algunas hidratadas) formadas por óxidos de metales y carbonatos, que residen en el horno en forma de cenizas junto con otros inquemados (escorias). Parte de los compuestos sólidos formados son arrastrados por las corrientes de aire junto con el resto de gases de combustión (cenizas volantes).

Se ha realizado un análisis elemental de cenizas (C, H, N y S) que permite conocer la cuantificación de los elementos que son mayoritarios en la biomasa de colza fresca, y residen en las cenizas después de la combustión en forma de los siguientes compuestos (Tabla X.5, Tabla X.6 y Tabla X.7):

- C inorgánico en forma de carbonatos,
- H en forma de H<sub>2</sub>O,
- S en forma de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, S<sup>2-</sup> y otras formas minoritarias (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>).

El balance de materia realizado muestra como la mayoría de C, H y N presentes en la biomasa de colza son oxidados completamente en la combustión (eliminación superior al 99%).

El 0,74% del carbono original en la biomasa de colza, es presente en las cenizas en forma de carbonatos. La cantidad de carbonatos presentes en las cenizas es del 31% (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>).

**Tabla X.5. Caracterización química de las cenizas de biomasa de colza**

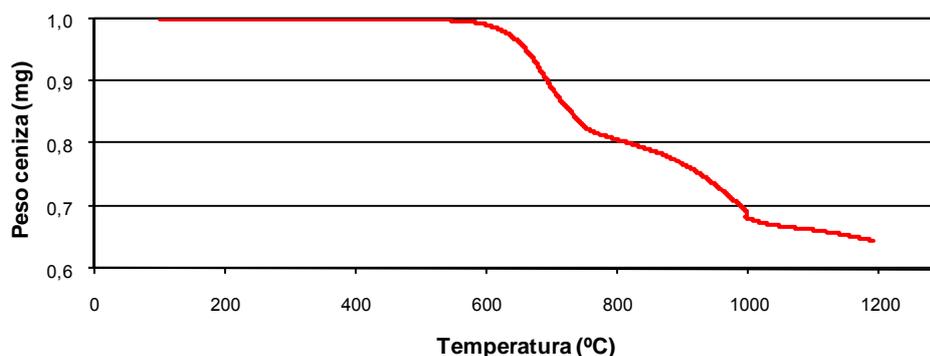
	Contenido en cenizas (%) (experimental ceniza)	Contenido en biomasa seca (%) (experimental biomasa)	Balance (% pérdida sobre biomasa fresca)
Contenido en cenizas (%)	6,22	-	-
Carbono (C)	6,23	52,64	99,26
Hidrógeno (H)	0,03	5,74	99,97
Azufre (S)	4,17	0,44	41,05
Nitrógeno (N)	0,00	2,22	100,00
<b>TOTAL Análisis elemental</b>	<b>10,43</b>	<b>61,04</b>	

**Tabla X.6. Caracterización química de los elementos seleccionados en las cenizas de la biomasa de colza**

	Contenido en cenizas (%) (experimental ceniza)	Contenido en biomasa seca (%) (experimental biomasa)	Elementos biomasa en ceniza (%) (calculado para balance)	Balance (% pérdida sobre biomasa fresca)
Ca	19,59	1,16	18,62	16,26
Na	5,10	0,46	7,40	31,07
K	13,26	0,44 *	7,06	-87,73 *
P	1,49	0,14	2,26	34,18
Mg	1,38	0,09	1,45	4,62
Fe	0,14	0,08	1,22	88,53
Si	2,27	0,05 **	0,81	-179,26 **
Al	0,41	0,04	0,61	32,85
Mn	0,02	0,00	0,04	46,61
Zn	0,01	0,00	0,03	69,51
Cu	0,00	0,00	0,01	100,00
Cd	0,00	0,00	0,00	100,00
Pb	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>TOTAL Elementos seleccionados</b>	<b>43,68</b>	<b>2,46</b>		

**Tabla X.7. Balance de elementos presentes en las cenizas de biomasa de colza**

Elemento	Forma oxidada	% en peso	Valores según la Bibliografía			
C	CO <sub>2</sub>	22,84				
H	H <sub>2</sub> O	0,27				
S	SO <sub>3</sub>	10,43				
N	NO <sub>x</sub>	-				
<b>TOTAL análisis elemental</b>		<b>33,54</b>	<b>Colza</b> Ref. C [10]	<b>Colza</b> Ref. D [11]	<b>Colza e.</b> Ref. A [6]	<b>Colza e.</b> Ref. B [7]
Ca	CaO	27,42	27,6	29,4	25,0	23,0
Na	Na <sub>2</sub> O	6,88	0,4	0,4	0,72	0,7
K	K <sub>2</sub> O	15,98	12,1	16,8	16,0	21,0
P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,41	2	8,9	3,8	9,1
Mg	MgO	2,30	1,8	0,6	2,2	3,2
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	1,8	0,9	0,5	0,3
Si	SiO <sub>2</sub>	4,87	36,7	3,2	8,1	7,6
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,01	4,9	0,5	1,3	0,6
Mn	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,03	0,04	n.d.	n.d.	n.d.
Zn	ZnO	0,01	0,02	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	CuO	0,00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cd	CdO	0,00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Pb	PbO <sub>2</sub>	0,00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>TOTAL elementos seleccionados</b>		<b>62,13</b>				
<b>TOTAL CENIZAS</b>		<b>95,67</b>				
<b>CÁLCULO CANTIDAD OXÍGENO (por diferencia en pesos)</b>		<b>41,56</b>				



**Figura X.13. Análisis de termogravimetría de las cenizas de biomasa de colza (100-1200°C)**

En la combustión, el H presente en la biomasa es prácticamente oxidado en su totalidad a H<sub>2</sub>O. El pequeño porcentaje sobre H mostrado en el análisis elemental puede ser justificado como humedad absorbida en la ceniza, o como la existencia de compuestos hidratados en la composición mineral de las cenizas.

Por otro lado, el S presente en la biomasa es oxidado de modo distinto formando los siguientes compuestos:

- SO<sub>2</sub>: 41% de S contenido en la biomasa es oxidado a SO<sub>2</sub> gas, y emitido en la combustión.
- S<sup>2-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: el 59% del S contenido en la biomasa reside en las cenizas en forma de S<sup>2-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

En las cenizas se han analizado el resto de elementos químicos que previamente han sido cuantificados en la biomasa seca de colza (antes de la combustión). Tablas X.5, Tabla X.6 y Tabla X.7. Según los resultados, la mayoría de los elementos seleccionados en la biomasa fresca residen en más de un 60% en peso en las cenizas.

Según los resultados obtenidos en el balance de elementos (Tabla X.7), el O es el elemento mayor cuantificado en las cenizas (41,6% en peso). El O se combina con el resto de elementos cuantificados formando óxidos, carbonatos y sulfatos. El oxígeno asociado al carbonato representa un porcentaje en peso sobre el total cenizas del 25% (valor calculado a partir del C<sub>inorgánico</sub>). Este valor es similar al demostrado mediante el análisis de termogravimetría efectuado en una muestra de ceniza de biomasa de colza (Figura X.13). La pérdida de masa detectada a 1200°C la temperatura final fue del 35,5%. Si se atribuye la pérdida de masa a la calcinación total de los carbonatos (a partir de 600°C), el carbono que es volatilizado en forma de CO<sub>2</sub> resulta el 9,7% del peso inicial de la muestra de ceniza.

En relación al resto de componentes, el Ca, K, Na y P se presentan de modo significativo en las cenizas de biomasa (37% en peso de los elementos cuantificados en las cenizas).

Cabe destacar la composición de Si en la caracterización físico-química de la biomasa de colza y las diferencias entre los valores detectados en la bibliografía para este elemento. Debido al uso de diferentes métodos de digestión de muestras, el silicio cuantificado en la biomasa de colza se encuentra en menores proporciones al cuantificado en las cenizas. Esto puede ser debido a dos motivos:

- La neutralización del HF con H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> no ha sido completa, y el HF restante en la digestión ha disuelto parte de los elementos de cuarzo presentes en el analizador ICP-AES. El análisis de la muestra digerida sin ceniza resultó positiva en silicio, aunque esa concentración fue restada de los análisis correspondientes a las muestras de ceniza digeridas.
- La digestión del Si con HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ha sido insuficiente, resultando una concentración menor a la esperada. Por otro lado, la cantidad de biomasa digerida fue relativamente pequeña en comparación a la ceniza y los reactivos usados tenían la suficiente concentración para asegurar una digestión completa de la muestra.

En base a los resultados obtenidos sobre cuantificación de elementos químicos en las cenizas, la técnica de difracción de rayos X ha permitido conocer en qué forma mineral se encuentran estos elementos en las cenizas. La representación de los resultados en el difractograma (Figura X.14) destaca la presencia de los siguientes compuestos: calcita (CaCO<sub>3</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), carbonato potásico (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), sulfato potásico (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y sulfato de magnesio hidratado (MgS<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>). Otros compuestos identificados cerca del pico de 28,5 grados son el Silicio y el sulfato de zinc (ZnS).

Por otro lado, en el pico cercano a 47 grados se encuentran como posibles compuestos presentes: AlTi<sub>3</sub>, TiC<sub>2</sub> y TiSi<sub>2</sub>. En el pico aproximado de 28,8 grados también pueden ser presentes los siguientes elementos: 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·4SO<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O, y Fe<sub>3</sub>PO<sub>7</sub>.

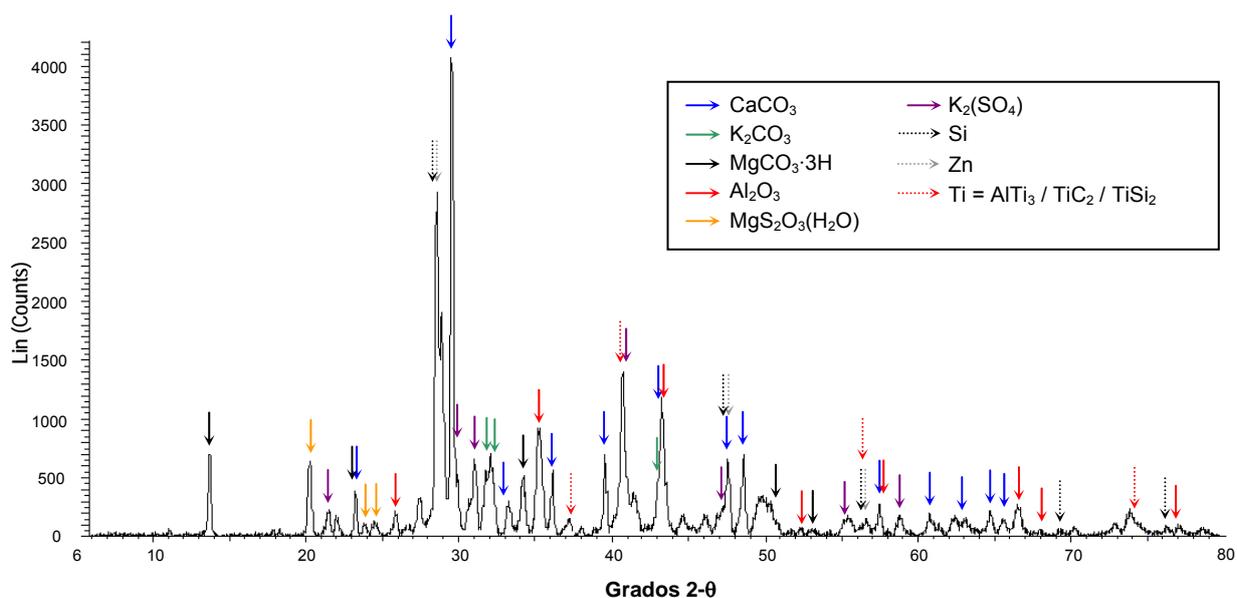


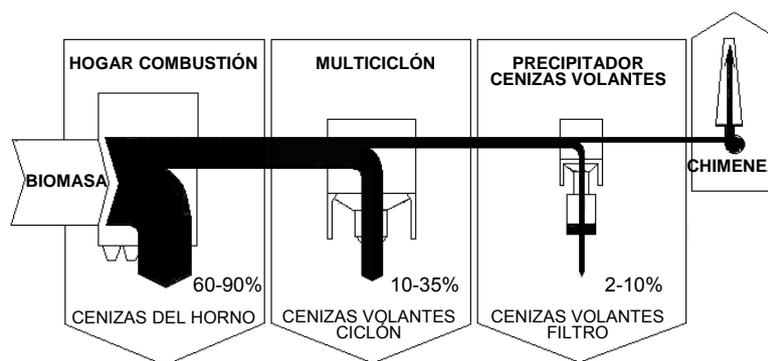
Figura X.14. Difractograma de la ceniza de colza

Los compuestos minoritarios que se ciñen en mayor intensidad a la señal representada en el difractograma son:  $\text{KO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{OCaMg}(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{Si}_2\text{O}_5)$ ,  $\alpha\text{-Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $2\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CuS}$ .

### 10.3.2.2. La gestión eficiente de las cenizas de la biomasa

La industria energética de la madera genera grandes cantidades de ceniza que son dispuestas en su mayoría en los vertederos. La aparición de nuevas normativas entorno a la conservación del medio ambiente ha generado el aumento del coste de esta disposición y la dificultad en la adquisición de nuevos emplazamientos para la disposición de este residuo. Por otro lado, en el bosque, del mismo modo que en la agricultura, la pérdida de nutrientes en el suelo empieza a ser evidente a largo plazo de su explotación. La extracción de hojas y ramas del medio donde han crecido conlleva la pérdida de nutrientes limitantes que han sido acumulados en la biomasa (Ca, Mg, K y P), y por tanto, la acidificación del suelo [12]. Por estos motivos, numerosos autores han centrado su estudio en la identificación de los elementos que componen las cenizas generadas en la valorización energética de la biomasa para su uso como fertilizantes en la agricultura y los bosques [13-19].

Cabe mencionar que en la valorización energética de la biomasa, la cantidad y la concentración de los elementos hallados en las cenizas varían dependiendo de donde sean recogidas en la propia planta (Figura X.15 y Tabla X.8).



**Figura X.15. Fracciones de ceniza producidas en plantas de combustión de biomasa**

Fuente: Adaptado de [16].

**Tabla X.8. Distribución de los elementos inorgánicos en las diversas fracciones de cenizas en una planta de combustión de biomasa.**

Elemento	Total (suma de todas las fracciones) (mg/kg b.s.)	Distribución en las diversas fracciones de las cenizas			
		Cenizas en el horno (%)	Cenizas volantes en ciclón (%)	Cenizas volantes en filtro	Humos en chimenea
Si	78000	73,4	21,7	3,8	1,1
Ca	339000	66,1	29,0	3,8	1,1
Mg	28300	69,5	26,2	3,3	1,0
K	42900	55,6	35,2	7,1	2,1
Na	3300	60,7	22,4	13,0	3,9
P	10100	66,3	26,0	5,9	1,7
Al	24100	75,8	20,5	2,9	0,9
S	11300	25,6	51,8	17,5	5,2
Cl	3800	7,2	63,5	22,6	6,7
Fe	16700	70,4	26,6	2,3	0,7
Mn	19000	64,7	30,0	4,0	1,2
Cu	237,6	61,9	21,7	12,6	3,7
Zn	2094,5	23,2	45,2	24,4	7,2
Co	14,2	68,2	26,1	4,4	1,3
Mo	3,2	29,9	28,2	9,2	2,7
As	5,8	51,6	32,2	12,5	3,7
Ni	46,2	58,7	31,5	7,6	2,3
Cr	257,6	72,6	19,7	5,9	1,8
Pb	65,9	11,7	34,2	41,7	12,4
Cd	18,2	6,4	47,0	36,0	10,7
V	45,1	71,5	22,8	4,4	1,3
Hg	0,4	0,8	7,6	70,7	20,9
TOTAL		64,5	28,5	5,4	1,6

Nota: Combustible: mezcla de cortezas y astillas de madera; tecnología de combustión: parrilla móvil en una planta térmica de 4 MW. Fuente: Adaptado de [16].

### 10.3.3. Análisis del secado de la biomasa de colza

#### 10.3.3.1. Estado del estudio del secado de la biomasa residual

Se entiende por secado el procedimiento para eliminar el líquido de un producto, bien por evaporación o por vaporización, con ayuda, por lo general, de calor. Pueden considerarse como métodos de secado aquellos en que el agua, sin cambiar de estado, se extrae por medios mecánicos: presión, filtrado o centrifugación. El secado natural, en cambio, se basa en la pérdida de humedad de la biomasa por evaporación, debido a la influencia de la humedad relativa y de la temperatura del ambiente. El fenómeno de la evaporación a través de una corriente de aire implica un intercambio simultáneo de calor y de materia en el medio. Los principios físicos que definen el secado natural fueron resueltos por W. Nusselt, (1930), E. Schmidt (1929), junto con las ecuaciones de Fick y Fourier [34].

El secado es un proceso comúnmente utilizado en la producción industrial de alimentos, y en la preparación y fabricación de materiales. Los principales sectores industriales que han desarrollado las tecnologías basadas en este proceso son los siguientes:

- Industria del mueble: secado de la madera para la fabricación de materiales de construcción y muebles
- Industria agroalimentaria: cereales (ej.: arroz, cebada y trigo), legumbres, hortalizas y frutas
- Industria energética: residuos forestales y agrícolas, cultivos energéticos.

En la actualidad, se disponen de numerosos estudios que resumen y detallan los mecanismos físico-químicos del secado para su aplicación tecnológica en las industrias del mueble, agroalimentaria y energética [34-22]. Sin embargo, cabe destacar que el estudio la tecnología del secado se aplicó inicialmente en la industria de la transformación de la madera [34]. Desde el inicio del siglo veinte, la necesidad del tratamiento y transformación de este material a escala industrial requirió el conocimiento de la capacidad de sorción (isotermas de adsorción y desorción) de la humedad en la madera, los mecanismos de propagación del calor (por convección, conducción y radiación) en este material, así como el conocimiento de los mecanismos de pérdida de masa y humedad de la madera ante diversas condiciones de temperatura, humedad ambiental y presión [34].

En la industria energética, el secado de la biomasa es considerado como un proceso necesario, con un coste añadido, que adapta la calidad del combustible de biomasa a las condiciones óptimas de combustión [23-25]. Numerosos autores han interpretado la influencia de la humedad de la biomasa en la calidad de la combustión [23-33].

Los principios teóricos del secado forzado de la biomasa para la producción de energía basa su tecnología en el secado de la madera en la fabricación de tableros y muebles [35,36]. El consumo de energía en el secado forzado es significativo. Por este motivo, a partir del año 1950 se estudió la influencia de la energía térmica de los gases de combustión en el secado forzado de la biomasa (Kröll, 1950) [34]. El suministro continuo de una planta de valorización energética con biomasa requiere el control de la humedad de la biomasa que va a ser consumida. La viabilidad del secado forzado es en la actualidad estudiado para algunos casos prácticos de combustión de biomasa [37].

El secado natural de la biomasa leñosa (residuos forestales, agrícolas y cultivos energéticos) antes de ser transportada y suministrada en una planta de generación de energía conlleva una

disminución de costes en relación al transporte de biomasa en verde y un posterior secado forzado. Por este motivo, el secado natural de biomasa ha sido practicado desde el funcionamiento de las primeras plantas de generación térmica/eléctrica con biomasa [38,39].

En los cultivos energéticos, J.K. Gigler et al. (2000) inició la creación de modelos sobre secado natural para Cultivos de Corta Rotación (CCR) como el sauce [40,41]. Gigler estudió la pérdida de humedad de astillas y varas de sauce a partir de considerar la difusividad del agua a través de la madera y de la corteza en una forma de cilindro, la temperatura ambiental, y la velocidad y humedad relativa del aire. Este principio teórico es aplicable a otras especies de CCR de madera, considerando las nuevas variables que modifican el modelo inicial diseñado por Gigler.

Para los residuos de los cultivos herbáceos no se disponen de estudios detallados sobre pérdida de humedad por secado natural. La mayoría de los residuos herbáceos generados en la agricultura son destinados para alimentación ganadera, y en pocos casos, utilizados como combustible en la producción de energía (ej.: paja de cereales).

Los actuales estudios de secado de la colza (*B. napus*) se enfocan en el seguimiento de la calidad del grano y su merma en el almacenado cuando es posteriormente molido en la producción del aceite de colza [42-48]. Para los residuos de colza destinados a aprovechamiento energético, se disponen de estudios sobre: **(a)** caracterización físico-química y energética de la torta residual obtenida en la producción de biodiesel [49], **(b)** estudios sobre co-combustión de residuos de colza con madera [50], **(c)** la producción de energía y de biocombustibles de 2ª generación en paralelo a la producción de biodiesel del grano de colza [51].

El estudio del secado de la biomasa de colza para su uso directo como combustible no ha sido hasta el momento objeto de investigación. Los resultados obtenidos sobre secado natural pueden ser útiles en la planificación de la cadena de suministro de biomasa. Un menor contenido de agua en la biomasa contribuye a un menor consumo de combustible fósil y la optimización en el total de kilómetros recorridos por los camiones que efectuarán el transporte por carretera.

### 10.3.3.2. Evolución del secado natural del montículo de colza

La Figura X.16 muestra la evolución del secado natural de la biomasa de colza dispuesta en forma de montículo durante los meses de verano. Los datos muestran los resultados sobre contenido de humedad de la colza en intervalos de 2 y 3 días. Des del término de la cosecha, la biomasa de colza contuvo diferentes grados de humedad según el diámetro del tallo analizado. Los contenidos medios de humedad al inicio del periodo de experimentación son los siguientes:

- (Muestra 1)  $\Phi > 1,5 \text{ cm} \rightarrow 78\%$
- (Muestra 2)  $1,5 \text{ cm} > \Phi > 1 \text{ cm} \rightarrow 72\%$
- (Muestra 3)  $1 \text{ cm} > \Phi > 0,5 \text{ cm} \rightarrow 41\%$
- (Muestra 4)  $0,5 \text{ cm} > \Phi \rightarrow 16\%$

A los 5 días de iniciar el secado de la biomasa, el contenido medio de agua disminuyó significativamente para todos los diámetros de colza hasta situar-se en valores entre 11 y 17% de humedad. Las reducciones del contenido de agua para cada tipo de muestra son las siguientes:

- (Muestra 1)  $\Phi > 1,5 \text{ cm} \rightarrow \Delta = -78\%$
- (Muestra 2)  $1,5 \text{ cm} > \Phi > 1 \text{ cm} \rightarrow \Delta = -84\%$
- (Muestra 3)  $1 \text{ cm} > \Phi > 0,5 \text{ cm} \rightarrow \Delta = -73\%$
- (Muestra 4)  $0,5 \text{ cm} > \Phi \rightarrow \Delta = -31\%$

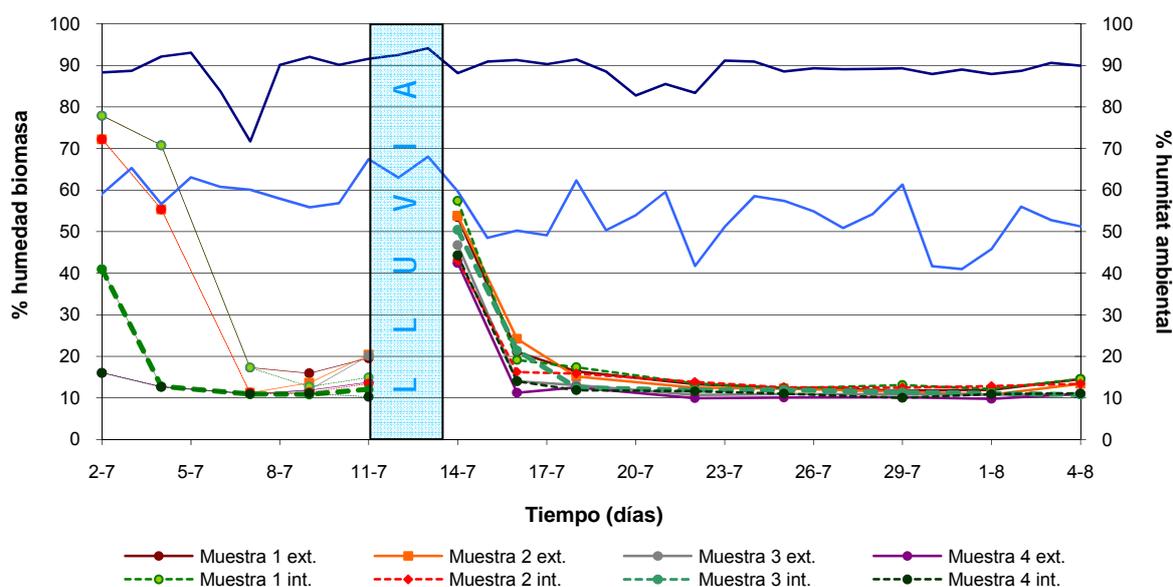


Figura X.16. Evolución del secado natural de la biomasa de colza

El grado de secado alcanzado por el montículo de biomasa en 5 días, se aproximó al valor de humedad de equilibrio higroscópico de la madera en la provincia de Girona (11-15%).

A partir de entonces, la humedad del montículo se mantuvo en equilibrio. Debido a que las muestras fueron extraídas por la mañana, el rocío presente en la superficie del montículo determinó que las muestras extraídas del interior mantuvieran valores medios de humedad inferiores (entre 1 y 3%) a los detectados para las muestras exteriores (Valores días 9/7-11/7). Las precipitaciones ocurridas en los días 11, 12 y 13 de julio empaparon la biomasa completamente. Los valores medios de humedad para todos los diámetros evaluados, partieron desde el 100% para iniciar su secado natural, y más específicamente, desde el 43 al 57% según el primer registro sobre contenido de humedad después del período de precipitación.

Según los resultados obtenidos en el período completo de experimentación sobre el secado natural de la biomasa de colza campo, en condiciones meteorológicas favorables se puede alcanzar una reducción del contenido de humedad entre el 31-78% para la biomasa colza en 5 días. La reducción del contenido de humedad contiene implicaciones directas en la logística de carga, transporte y descarga de la biomasa en planta, disminuyendo sus costes al transportar menos agua.

Cabe destacar que el cubrimiento del montículo de biomasa de colza por un material impermeable mejora las condiciones de secado debido a la eliminación del contacto directo del agua en un régimen de precipitaciones. Dados los resultados sobre tiempo de secado mínimo de la biomasa de colza, la valorización energética a escala comercial de este tipo de biomasa requeriría un almacén cubierto y ventilado para garantizar el secado de parte de la biomasa que va a ser suministrada en la planta de valorización final. El resto de biomasa puede ser expuesto a las condiciones meteorológicas si la fracción que va a ser próximamente consumida por la planta de valorización se mantiene en un lugar seco.

### **10.3.3.3. El secado de la colza en la termobalanza**

Se ha calculado la velocidad de pérdida de humedad para los diámetros de muestra seleccionados (Ver Figura X.17). Las muestras seleccionadas corresponden a:

- (1) biomasa fresca en el primer día de secado,
- (2) biomasa seca en el día 5 de secado

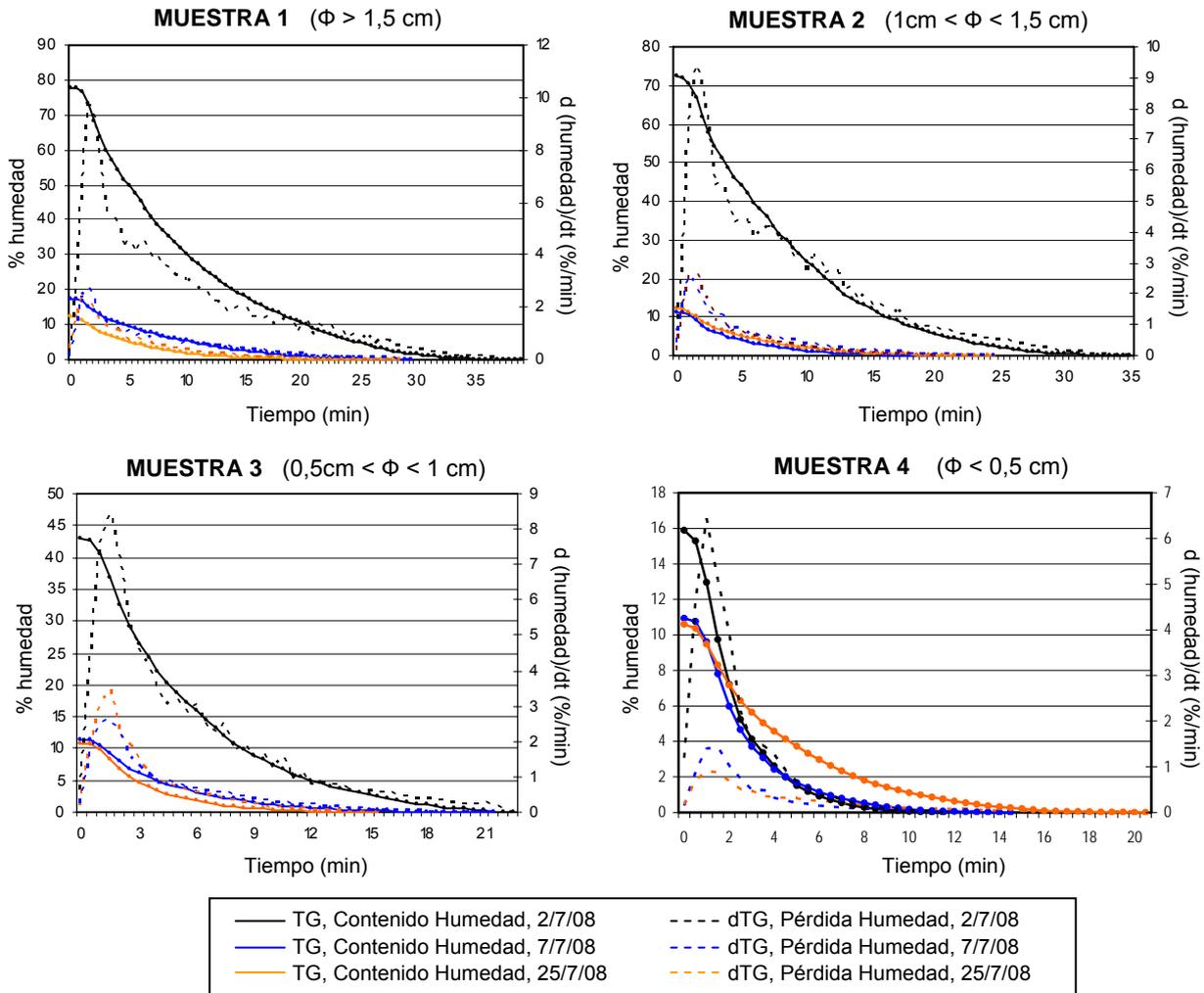


Figura X.17. Análisis del contenido de humedad (TG) y de su pérdida (dTG) en muestras de colza.

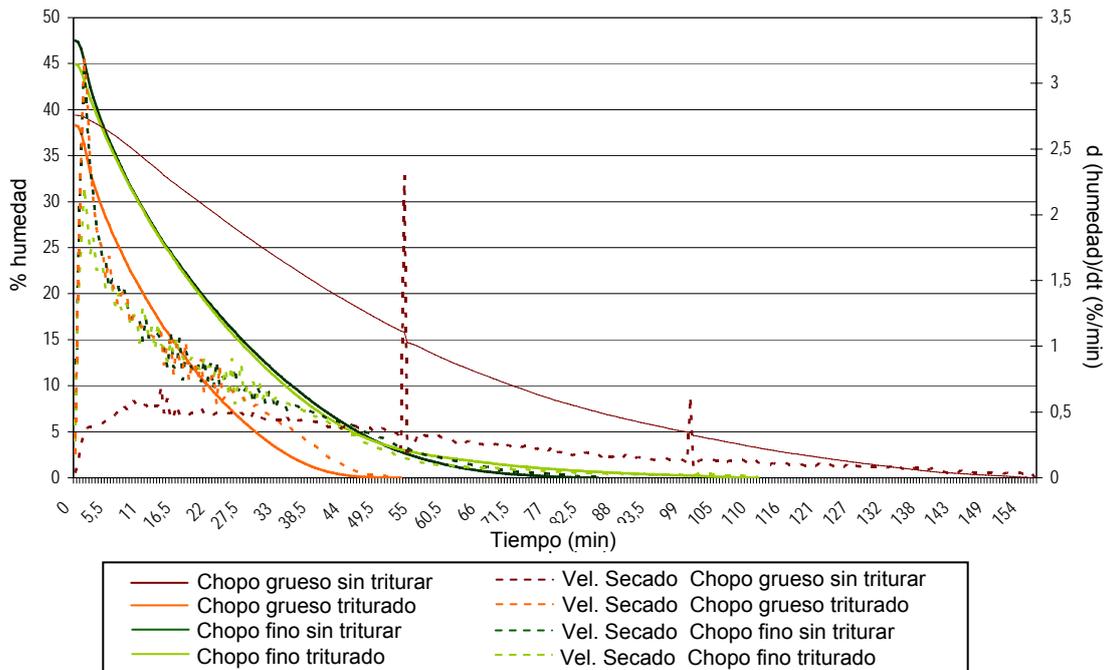


Figura X.18. Análisis del contenido de humedad (TG) y de su pérdida (dTG) en muestras de chopo (Nota: Grueso:  $\Phi \sim 1-1,5$  cm; Fino:  $\Phi < 1$  cm)

(3) biomasa seca en el día 22 de secado.

Para todos los diámetros de la biomasa de colza analizados, el tiempo necesario para el secado y la velocidad de pérdida de agua por la acción del infrarrojo en la termobalanza, son proporcionales al contenido inicial de humedad de la muestra de colza. Para todos los casos analizados, la velocidad de pérdida de agua en las muestras aumenta hasta llegar a la temperatura de secado de la termobalanza (105°C). Esta velocidad corresponde a la etapa de precalentamiento de la muestra. Cuando la temperatura de la colza se encuentra a 105°C, se produce la evaporación del agua libre o líquido adherente a la materia. Cuando este proceso es finalizado, se establece otra aceleración negativa en la velocidad de pérdida de humedad, correspondiente a la pérdida de agua intersticial o capilar. La difusividad del agua a esta escala capilar es menor, por lo que el calor necesario para la evaporación del agua capilar es más grande. Por este motivo, se requiere más tiempo para finalizar el secado en esta fase de la materia.

El líquido de hinchado o celular es el agua que mantiene una resistencia a la evaporación más elevada. Al finalizar la evaporación capilar, el valor de velocidad de pérdida de humedad disminuye a valores cercanos a cero. Es en estos valores donde se entiende que el agua celular es evaporada.

Los mecanismos de secado mencionados se distinguen con más claridad dependiendo del grado de humedad inicial de la muestra de colza analizada. La velocidad de pérdida de agua libre es proporcional al contenido de humedad de la muestra. Cuanto más seca se encuentra la biomasa de colza, el contenido de humedad libre es menor. En este caso, la mayor parte del agua contenida en la muestra es capilar y celular.

Por otro lado, los mecanismos de pérdida de humedad se repiten para todos los materiales de biomasa pero con distinto grado de intensidad. El tiempo total de secado para el chopo, en comparación con la colza, es mayor debido a la menor difusividad del agua en la madera en relación a la biomasa de colza. (Figura X.18). Al triturar el chopo hasta obtener partículas de tamaño inferior a 0,1 cm, la superficie de contacto del calor con el material aumenta favoreciendo el secado de la biomasa por la termobalanza.

Es posible aplicar el modelo de Gigler sobre secado natural del sauce en el chopo, a partir de los valores de difusividad del agua en el chopo en los distintos diámetros de la vara cortada. Estos valores no han sido determinados experimentalmente.

## 10.4. Conclusiones

Del trabajo documentado en este capítulo se extraen las siguientes conclusiones:

- La producción de biodiesel a partir del grano de colza puede ser complementada con la producción de energía a partir de la biomasa residual generada en la cosecha del cultivo (*Brassica napus*).
- Las características físico-químicas y el contenido energético de la biomasa de colza (*Brassica napus*) son similares a la biomasa de colza etíope (*Brassica carinata*).
- La biomasa de colza, en comparación a otras biomásas, contiene un contenido relativamente elevado en azufre (del orden de 0,44%). En la combustión a 550°C, el 41% del azufre es liberado en los gases de combustión en forma de SO<sub>2</sub>.
- Las cenizas obtenidas en la combustión de la biomasa de colza contienen una elevada concentración de Ca (20%), Na (5%), K (13%) y P (37% en peso).
- Los minerales presentes en mayor concentración en las cenizas son: La calcita (CaCO<sub>3</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), carbonato potásico (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), sulfato potásico (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y sulfato de magnesio hidratado (MgS<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>).
- El uso de las cenizas obtenidas en la combustión de la colza como fertilizantes en el terreno de cultivo, permite el retorno de parte del K y P que han sido previamente absorbidos durante el crecimiento de la biomasa de colza y la formación del grano.
- La disposición de las cenizas de colza como fertilizantes en el campo reduciría la necesidad de aplicación de fertilizantes químicos, reduciendo el coste de la operación agrícola.
- Las condiciones meteorológicas de la zona de cultivo en la provincia de Girona ha permitido el secado natural de la biomasa de colza en un período mínimo de 5 días. Los valores sobre reducción del contenido de humedad en este periodo son del 31- 78%, dependiendo del diámetro expuesto al secado natural.
- Dados los resultados sobre tiempo de secado mínimo de la biomasa de colza, la valorización energética a escala comercial de este tipo de biomasa requiere un almacén cubierto y ventilado

para garantizar el secado de parte de la biomasa que va a ser consumida a corto plazo en la planta de valorización final.

- Las evaporaciones del agua libre, capilar y celular en el secado de la biomasa de colza son más rápidas cuanto mayor es el contenido de humedad inicial.
- Otros tipos de biomasa, como el chopo, requieren tiempos de secado mayores. La estructura lignocelulósica de la biomasa de chopo retarda la difusión del agua desde el interior de la materia. Por este motivo, se requiere más tiempo para el secado natural de la biomasa de chopo.

## 10.5. Referencias

- [1] Peterson, C. L. et al (1995). Potential Production of Agriculturally Produced Fuels. Applied Engineering in Agriculture. Vol. 11 (6), pp. 767-772.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org> (Consulta: Agosto 2008)
- [3] Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció rural (2007). Estadístiques Agrícoles, Agrocarburants. [En línea]. Disponible en: <http://www.gencat.cat> (Consulta: Abril 2008).
- [4] Institut de Recerca i Tecnologies Agroalimentàries (IRTA) (2006). Experimentación de variedades de Colza para biodiesel en España. Vida Rural, nº235, pp. 24-27. [En línea]. Disponible en: <http://www.irta.es/> (Consulta: Mayo 2008).
- [5] Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) (2008). Database Phyllis. [En línea] Disponible en: [www.ecn.nl/phyllis/](http://www.ecn.nl/phyllis/) (Consulta: Setiembre 2008).
- [6] Llorente, M.J.F. et al (2006). Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering. Fuel. Vol. 85 (14-15), pp. 2081-2092.
- [7] Llorente, M.J.F. et al (2006). Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion. Fuel. Vol. 85 (9) pp. 1157-1165.
- [8] Biedermann, F. y Obernberger, I. (2005). Ash-related problems during biomass combustion and possibilities for a sustainable ash utilisation. Bios Bioenergiesysteme GmbH. [En línea]. Disponible en: <http://www.bios-bioenergy.at/> (Consulta: Diciembre 2008)
- [9] Mansaray, K.G. y Ghaly, A.E. (1999). Determination of kinetic parameters of rice husks in oxygen using thermogravimetric analysis. Biomass and Bioenergy. Vol. 17, pp. 19-31.
- [10] Tortosa, A. et al. (2007). Characterising ash of biomass and waste. Fuel Processing Technology, Vol. 88, pp. 1071-1081.
- [11] University of Technology Vienna (Austria), Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology (1996), BIOBIB Database. [En línea]. Disponible en: <http://www.vt.tuwien.ac.at/Biobib> (Consulta: Noviembre 2008)
- [12] Lundborg, A. (1998). A sustainable forest fuel system in Sweden. Biomass and Bioenergy, Vol. 15 (4-5), pp. 399-406.
- [13] Uckert G. et al. (2001). Utilisation of boiler ash from biomass heating plants as fertiliser substitute. Plant nutrition-Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers. pp. 992-993.
- [14] Bae Park, B. et al (2005). Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation. Biomass and Bioenergy. Vol. 28 (4), pp. 335-365.
- [15] Obernberger, I. et al. (1997). Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. Biomass and Bioenergy. Vol. 12 (3), pp. 211-224.
- [16] Narodoslowsky, M. y Obernberger I. (1996). From waste to raw material-the route from biomass to wood ash for cadmium and other heavy metals. Journal of Hazardous Materials. Vol. 50, pp.157-168.
- [17] Etiegni, L. y Campbell, A.G. (1991). Physical and chemical characteristics of wood ash. Bioresource Technologies. Vol. 37, pp. 173-178.

- [18] Ulery, A.L. et al. (1993). Wood-ash composition and soil pH following intense burning. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 156, pp. 358-364.
- [19] Demeyer A., et al. (2001) Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology*. Vol. 77, pp. 287-295.
- [20] Álvarez, H. y Fernández-Golfin, J.I. (1992). *Fundamentos Teóricos del secado de la madera*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Colección Monografías INIA. Madrid.
- [21] Earle, R.L. (1988). *Ingeniería de los alimentos, las operaciones básicas del procesado de los alimentos*. Segunda edición. Editorial ACRIBIA, Zaragoza.
- [22] Llorca, M (1995). *Modelización de la operación de secado de malta, por aire caliente, en lecho fijo y en capa profunda*. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida.
- [23] Jirjis, R. (1995) Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 9, pp. 181-190.
- [24] Holmberg, H. y Ahtila, P. (2004). Comparison of drying costs in biofuel drying between multi-stage and single-stage drying. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 26 (6), pp. 515-530.
- [25] Nurmi J. (1995). The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 8, pp. 245-249.
- [26] Liang, T.; Khan, M. y Meng Q. (1996). Spatial and temporal effects in drying biomass for energy. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 10, pp. 353-60.
- [27] Liang, L. et al. (2008). Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 7238-7246.
- [28] Ziebig, A (2007). Selected problems of biomass co-combustion in energy conversion systems. *Archives of Thermodynamics*. Vol. 28 (3) pp. 57-66.
- [29] Elfaskhny, A. y Bai, X.S. (2006) Modelling of pulverised wood combustion: A comparison of different models. *Progress in Computational Fluid Dynamics*. Vol. 6 (4-5), pp. 188-199.
- [30] Huttunen, M. et al. (2006). Emission formation during wood log combustion in fireplaces – Part I: Volatile combustion stage. *Progress in Computational Fluid Dynamics*. Vol 6 (4-5), pp. 200-208.
- [31] Kumagai, S. et al. (2006). Optimisation of thermal preprocessing for efficient combustion of woody biomass. *JSME International Journal Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*. Vol 58 (4), pp. 426-431.
- [32] Frei, K. et al. (2004). Drying pulp and paper mill mixed sludges for combustion using a novel biodrying process. *Proceedings – PulPaper 2004 Conference and Exhibition, Energy and Carbon Management*. 1-3 Junio. Helsinki (Finlandia). pp.: 77-84.
- [33] Have, H. y Henriksen, K.S. (1998). An energy-efficient combustion system for high-moisture organic wastes and biomasses. *Journal of the chartered Institution of Water and Environmental Management*. Vol. 12 (3), pp. 224-232.
- [34] Kneule, F. (1976). El secado. *Enciclopedia de la Tecnología Química. Técnica de Procesos de las Industrias Químicas y Derivadas Tomo 1*. URMO, S.A. de Ediciones. Bilbao.

- [35] Arola, R.A. (1988). Chunkwood drying research with northern US hardwoods. Production, Storage and Utilization of Wood Fuels, Proceedings of IEA/BE Conference Task III. 6-7 Diciembre. Upsala (Suecia). pp. 101-119.
- [36] Frea, Ward J. (1984). Economic analysis of systems to pre-dry forest residues for industrial boiler fuel. Symposium Papers – Energy from Biomass and Wastes VIII. Lake Buena Vista, Florida (Estados Unidos), pp. 307-338.
- [37] Gigler, J.K. et al. (2000). Forced convective drying of willow chips. Biomass and Bioenergy. En prensa.
- [38] Thornqvist, T. (1985). Drying and storage of forest residues for energy production. Biomass. Vol. 7, pp. 125-34.
- [39] Miyata, D. et al (2006). Natural drying of logging residue stems along a forest road and on a pavel landing. Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society. Vol. 88 (4) pp. 245-253.
- [40] Gigler, J.K. et al. (2000). Natural wind drying of willow stems. Biomass and Bioenergy, Vol. 19, pp. 153-163.
- [41] Gigler, J.K. et al. (2000). PH-Postharvest Technology: Drying Characteristics of Willow Chips and Stems. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 77, pp. 391-400.
- [42] Thakor, N.J. et al. (1990). Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying. Journal of Food Engineering. Vol. 40, pp. 153-160.
- [43] Correa, P.C. et al. (1999). Thin layer drying rate and loss of viability modelling for rapeseed (canola). Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 74, pp. 33-39.
- [44] Crisp, J. y Woods, J.L. (1994). The drying properties of rapeseed. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 57, pp. 89-97.
- [45] Crozza, D.E. et al. (2005). An inferential control strategy for low-temperature Canola/Colza drying. Drying Technology. Vol. 23 (3), pp. 683-690.
- [46] de Dios, C.A. (1996). Secado de granos y secadoras. Publicado por FAO.
- [47] Pagano, A.M., Crozza, D.E. (2002). Near ambient drying of canola. Drying Technology. Vol. 20 (10), pp. 2093-2104.
- [48] Kundu, K.M. et al. (2005). On the analysis of drying process. Drying Technology. Vol. 23 (5), pp. 1093-1105.
- [49] Çulcuoğlu, E. et al (2002). Rapeseed cake as biomass source. Energy Sources. Vol. 24 (4) pp. 329-336(8).
- [50] Barišić, V. et al. (2008). The role of limestone in preventing agglomeration and slagging during CFB combustion of high-phosphorous fuels. Paper presentado en el Congreso World Bioenergy 2008. Jönköping (Suecia) Mayo, 27-29.
- [51] Zabaniotou, A. et al. (2007). Rapeseed residues utilization for energy and 2nd generation biofuels. Fuel. Vol. 87, pp. 1492-1502.



Capítulo 11.

**Usos alternativos de la biomasa:  
Cultivos para la producción de  
materias primas de la industria química.  
El caso práctico del Ricino**

---



## 11. USOS ALTERNATIVOS DE LA BIOMASA: CULTIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA. EL CASO PRÁCTICO DEL RICINO

### 11.1. Introducción y objetivos

La implantación de cultivos energéticos ha sido evaluada como una potencial alternativa para alcanzar los objetivos energéticos especificados en los planes estratégicos de la energía a nivel nacional y regional (PER 2005-2012, *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015*). Estos cultivos, anuales o de corta-media rotación (2-5 años), pueden presentar ventajas económicas al agricultor por los incentivos asociados a la implantación de estos cultivos en relación a otros tradicionales con fines alimenticios.

Como segunda opción, un mismo cultivo también puede ser aprovechado para fines distintos: la producción de biodiesel a partir del grano de colza puede ser complementada con la producción de energía a partir de la biomasa residual generada en la cosecha del cultivo (estudiado en el Capítulo 10).

Por otro lado, en una planificación estratégica integral en el uso de biomasa, se debe considerar que otras especies de biomasa, alternativas a las dedicadas para fines alimenticios o energéticos, pueden ser implantadas en el territorio para la producción de materias primas de interés industrial. Estos cultivos pueden aportar sustancias químicas casi puras con un valor añadido para la industria química y farmacéutica, y alternativas a las procedentes de recursos no renovables (Ver Tabla XI.1).

Los factores que posibilitan la implantación de los cultivos de interés industrial son: **(1)** La adaptación de las prácticas agrícolas en terrenos agrícolas que se encuentran en rotación con cultivos con fines alimenticios o energéticos, o en parcelas marginales de cultivo, **(2)** la planificación estratégica del territorio para permitir un uso compatible del terreno agrícola en la producción de biomasa con diversos fines, y **(3)** la proximidad territorial entre el productor y la industria destinataria.

La implantación de los cultivos para la producción de biomasa como fuente de materias primas para la industria química, presenta las siguientes ventajas socio-económicas: **(a)** La creación de nuevos empleos relacionados con el proceso de la materia prima obtenida en el cultivo,

**Tabla XI.1. Cultivos para la producción industrial de materias y productos químicos**

PRODUCTO	CULTIVOS	
<b>Agroquímicos</b>	Alcaravea ( <i>Carum carvi</i> ) Gombo ( <i>Abelmoschus esculentus</i> ) <i>Euphorbia lagascae</i>	Quinoa ( <i>Chenopodium Quinoa</i> ) Piretro ( <i>Pyrethrum sp.</i> ) Ajenjo duce ( <i>Artemisia annua</i> ).
<b>Mueble, compuestos, materiales construcción y aislantes</b>	Girasol ( <i>Helianthus annuus</i> ), Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ), kenaf ( <i>Hibiscus cannibinus</i> ) Miscantus ( <i>Miscanthus sp.</i> ),	Lino ( <i>Linus usitatissimum</i> ) Algodón ( <i>Gossypium sp.</i> ) Junco común ( <i>Juncus effusus</i> )
<b>Cordeles y sacos</b>	Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ), Ortiga ( <i>Urtica dioica</i> )	kenaf ( <i>Hibiscus cannibinus</i> ),
<b>Cosméticos y artículos perfumería</b>	Amaranto ( <i>Amaranthus caudatus</i> ) Calendula ( <i>Calendula arvensis</i> ) Buglosía ( <i>Anchusa officinalis</i> ) Crambe ( <i>Crambe abyssinica Hochst.</i> ) Tártago ( <i>Euphorbia lathyris</i> ) Cilantro ( <i>Coriandrum sativum</i> ) Linaza ( <i>Linum usitatissimum</i> ) <i>Columbine (Aquilegia canadensis)</i>	Alcaravea ( <i>Carum carvi</i> ) Quinoa ( <i>Chenopodium Quinoa</i> ) Carmelina ( <i>Carmelina sativa</i> ) Jojoba ( <i>Simmondsia chinensis</i> ) Onagra ( <i>Oenothera biennis</i> ) Malva ( <i>Malva sylvestris</i> ) Espuma de la pradera ( <i>Limnanthes alba</i> )
<b>Tintes</b>	Añil ( <i>Indigofera tinctoria</i> ) Granza ( <i>Reseda luteola</i> ) Cártamo ( <i>Carthamus tinctorius</i> )	Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) Solidago ( <i>Solidago virgaurea</i> ) Gualda ( <i>Rubia tinctorum</i> )
<b>Energía y combustibles</b>	Girasol ( <i>Helianthus annuus</i> ) Carmelina ( <i>Carmelina sativa</i> ) Miscantus ( <i>Miscanthus sp.</i> ), Avena sativa ( <i>Phalaris arundinacea L.</i> ) Colza etíope ( <i>Brassica carinata</i> ) Tártago ( <i>Euphorbia lathyris</i> ) Sorgo ( <i>Sorghum sp.</i> )	Tupinambo ( <i>Helianihus tuberosus</i> ) Colza ( <i>Brassica napus</i> ) Caña ( <i>Arundo donax</i> ) Espartina ( <i>Spartina alterniflora</i> ) Cardo ( <i>Cynara cardunculus</i> ) Sauce ( <i>Willow sp.</i> ) Chopo ( <i>Populus sp.</i> )
<b>Materias primas industria</b>	Girasol ( <i>Helianthus annuus</i> ), Crambe ( <i>Crambe abyssinica Hochst.</i> ) Algodón ( <i>Gossypium sp.</i> ) Chicory ( <i>Cichorium intybus</i> )	Tupinambo ( <i>Helianihus tuberosus</i> ) Colza ( <i>Brassica napus</i> ) kenaf ( <i>Hibiscus cannibinus</i> ) Ricino ( <i>Ricinus communis</i> )
<b>Lubricantes y ceras</b>	Cilantro ( <i>Coriandrum sativum</i> ) Lunaria ( <i>Lunaria annua</i> ) <i>Euphorbia lagascae</i> Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) Crambe ( <i>Crambe abyssinica Hochst.</i> )	Dimorphoteca ( <i>Dimorphotheca pluvialis</i> ) Escabiosa ( <i>knautia arvensis</i> ) Espuma de la pradera ( <i>Limnanthes alba</i> ) Tártago ( <i>Euphorbia lathyris</i> ) Linaza ( <i>Linum usitatissimum</i> ).
<b>Pinturas, cubrimientos y barnices</b>	Caléndula ( <i>Calendula officinalis</i> ) Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ) Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) Amapola ( <i>Papaver Rhoeas</i> ) Stokes aster ( <i>Stochesia Laevis</i> )	Dimorphoteca ( <i>Dimorphotheca pluvialis</i> ) Tártago ( <i>Euphorbia lathyris</i> ) Cártamo ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) <i>Euphorbia lagascae</i> Linaza ( <i>Linum usitatissimum</i> )
<b>Papel y pulpa</b>	Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ) kenaf ( <i>Hibiscus cannibinus</i> ) Miscantus ( <i>Miscanthus sp.</i> ) Cardo ( <i>Cynara cardunculus</i> ) Lino ( <i>Linus usitatissimum</i> )	Quinoa ( <i>Chenopodium Quinoa</i> ) Malva ( <i>Malva parviflora</i> ) Avena sativa ( <i>Phalaris arundinacea</i> ) Sorgo ( <i>Sorghum sp.</i> ) Ortiga ( <i>Urtica dioica</i> )
<b>Productos farmacéuticos y suplementos alimenticios</b>	Amaranto ( <i>Amaranthus caudatus</i> ), Caléndula ( <i>Calendula officinalis</i> ) Lunaria ( <i>Lunaria annua</i> ) Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) Gombo ( <i>Abelmoschus esculentus</i> ) Amapola ( <i>Papaver Rhoeas</i> ) Cilantro ( <i>Coriandrum sativum</i> ) Buglosía ( <i>Anchusa officinalis</i> ) Escabiosa ( <i>knautia arvensis</i> )	Alcaravea ( <i>Carum carvi</i> ) Borraja ( <i>Borago Officinalis</i> ) Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ) Linaza ( <i>Linum usitatissimum</i> ) Malva ( <i>Malva sylvestris</i> ) <i>Columbine (Aquilegia canadensis)</i> Espuma de la pradera ( <i>Limnanthes alba</i> ) Onagra ( <i>Oenothera biennis</i> ) Ajenjo dulce ( <i>Artemisia annua</i> )
<b>Plásticos y polímeros</b>	Amaranto ( <i>Amaranthus caudatus</i> ), Stokes aster ( <i>Stochesia Laevis</i> ) Lunaria ( <i>Lunaria annua</i> ) Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) Caléndula ( <i>Calendula officinalis</i> )	Cilantro ( <i>Coriandrum sativum</i> ) Colza ( <i>Brassica napus</i> ) Quinoa ( <i>Chenopodium Quinoa</i> ), Crambe ( <i>Crambe abyssinica Hochst.</i> ), Espuma de la pradera ( <i>Limnanthes alba</i> )
<b>Resinas y adhesivos</b>	Dimorphoteca ( <i>Dimorphotheca pluvialis</i> )	Stokes aster ( <i>Stochesia Laevis</i> )
<b>Jabones, detergentes, surfactantes, emulsionantes y solventes</b>	Cilantro ( <i>Coriandrum sativum</i> ) Carmelina ( <i>Carmelina sativa</i> ), Quinoa ( <i>Chenopodium Quinoa</i> ) Amapola ( <i>Papaver Rhoeas</i> )	Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ), Ricino ( <i>Ricinus communis</i> ) Cufea ( <i>Cuphea micropetala</i> ) Tártago ( <i>Euphorbia lathyris</i> )
<b>Textiles</b>	Cáñamo ( <i>Cannabis sativa</i> ), Ortiga ( <i>Urtica dioica</i> )	Lino ( <i>Linus usitatissimum</i> ) Algodón ( <i>Gossypium sp.</i> )

Fuente: Adaptado de [1].

(b) el desarrollo de la economía local y regional, y (c) creación de un mercado de materias primas con demanda a nivel regional y estatal.

Las principales aplicaciones de los cultivos de interés industrial son las siguientes [1]:

- Obtención de productos de bajo volumen y elevado valor derivados de especies vegetales. Estos productos se destinan a la producción de sustancias farmacéuticas y sanitarias, protección de cultivos y preservación de alimentos, aromas y fragancias.
- Producción de aceites industriales derivados de cultivos oleaginosos. Los productos son destinados a la manufactura de lubricantes, surfactantes, pigmentos, pinturas, revestimientos y polímeros.
- Extracción de almidón y azúcares a partir de cereales, patatas o remolacha. Los productos son utilizados en la industria de la fermentación y manufactura de pasta de papel, muebles, detergentes, cosméticos, productos farmacéuticos y sanitarios, y polímeros.
- Producción de fibras y derivados a partir de cultivos tradicionales y de reciente aparición (p.ej.: algodón, cáñamo, lino, Miscanthus, ortiga y kenaf). Son utilizados para la producción textil, como sustitutos de la madera en la industria de la pulpa, del papel y de paneles, y como alternativos a las fibras sintéticas.

La industria del petróleo aun ejerce presión de mercado hacia la investigación y síntesis de nuevas sustancias químicas de procedencia vegetal. Sin embargo, se prevé que los cambios tecnológicos y la innovación aplicada permitirán el acercamiento progresivo de la obtención de productos de procedencia renovable en sustitución de los no-renovables [2].

Se ha estudiado el cultivo del ricino como fuente de materias primas de interés para la industria química. Del grano de ricino se obtiene el ácido ricinoleico, un compuesto que puede ser transformado a otras formas químicas con múltiples aplicaciones industriales. El ricino, a diferencia de otras especies implantadas en Europa, es una materia prima importada en grandes cantidades desde países en vía de desarrollo como China e India. Su implantación en España contribuiría al desarrollo de la industria relacionada con las aplicaciones obtenibles a partir de este material.

A continuación se resumen las características de la planta del ricino, los requerimientos para su cultivo, las principales características físico-químicas del grano y del aceite del ricino, las principales aplicaciones industriales, y el estado del mercado internacional de este producto.

## 11.2. Características de la planta del ricino y de su cultivo

El género *Ricinus* pertenece a la familia de las euforbiáceas [3]. La morfología de la planta del ricino es muy variable en función de su variedad (Figura XI.1). La planta del ricino crece espontáneamente en muchas regiones tropicales y subtropicales del mundo [4]. Se encuentra como planta perenne salvaje en los trópicos en forma de arbusto o árbol, alcanzando una altura de 3 a 10 metros (m) y una vida media de 8 a 12 años. En zonas templadas domina su variedad arbustiva, una planta mucho más pequeña y anual, con una altura variable de entre 3 a 1,8 m [5]. Su crecimiento es más acelerado en las variedades perennes coincidiendo con su hábitat óptimo.

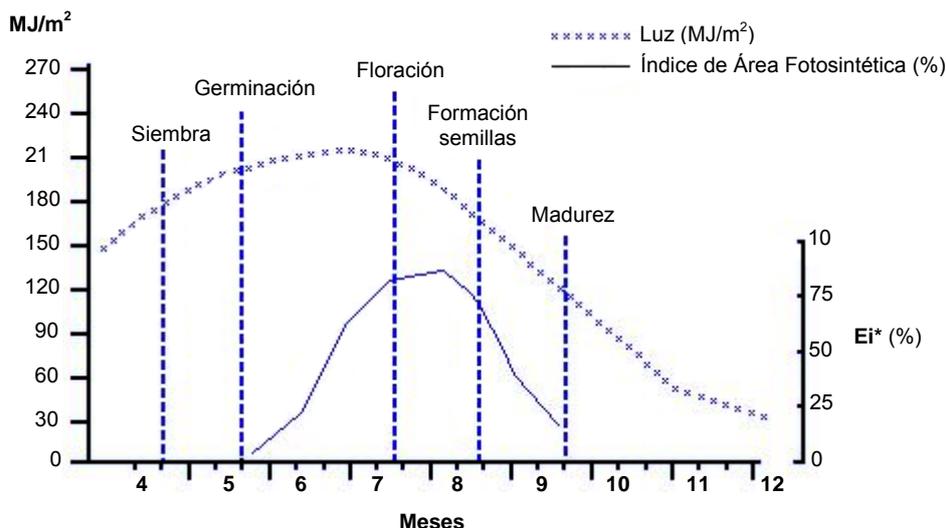
La planta del ricino es monoica, con flores masculinas y femeninas agrupadas en densas inflorescencias. El fruto del ricino es una cápsula espinosa, con paredes gruesas que con la maduración se endurecen. Cada cápsula contiene tres coques, cada uno con una semilla de forma ovalada de dimensión aproximada de 1 centímetro [5].

Para el cultivo, el ricino se ha distribuido completamente no sólo en todas las regiones tropicales y subtropicales, si no también en muchos países templados [6]. A nivel mundial, las mejores condiciones climáticas para el ricino se hallan en India, Brasil, Ecuador y en los países del sur de Asia [5]. En general, las condiciones óptimas para el cultivo del ricino son las siguientes:



**Figura XI.1. Planta de ricino**

(1) Tallo con inflorescencias maduras en la zona apical de la planta; (2) Detalle de los frutos en forma de cápsulas del ricino; (3) Detalle de la cápsula del ricino, con producción de tres granos por cápsula.



**Figura XI.2. Ciclo de cultivo del ricino**

\*Ei = Eficiencia de intercepción de la radiación fotosintéticamente activa. // Fuente: Adaptado de [5].

- Inexistencia de heladas, sobretodo en las primeras fases de crecimiento
- Suelos bien drenados
- Luminosidad. El ricino es una especie de día largo [5].

En Europa, la germinación óptima del ricino se da a una temperatura del suelo de 15°C (entre 12 y 18°C). Según experiencias francesas realizadas mediante el proyecto EuroRicin [7], en el suroeste de Francia (Región de Poitou-Charente), la germinación se debe dar entre el 20 de abril y el 15 de mayo. Si el ricino germina antes de este periodo, el riesgo de heladas puede fallir el cultivo. En el caso opuesto, si la germinación se da lugar a posteriori, puede haber riesgo de falta de maduración de la planta [5] (Figura XI.2). Según estas experiencias, se recomienda una población en cultivo de 50 a 60.000 plantas por hectárea con distancias entre filas de 0,6 metros, y 0,3 m entre plantas [5].

La irrigación del cultivo influye notablemente en la producción. Con una irrigación de 200-250 litros/m<sup>2</sup>, los rendimientos obtenidos varían entre 1400 y 1600 kg grano/ha. Un aumento de la irrigación comporta mayores rendimientos, aumentando hasta 2500 y 2800 kg grano/ha con condiciones de riego de 450 litros/m<sup>2</sup> [5,8].

### 11.3. Proceso y propiedades del aceite de ricino

Del proceso del grano de ricino se obtiene el aceite de ricino (Figura XI.3). Los subproductos obtenidos de mayor interés son: la glicerina y los rematantes fibrosos útiles para la elaboración de fertilizantes orgánicos [4]. Según la variedad de ricino seleccionada, el contenido de aceite en la semilla varía entre 50,5 - 53,7% en peso [5].

La característica principal que diferencia los ácidos grasos del aceite de ricino del resto de aceites vegetales es su elevada concentración de ácido ricinoleico (hasta un 90%) (Tabla XI.2). Su contenido casi exclusivo en esta sustancia química, hace que el cultivo del ricino sea particularmente interesante como fuente de materia prima para la industria química. El aceite de ricino tiene un peso

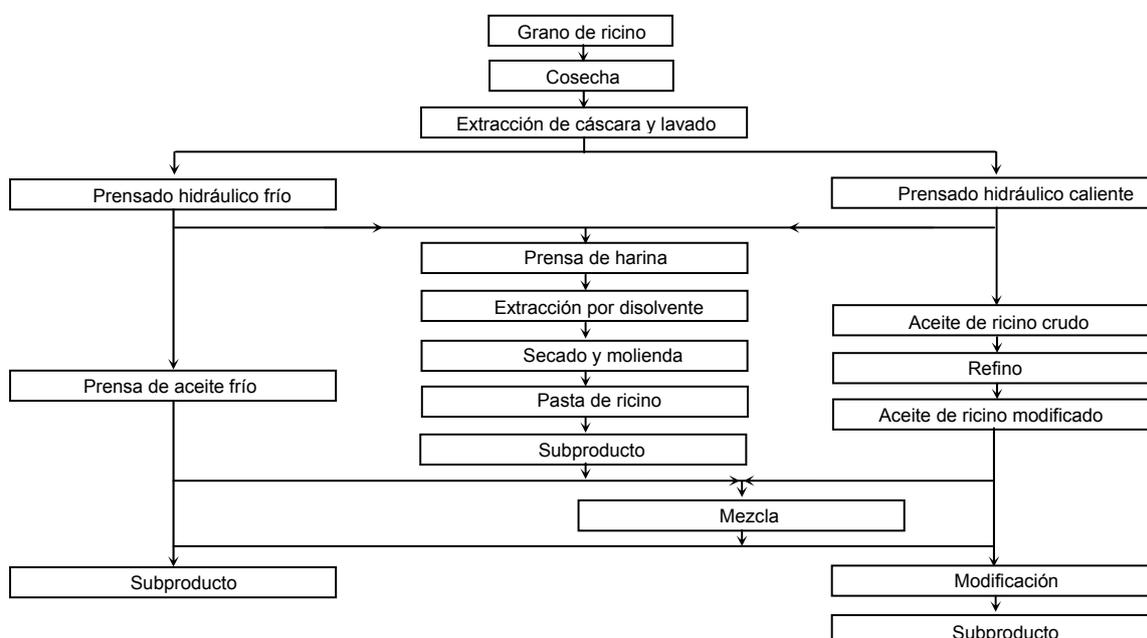


Figura XI.3. Esquema de proceso del grano de ricino

Fuente: Adaptado de [5].

Tabla XI.2. Ácidos grasos en el aceite de ricino

Composición Ácidos grasos	Porcentaje %)
Ricinoleico	89,5
Linoleico	4,2
Oleico	3,0
Palmítico	1,0
Estearico	1,0
Dihidroxi esteárico	0,7
Eicosanoico	0,3
Linoleico	0,3
TOTAL	100,0

Fuente: Adaptado de [9].

molecular elevado (298 gramos/mol), un punto de fusión bajo (5°C) y un punto de solidificación muy bajo (-12 °C a -18°C) [5]. A diferencia de otros aceites vegetales, el aceite de ricino se disuelve en alcohol puro pero su miscibilidad resulta limitada en solventes alifáticos derivados del petróleo [5]. Otras propiedades interesantes para la industria son su alta y estable viscosidad y buena calidad lubricante, superior al de otros aceites vegetales [9].

El grano de ricino contiene dos sustancias tóxicas: una proteína, la ricina ( $C_9H_7N_2O_2$ , en forma de anillo benzénico), más peligrosa que el ácido cianhídrico, y el alcaloide “ricinina” ( $C_8H_8N_2O_2$ ) tóxico en menor grado [5].

## 11.4. Aplicaciones industriales

El aceite de ricino tiene una gran variedad de aplicaciones para la industria. Entre sus múltiples usos destacan la producción de plásticos y la fabricación de cosméticos y productos terapéuticos. El conjunto de reacciones y aplicaciones se resumen en la Figura XI.4 y XI.5.

El aceite de ricino es la materia principal para la producción del ácido sebácico, el ingrediente básico para la producción del nylon, otras resinas sintéticas y fibras. Se necesitan aproximadamente tres toneladas de aceite de ricino para producir una tonelada de nylon [10].

A partir del año 1940, la compañía francesa ATOCHEM desarrolló la síntesis del ácido amino-undecanoico a partir del aceite de ricino, dando lugar a diversos polímeros como el Rilsan-B o el nylon-11 [5]. A partir del aceite es posible sintetizar polioles y otros pre-polímeros (isocianato) con diferentes características. La mezcla de estos pre-polímeros puede dar lugar a la formación de poliuretano para muchas aplicaciones, con propiedades superiores al formado a partir de polímeros derivados del petróleo [10].

Actualmente se está trabajando en el estudio del aceite de ricino para la producción de biodiesel [3,12-14]. Éste se puede obtener a través de la transesterificación con metanol y de la presencia de un catalizador. Estudios comparativos entre el diesel de petróleo y el biodiesel de ricino muestran como la mezcla entre estos dos en diversas proporciones (10:100, 20:100; biodiesel ricino:diesel petróleo) mantienen propiedades comparables a las del diesel de petróleo y aceptables a las especificadas en la Norma estándar para biodiesel ASTM D6751, exceptuando la viscosidad y la humedad para el biodiesel de ricino sin mezcla.

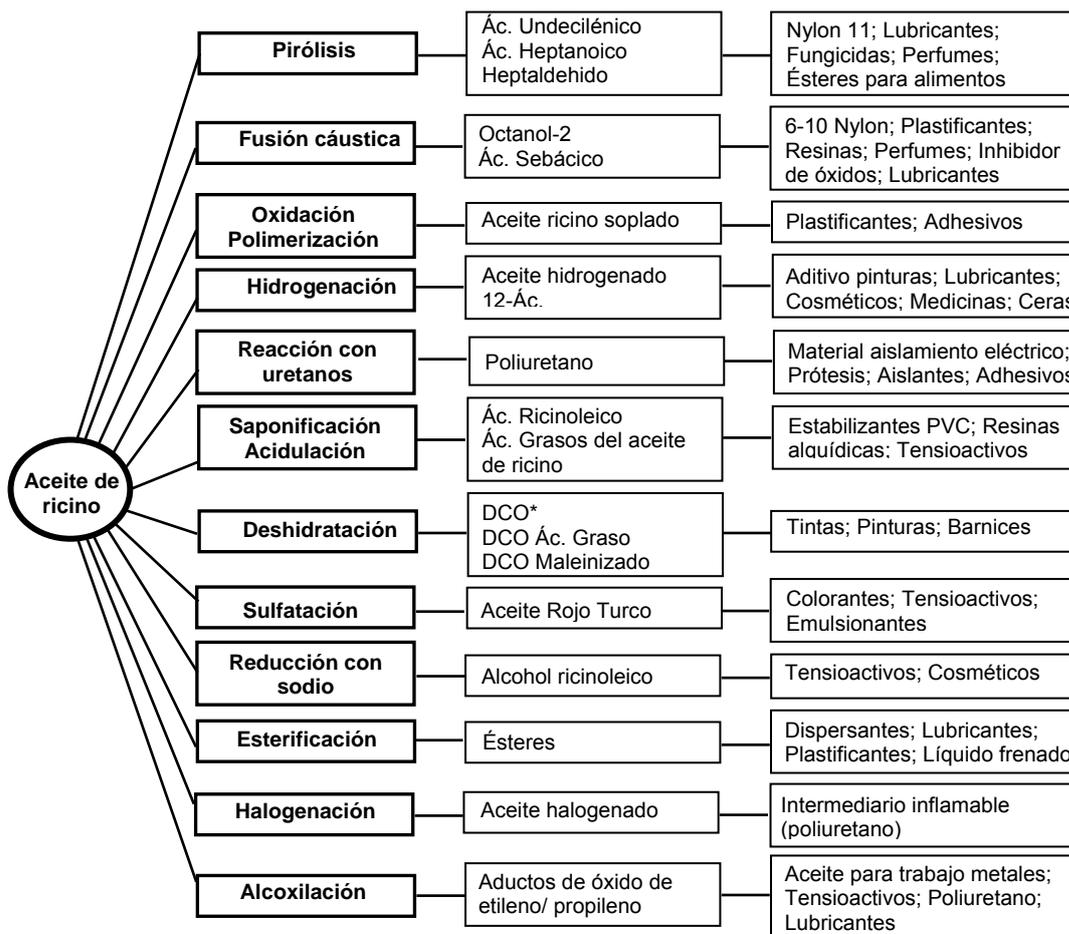


Figura XI.4. Aplicaciones industriales del aceite de ricino.

\*DCO = Dehydrated Castor Oil.// Fuente: Adaptado de [9, 11].

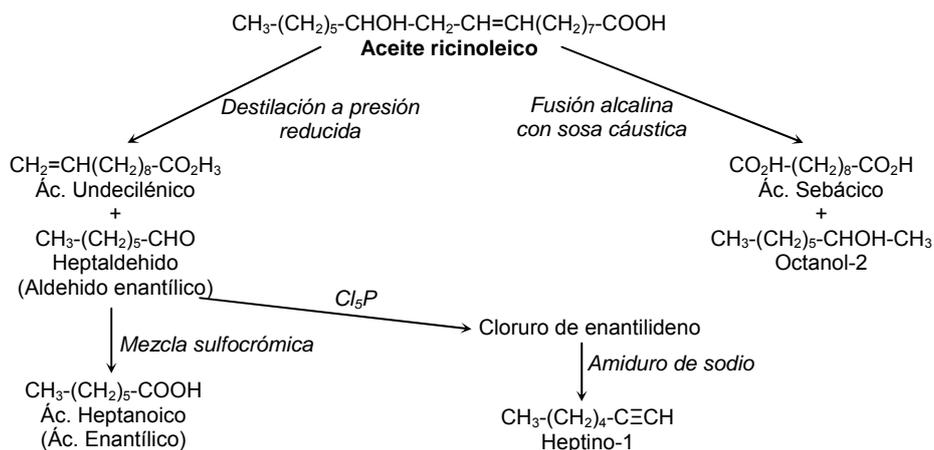


Figura XI.5. Reacciones de pirólisis y fusión cáustica del ácido ricinoleico

## 11.5. Mercado del ricino

India, China y Brasil dominan el mercado del ricino por su gran producción. Estos tres países representan el 93% de la producción mundial de ricino, elevándose para el año 2006 en 1.140.000 toneladas (Figura XI.6). En menor cantidad también se cultiva ricino en la antigua Unión Soviética, Costa Rica, Ecuador, Pakistán, Tailandia, Filipinas, Paraguay, Rumania, Etiopía, Sudan, Tanzania y Méjico [15,16].

La “Asociación Internacional para el Aceite de Ricino” reúne a los miembros que conforman la mayor parte de la producción mundial y desarrollo del ricino [15].

La producción media de ricino por hectárea cultivada varía entre países debido a las prácticas de cultivo establecidas: 1040 kg/ha en India, 960 kg/ha en China, 735 kg/ha en Brasil, 1130 kg/ha en Paraguay, 1035 kg/ha en Etiopía y 770 kg/ha en Tailandia (según datos medios en los años 2004-2006) [16]. En algunas zonas de agricultura intensiva en Estados Unidos, Sur-África y Europa, se han conseguido rendimientos entre 2000 y 3000 kg/ha mediante cultivos experimentales [5].

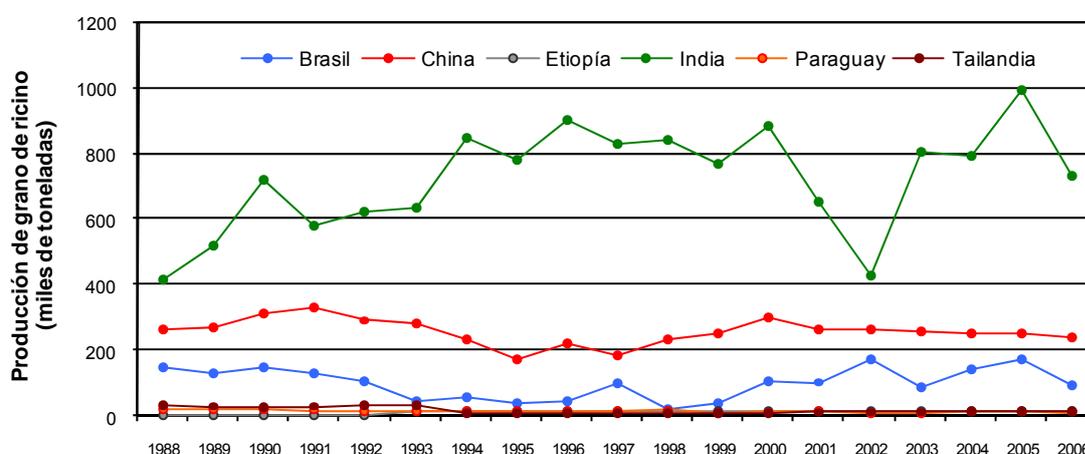


Figura XI.6. Producción mundial de ricino

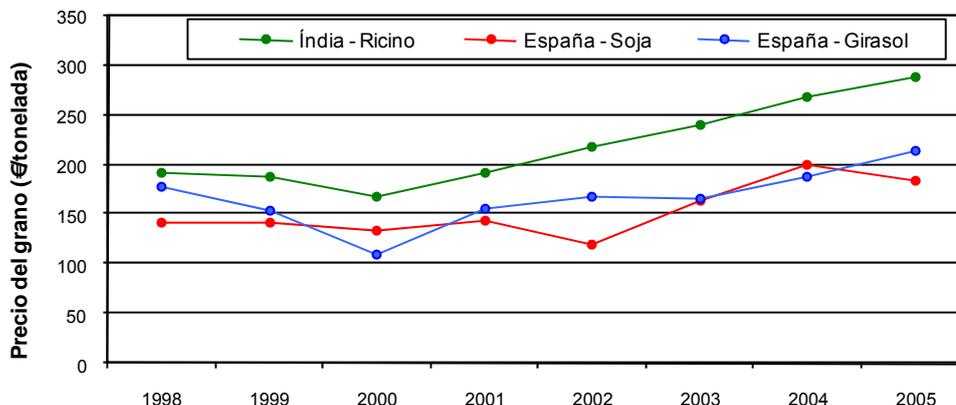
Fuente: Adaptado de [16].

Tabla XI.3 Situación del mercado internacional del aceite de ricino

Principales Países Importadores (en toneladas de aceite de ricino)					
	2000	2001	2002	2003	2004
Francia	76701	82095	54327	41764	48707
China	29196	7163	6247	11978	41071
Alemania	33786	30014	34661	35395	38476
EUA	40739	45395	32339	26702	40669
Holanda	12503	21203	21007	18535	29000
Japón	19765	20086	19283	22805	21051
Principales Países Exportadores (en toneladas de aceite de ricino)					

India	238949	199789	143643	136509	239218
holanda	7656	8803	12524	17005	21492
Alemania	6182	6365	6827	6987	5512
Francia	2351	3190	3297	3401	4992
EUA	3320	2819	2836	3128	3065
Brasil	16743	10244	5815	1980	824

Fuente: Adaptado de [16].



**Figura XI.7. Comparativa de precios del ricino con otras especies de interés industrial.**

Fuente: Adaptado de [16].

La disminución en la producción de India entre los años 2001-2003, generó consecuentemente un aumento de los precios del aceite de ricino para los principales países importadores de esta materia [16-18]. La crisis se atribuyó a la alarma internacional generada hacia el manejo descontrolado de ricino y de su toxina natural (“ricina”) a partir de los hechos acontecidos el 11-S en Nueva York.

El mercado internacional del aceite de ricino ha variado en los últimos años en función de la demanda y producción de ricino intra e internacional. India es y ha sido durante muchos años un país exportador dominante en el mercado mundial de esta materia, y ha establecido los precios de mercado del aceite de ricino al resto de países importadores.

Países Europeos como Francia, Alemania y Holanda destacan por su volumen de importación de aceite de ricino como materia prima en aplicaciones industriales. Cabe destacar también la demanda de aceite de ricino de China, país productor e importante importador mundial de esta materia (Tabla XI.3).

En España no está implantado el cultivo del ricino aunque algunas zonas podrían ser propicias a su desarrollo, y es netamente importador de este producto tanto en forma de aceite y como en grano (6163 Ton Métricas de aceite y 10 TM de grano, en 2004) [16].

Los precios del aceite de ricino han ido aumentando de forma imparable a partir del año 2001. Como se puede observar en la Figura XI.7, la cotización del grano de ricino (280 €/Mg) es muy superior al de la soja o girasol (180 - 220 €/Mg, respectivamente). Este factor revierte en que nuevas aplicaciones industriales a partir de ricino como la producción de biodiesel pierdan su interés ante el aumento de otros cultivos energéticos (ej.: palma, colza).

## 11.6. Conclusiones

Las principales conclusiones que se extraen del Capítulo 11 son las siguientes:

- Los cultivos industriales producen materias primas que, por su composición físico-química y pureza, contienen un valor añadido de interés para la industria química y farmacéutica. Sin embargo, pocos existen hoy en día por el bajo coste de las sustancias obtenidas a partir del petróleo.
- El ricino es una de las pocas especies vegetales cultivadas básicamente fuera de Europa, apreciado por las propiedades de su aceite en la industria química. La composición del aceite en ácido ricinoleico es una base para la síntesis de otros productos químicos con múltiples aplicaciones industriales.
- La elevada cotización y demanda del ricino en el mercado internacional respecto al de otros productos vegetales (soja y girasol) y las elevadas producciones agrícolas conseguidas en Europa en parcelas experimentales (Proyecto EURORICIN) realzan el potencial interés futuro de este cultivo para ser implantado en países mediterráneos.
- Una vez solventadas las limitaciones físicas para el cultivo como la existencia de heladas y la falta de maquinaria agrícola especializada para su recolección, España puede implantar el cultivo del ricino para la comercialización de su producto en el sur de Europa.
- La implantación de los cultivos industriales en Cataluña a medida que se encarezca el petróleo, permitiría la creación de nuevos empleos relacionados con el proceso de las materias primas, el desarrollo de la economía local y regional, y la creación de un mercado de materias primas con demanda a nivel regional y estatal.
- Para ello, se requerirá la planificación estratégica del territorio y la adaptación de las prácticas agrícolas, que permiten la compatibilidad de los usos del suelo agrícola para la producción de biomasa con fines alimenticios, energéticos e industriales.

## 11.7. Referencias

- [1] European Commission (1997). Crops for industry and energy in Europe. ISBN: 92-827-9415-6. Bruselas.
- [2] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2004). Biomass and Agriculture: Sustainability, Markets and Policies. OECD Publication Service. Paris.
- [3] Barajas, C.L. (2005). Biodiesel from castor oil: a promising fuel for cold weather. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'05) 16-18 Marzo, Zaragoza (España).
- [4] Márquez, J. (2005). Aceite de Ricino, alternativa bioenergética. Diario el Universal (Uruguay), 28 de Diciembre 2005. [En línea] Disponible en: <http://www.biodiesel-uruguay.com> (Consulta: Enero 2007).
- [5] Bonjean, A. (1991). Le ricin; Une culture pour la chimie fine. Ed.: Galileo/onidol. 101 pp.
- [6] Grieve, M. (1990). A modern herbal. Castor oil plant. [En línea] Disponible en: <http://www.botanical.com> (Consulta: Diciembre 2008).
- [7] BioMatNet (2008). GEIE EURORICIN: Covering European Needs of Castor Oil, using community grain. AIR1-CT92-0069. Años 1992-1995.
- [8] Labalette, F. et al (1996). Development of Castor Bean Production in France. Ed.: J. Janick.. Alexandria. pp. 340
- [9] Wassner D. (2007); El ricino como alternativa para diversificar la producción en áreas marginales. En Vilella, F., Rosatto, H., y Senesi, S. (Eds) Bioenergía 2006: Avances y Perspectivas. ISBN: 978-950-29-0996-7. pp. 57-69.
- [10] The Castor Bean. A plant named after a tick (1999). En Wayne's Word, An on-line textbook of Natural History. [En línea] Disponible en: <http://waynesword.palomar.edu> (Consulta: Junio 2007).
- [11] Interactive European Network for Industrial Crops and their Applications (IENICA) (2000). Oil Crops. Summary Report for European Union. [En línea] Disponible en: <http://www.ienica.net/ienicareports.htm> (Consulta: Junio 2007).
- [12] Conceição et al. (2007). Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. Renewable and Sustainable energy Reviews. Vol.11, pp. 964-975.
- [13] Barnwal, B.K. y Sharma, M.P. (2005). Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 9 (4), pp. 363-378.
- [14] Wassner D.; Primera red de ensayos de ricino. Antecedentes, participantes y objetivos INTA. [En línea] Disponible en: <http://www.biodiesel.com.ar/> (Consulta: Enero 2008)
- [15] Interactive European Network for Industrial Crops and their Applications (IENICA) (2002). Castor. [En línea] Disponible en: <http://www.ienica.net/crops/castor.htm> (Consulta: Enero 2008).
- [16] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). Statistical Database Results. [En línea] Disponible en: <http://faostat.fao.org/> (Consulta: Enero 2008).
- [17] Longar, J. (2004). Procesamiento Semillas. [En línea] Disponible en: <http://www.monografias.com/> (Consulta: Junio 2007).
- [18] de Guzman, Doris. (2003). Castor oil price seed upward movement on tight Indian supplies. (Oils, Fats & Waxes). Chemical Market Reporter. Febrero 2003.



Capítulo 12.

## **Conclusiones Generales**





## 12. CONCLUSIONES GENERALES

La presente tesis ha evaluado los diferentes aspectos que condicionan la viabilidad de la producción de energía a partir de biomasa de diversos orígenes en Cataluña. Las conclusiones generales que se extraen del trabajo realizado son las siguientes:

- Dentro de un sistema integral de aprovechamiento de la biomasa, Cataluña, por sus elevados recursos forestales, debe considerar la biomasa forestal como parte importante de los recursos que contribuyen a los fines energéticos. Deben buscarse formas de extender su área de aprovechamiento limitada al 28%.
- La falta de un sistema logístico y de un mercado de la biomasa, y la escasa rentabilidad económica de la extracción de biomasa forestal son factores que contribuyen a la acumulación de biomasa en los bosques y al aumento del riesgo de incendios.
- El aprovechamiento energético de la biomasa forestal debe responder a una estrategia global energética, ambiental y social, encontrando sinergias comunes con la industria de la madera para el aprovechamiento de los productos de menor valor en el mercado.
- Cataluña dispone de 1,3 millones de Mg de residuos de biomasa (equivalente a 444 ktps) de relativamente fácil valorización energética. Su capacidad es muy superior al aprovechamiento energético actual de la biomasa (92,6 ktps de biomasa forestal y agrícola, y 117,6 ktps de residuos renovables, según datos del 2006)
- La actual política de disposición de residuos municipales e industriales al vertedero no permite la valorización energética de los residuos de biomasa que se cuantifican en mayor número (agroindustriales y CDR). Su modificación hacia el aprovechamiento energético integral contribuiría alcanzar los objetivos energéticos especificados para la biomasa en el Pla de l'Energia de Cataluña 2006-2015.
- La aprobación del Real Decreto 661/2007 durante la realización del proyecto Agrosost (2004-2007) permitió un cambio en la dimensión de los sistemas de generación eléctrica con biomasa, incluyendo a los cultivos energéticos. Las nuevas tarifas eléctricas permiten un incremento significativo de los beneficios obtenidos en las plantas eléctricas con biomasa de mediana y

elevada potencia, así como la viabilidad de nuevas plantas de menor potencia, que eran no rentables antes de la aprobación de la mencionada ley.

- La producción eléctrica utilizando chopo como combustible, siempre que haya disponibilidad de agua, constituye una de las alternativas para cumplir el objetivo propuesto con cultivos energéticos a nivel estatal en el PER 2005-2010, y también a nivel de Cataluña.
- La co-combustión de carbón con biomasa con elevados contenidos en azufre en centrales térmicas de carbón convencionales es una opción que presenta ventajas económicas y ambientales: **(a)** la amortización de la mayoría de plantas térmicas, **(b)** Fácil adaptación tecnológica, **(c)** Existencia de incentivos económicos (Real Decreto 661/2007), y **(d)** Posibilidad de venta de créditos de emisión de CO<sub>2</sub>.
- La colza contiene azufre. Su combustión supera los límites admisibles en grandes plantas. La mezcla del 25% de colza e. con el 75% de chopo o la limitación de la potencia eléctrica instalada en 49 MW, son opciones dentro de la reglamentación económicas, pero siguen teniendo un impacto ambiental.
- Sin embargo, el análisis Coste-Beneficio muestra como el coste del tratamiento del SO<sub>2</sub> es muy superior a los beneficios que se derivan de las externalidades evitadas por su tratamiento, lo cual justifica que el dinero, considerado como un recurso escaso, pueda ser utilizado en muchas otras aplicaciones ambientales con mayor beneficio.
- Hasta el presente, sólo se aprovecha el grano de la colza en la producción de biodiesel. Ésta puede ser complementada con la producción de energía a partir de la biomasa residual generada en la cosecha del cultivo.
- Las cenizas obtenidas en la combustión de la colza contienen una elevada concentración de Ca (20%), Na (5%), K (13%) y P (1,5%). El uso de estas cenizas como fertilizantes en el terreno de cultivo permite el retorno de parte de los elementos que han sido absorbidos durante el crecimiento de la biomasa de colza y la formación del grano.
- Las condiciones meteorológicas de la zona de cultivo situada en la provincia de Girona ha permitido el secado natural de la biomasa de colza en un período mínimo de 5 días. Los valores sobre reducción del contenido de humedad en este periodo son del 31-78%, dependiendo del diámetro expuesto al secado.

- Hasta la década de 1960 la biomasa era utilizada como fuente de materias primas. En el futuro, algunas especies de biomasa podrían ser implantadas para la producción de materias primas de interés industrial, pero el bajo coste del petróleo hace difícil su uso en el presente.
- Se ha estudiado el caso del ricino como especie interesante para su cultivo dado su elevado contenido en ácido ricinoleico en su grano, una sustancia de valor añadido que puede ser la base de síntesis de otras materias primas interesantes para la industria química.

