

Análisis de la viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa residual agrícola para suministro de una central de cogeneración en la comarca del Segrià

Autor: Victor Cañadas Molina

Tutor: Miguel Villarrubia López

Curso académico: 2013-2014

Máster en Energías Renovables y
Sostenibilidad Energética

Índice de figuras

Figura 1. <i>Peso de cada sector en total del PIB 2012.</i>	1
Figura 2. <i>Crecimiento del VAB pb por sectores año 2012</i>	1
Figura 3. <i>Esquema del proceso de gasificación de la biomasa</i>	2
Figura 4. <i>Etapas del proceso de cogeneración mediante la planta de cogeneración por gasificación de biomasa residual agrícola</i>	4
Figura 5. <i>Esquema metodológico establecido para el cálculo de biomasa residual disponible en los municipios de la comarca del Segrià</i>	7
Figura 6. <i>Diagrama temporal de la disponibilidad de biomasa residual agrícola de diferentes cultivos leñosos en la comarca del Segrià</i>	8
Figura 7. <i>Gráfico del abastecimiento anual de biomasa de la planta de gasificación</i>	10
Figura 8. <i>Distribución de la red eléctrica en la comarca del Segrià</i>	11
Figura 9. <i>Distribución de la red viaria de transporte en la comarca del Segrià</i>	12
Figura 10. <i>Mapa de la distribución de los CLB y la planta de cogeneración en la comarca del Segrià</i>	13
Figura 11. <i>Diagrama de Sankey del proceso de gasificación de residuos agrícolas para la obtención de energía eléctrica y térmica</i>	16
Figura 12. <i>Análisis de la viabilidad económica del escenario 1 sin venta de energía térmica mediante el método del Índice de Rentabilidad Financiera</i>	22
Figura 13. <i>Análisis de la viabilidad económica del escenario 1 con venta de energía térmica mediante el método del Valor Actual Neto</i>	22
Figura 14. <i>Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.1 con venta de energía térmica mediante el método de la Tasa Interna de Rentabilidad</i>	23
Figura 15. <i>Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.1 sin venta de energía térmica mediante el método del Valor Actual Neto</i>	23
Figura 16. <i>Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.2 con venta de energía térmica mediante el método del Índice de Rentabilidad Financiera</i>	24
Figura 17. <i>Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.2 sin venta de energía térmica mediante el método de la Tasa Interna de Rentabilidad</i>	24
Figura 18. <i>Evolución del coste de generación de energía eléctrica para el escenario 2.2 sin venta de energía térmica</i>	25
Figura 19. <i>Evolución de los costes de generación en nuevas energías renovables</i>	26
Figura 20. <i>Evolución de los costes de generación eléctrica con biomasa</i>	26

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Características del gasificador y grupo de cogeneración ProCone</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2. Coeficientes de producción de residuos de poda y arrancada en cultivos leñosos</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 3. Criterios de estacionalidad de generación de biomasa residual agrícola en cultivos leñosos</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 4. Coeficientes de estacionalidad de la generación de residuos agrícolas en cultivos leñosos</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 5. Tabla resumen del abastecimiento anual de biomasa de la planta de gasificación.</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 6. Conexión viaria de los centros logísticos de biomasa localizados en la comarca del Segrià.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 7. Valores del PCS₀ obtenido para diferentes muestras de biomasa residual agrícola ...</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 8. Valor del PCI de la biomasa residual en función del grado de humedad en base húmeda</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 9. Retribución de a la cogeneración con biomasa del RD 661/2007.</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 10. Interpretación del VAN, significado y proceso para la toma de decisiones en una inversión.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 11. Interpretación de la TIR, significado y proceso de decisión para una inversión</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 12. Resultados obtenidos para los costes logísticos de suministro de biomasa</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 13. Costes recopilados en la bibliografía para el astillado de la biomasa residual agrícola en España</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 14. Costes recopilados en la bibliografía para la extracción y recolección de biomasa residual agrícola en España</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 15. Precios recopilados en la bibliografía para la biomasa residual precedente del sector forestal en España</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 16. Coste máximo de obtención de biomasa para que los escenarios planteados en el estudio sean viables económicamente</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 17. Resumen de los resultados obtenidos para los escenarios considerados en el proyecto</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 18. Costes de generación eléctrica para diferentes costes de biomasa en el escenario 2.2 con venta de energía térmica</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 19. Análisis DAFO para el proyecto de cogeneración</i>	<i>27</i>

Índice del documento

1. Introducción	1
1.1. Contextualización del proyecto	1
1.2. El proceso de gasificación de la biomasa	2
1.3. Descripción de las características de la planta de cogeneración y del proceso de producción de energía.....	3
2. Caracterización de la biomasa residual agrícola disponible en la comarca del Segrià ...	5
2.1. Cálculo del potencial de biomasa residual agrícola anual generado en la comarca del Segrià	5
2.2. Cálculo de la biomasa residual agrícola disponible en la comarca del Segrià para abastecer a la planta de gasificación	5
3. Cálculo del consumo de biomasa agrícola residual demandado por la planta de gasificación	9
4. Ubicación estratégica de la planta de gasificación y los CLB	10
4.1. Criterios de superficie	10
4.2. Criterios económicos	11
4.3. Criterios logísticos	11
5. Balance energético de la gasificación de los restos agrícolas en el proceso de cogeneración	14
5.1. Cálculo del poder calorífico de la biomasa	14
5.2. Cálculo del rendimiento energético global del proceso de cogeneración	14
5.3. Cálculo de la producción eléctrica y térmica del proceso	15
6. Análisis de la viabilidad económica de la planta	16
6.1. Metodología para analizar la viabilidad económica de la planta de gasificación	17
6.1.1. Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)	17
6.1.2. Cálculo de la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).....	18
6.1.3. Cálculo del Índice de Rentabilidad Financiera (IR_f)	19
6.2. Descripción de los costes de inversión, operación y mantenimiento	19
6.3. Resultados del análisis económico de la planta de gasificación	20
6.3.1. Resultados obtenidos para los costes logísticos de la materia prima	20
6.3.2. Resultados globales de rentabilidad del proyecto	21
7. Análisis DAFO	27
8. Conclusiones	27

Resumen

El presente estudio pretende realizar un análisis de viabilidad técnica y económica para la implantación de una planta de cogeneración a partir de la gasificación de biomasa residual agrícola en la comarca del Segrià. Esta tecnología permite revalorizar energéticamente los residuos agrícolas proporcionando un gas de síntesis apto para generar energía eléctrica y térmica. Además la actividad de la planta de cogeneración contribuye a mejorar la sostenibilidad del territorio a la vez que se genera empleo y actividad económica.

Para determinar la viabilidad técnica del proyecto se realiza un análisis de la disponibilidad de biomasa en la comarca y se evalúa la capacidad del territorio para abastecer el consumo nominal de la planta de cogeneración.

Para determinar la viabilidad económica del proyecto se han analizado diversos indicadores que permiten aceptar o rechazar el proyecto considerando los costes y beneficios generados por éste durante toda su vida útil. Para realizar el análisis económico se ha elaborado un plan logístico que permita conocer con exactitud los costes asociados al tratamiento de la biomasa residual agrícola. Otros costes asociados a las operaciones de la planta de cogeneración se han determinado mediante datos técnicos facilitados por el fabricante. Con la finalidad de conocer los ingresos de la actividad mediante la venta de su producción energética se ha desarrollado el balance energético del proceso. Posteriormente, mediante la aplicación del RD 413/2014, que regula la remuneración a las energías renovables, se ha estudiado la viabilidad de distintos futuros escenarios para la central energética.

Los resultados del estudio muestran que la comarca del Segrià dispone de biomasa suficiente para desarrollar esta actividad en su territorio. Los resultados de viabilidad económica ponen de manifiesto el freno a las renovables que ha impuesto el nuevo RD 413/2014 mediante recortes a las retribuciones. No obstante, el presente estudio determina que mediante la producción intensiva de la planta se consigue generar electricidad a unos costes totalmente competitivos con el resto de las energías renovables.

Justificación

El modelo energético actual es un modelo altamente dependiente de los insumos procedentes de energías convencionales de origen fósil. Esta dependencia energética limita el desarrollo del mercado de la energía e impone límites al crecimiento económico de las regiones importadoras de recursos energéticos. Además, un sistema energético basado en el uso de energías fósiles representa un grave peligro para la humanidad puesto que se agravan los efectos relacionados con el calentamiento global debido a las emisiones de gases con efecto invernadero (GEI). Otros modelos de generación eléctrica también presentan grandes desventajas para la sociedad puesto que consumen recursos potencialmente agotables y generan graves impactos ambientales.

El aprovechamiento de la biomasa para usos energéticos representa una vía alternativa al modelo eléctrico actual y presenta ciertas ventajas sobre éste. Destacan:

- Balance neutro de emisiones GEI en la atmósfera.
- Dinamización de la actividad de los territorios locales mediante el aprovechamiento de sus propios recursos.
- Generación de empleos comprometidos con la sociedad y el medio ambiente.

- Reducción de la dependencia energética del territorio.
- Valorización económica de residuos agrícolas y excedentes forestales.

Todo ello ha posicionado al sector de la biomasa como un sector dinámico y fuerte con grandes expectativas de desarrollo a nivel local. Las administraciones locales y regionales muestran un gran interés por el desarrollo de este tipo de actividades. Por ello, el presente estudio pretende analizar la viabilidad de una planta generadora de biomasa dentro del contexto regional de la comarca del Segrià.

Objetivos del proyecto

El objetivo general de este estudio es analizar la viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa para el suministro energético de una central de cogeneración en la comarca del Segrià.

Para abordar el objetivo general de este proyecto se han determinado objetivos específicos que permitan sintetizar y esquematizar la información generada. Los objetivos específicos para este proyecto se describen a continuación:

- Evaluar la disponibilidad de biomasa en la comarca del Segrià.
- Dimensionar la planta de gasificación de biomasa en función de la disponibilidad del recurso y su distribución.
- Describir los procesos y equipos de gasificación y cogeneración que definen la planta.
- Estimar la producción energética de la central de cogeneración mediante la elaboración de un balance energético del sistema.
- Estimar la viabilidad económica del proyecto de inversión.
- Estudiar las posibilidades de mercado existentes para la planta de gasificación mediante un análisis DAFO.
- Desarrollar herramientas útiles para la implementación de otros proyectos similares.

1. Introducción

1.1. Contextualización del proyecto

La comarca del Segrià tiene una población de 210.141 habitantes según datos del *Institut d'estadística de Catalunya* del año 2013.

El análisis sectorial del PIB (véase figura 1) indica una situación similar a la contribución por sectores de Cataluña. El sector con mayor contribución es el sector servicios, con 75,6% del PIB, seguido de la construcción (7,88%), industria (8,46%) y sector primario (6,13%).

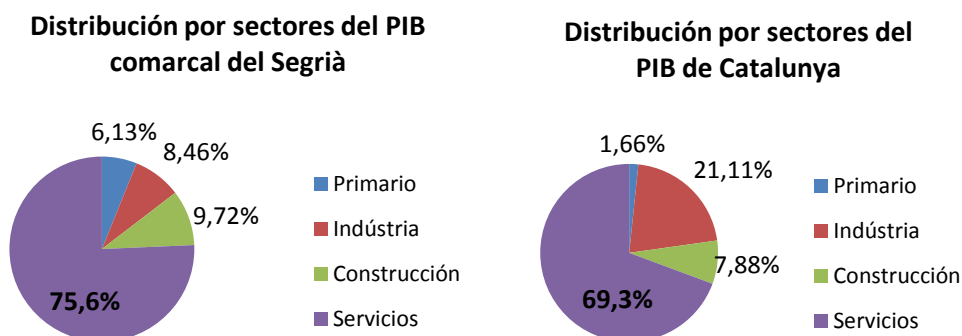


Figura 1: Peso de cada sector en total del PIB 2012.

Fuente: Anuari econòmic comarcal 2013.

En la figura 2 se presenta la evolución del Valor Agregado Neto (VAB) por sectores. Como podemos observar, dentro del contexto de la crisis económica general el sector más perjudicado ha sido el sector primario, es decir, la agricultura.

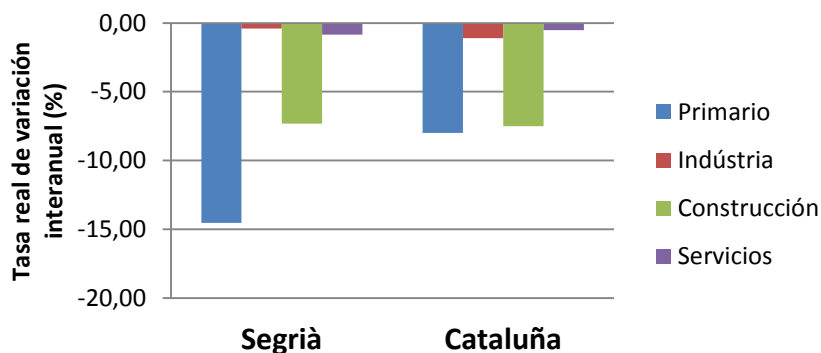


Figura 2. Crecimiento del VAB pb por sectores año 2012.

Fuente: Anuari econòmic comarcal 2013.

Este decrecimiento del sector agrícola ha generado la pérdida de empleo en la comarca y el abandono de las actividades tradicionales relacionadas con la agricultura y la producción de fruta en la comarca. La diversificación de los sectores económicos de un territorio permite establecer una situación de económica estable. Por ello, y debido al abandono de las actividades tradicionales, la implantación de una planta de cogeneración mediante gasificación de podas agrícolas puede representar un reto para dinamizar el territorio estudiado.

1.2. El proceso de gasificación de la biomasa

La gasificación de un sólido es un proceso termoquímico que engloba la descomposición térmica de la materia orgánica y la acción de un gas que reacciona principalmente con el residuo carbonoso procedente de esa descomposición térmica. Implica una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂) y metano (CH₄) en proporciones diversas según la composición de la materia prima y de las condiciones del proceso.

En el proceso de gasificación tienen lugar una gran variedad de reacciones cuyo orden e importancia relativa dependen de las condiciones de operación y del agente gasificante utilizado, pero que pueden agruparse en tres bloques o etapas. Se distingue:

- Pirólisis o descomposición térmica (destilación), en la que mediante calor, el sólido original se descompone en una mezcla sólido, líquido y gas. Al sólido originado en esta etapa se le suele denominar char y, a los líquidos y vapores condensables se les denomina alquitranes. Puede incluirse aquí el proceso de secado que tiene lugar al entrar la biomasa al gasificador, aunque este proceso no implica ninguna reacción química. Las temperaturas del proceso son superiores a 250 °C.
- Oxidación o combustión de la biomasa y productos de la pirólisis. Tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como oxígeno o aire e implica el conjunto de reacciones de oxidación, tanto homogéneas como heterogéneas, fundamentalmente exotérmicas, mediante las que se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga. La temperatura del proceso oscila entre los 1.200-1.500 °C y se produce una oxidación de los productos condensables provenientes de la zona de pirólisis.
- Reducción o gasificación de los gases oxidados. La constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o solo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado. En este proceso se forma el gas de síntesis deseado para ser aprovechado energéticamente.

A continuación, en la figura 3 se muestra un esquema general del proceso de gasificación de la biomasa.

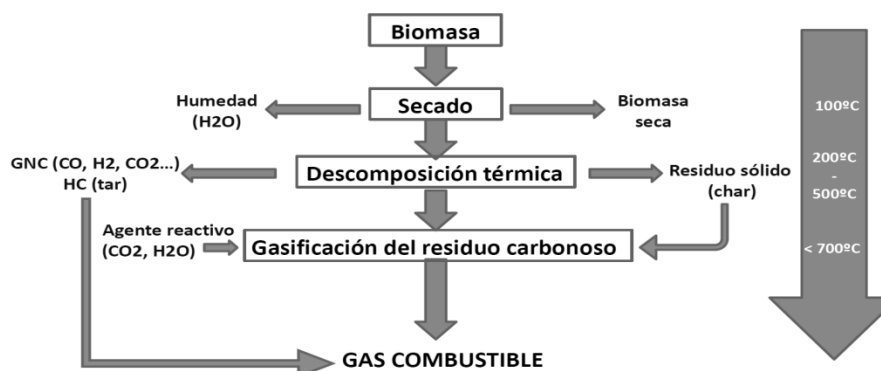


Figura 3. Esquema del proceso de gasificación de la biomasa.

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Descripción de las características de la planta de cogeneración y del proceso de producción de energía

La planta de cogeneración se compone de diversos equipos (véase figura 4) que realizan las operaciones necesarias para producir energía eléctrica y térmica a partir de la biomasa residual agrícola. El funcionamiento de la planta de cogeneración se compone de diferentes etapas. Son:

- Alimentación del gasificador: Se debe garantizar un flujo continuo de biomasa astillada en el gasificador cuando este lo requiera. La entrada de la biomasa se realiza con una cadena transportadora. La alimentación nominal de la planta es de 3.500 Kg/hora.
- Gasificación: Se produce el gas sintético a partir de la biomasa inicial mediante el proceso descrito en el apartado 1.2.
- Acondicionamiento del gas: El gas producido en el reactor se acondiciona para proteger a los demás equipos de la corrosión y del desgaste. El sistema de limpieza elimina las partículas en suspensión y los alquitranes dejando un gas limpio. Se utilizan ciclones para sedimentar las partículas. Las cenizas y partículas se llevan a un contenedor y serán aprovechadas como compost para los campos agrícolas.
- Enfriamiento del gas: Se utiliza un equipo de recuperación de calor que permite extraer energía térmica del gas producido mediante el intercambio de calor por convección entre el gas y un fluido que circula por los tubos del intercambiador. En esta etapa del proceso los quipos recuperadores de calor proporcionan energía térmica mediante al aprovechamiento del gas de salida del reactor.
- Sistemas de limpieza y enfriamiento: Se utilizan lavadores Venturi, que eliminan partículas y absorben algunos de los gases emitidos. Esta unidad es la encargada de eliminar los alquitranes arrastrados en el gas sintético y reduce la temperatura del gas hasta unas condiciones óptimas para la operación del motor generador. También hay filtros que tienen una elevada eficiencia en recolección de partículas, de hasta un 99%.
- Generación de energía eléctrica: Una vez limpio y frío el gas sintético acondicionado es un combustible que puede ser utilizado para la generación de electricidad. Este gas alimenta un motor de combustión interna que acciona un alternador. Finalmente el alternador transforma la energía mecánica recibida en electricidad, que será transportada a la red eléctrica de suministro.
- Generación de energía térmica: Se genera agua caliente aprovechando el calor residual generado en la combustión del gas sintético, es decir, se aprovecha parte de la energía disipada en la combustión. También se aprovechan los gases de escape de los motores de combustión después de su acondicionamiento.

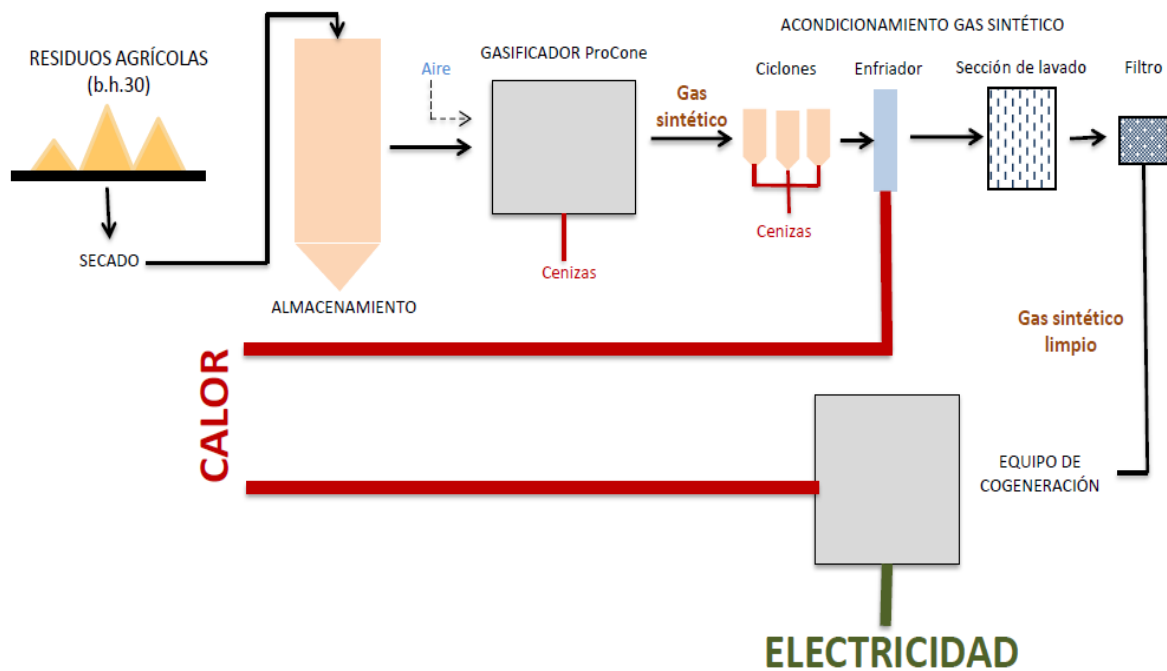


Figura 4. Etapas del proceso de cogeneración mediante la planta de cogeneración por gasificación de biomasa residual agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1 se muestra un resumen de las condiciones de operación nominales de la planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual agrícola.

Especificaciones del combustible	
Tamaño biomasa de entrada	<u>Mínimo</u> Diámetro: 5 mm ; L mín. 5 mm
	<u>Máximo</u> Diámetro: 10 mm ; Longitud: 200 mm
Contenido máximo de humedad (%)	15 %
Entrada gasificador	
Consumo de biomasa (kg/h)	3.500
Salida gasificador	
Caudal nominal (Nm ³ /h)	9.000
Poder calorífico medio = PCI gas (kJ/Nm ³)	4.500
Autoconsumo energético	10%
Equipo de cogeneración	
Salida térmica nominal (kWt)	5.320
Salida eléctrica nominal (kWe)	3.380

Tabla 1. Características del gasificador y grupo de cogeneración ProCone.

Fuente: Elaboración propia.

2. Caracterización de la biomasa residual agrícola disponible en la comarca del Segrià

2.1. Cálculo del potencial de biomasa residual agrícola generado en la comarca del Segrià

Los cultivos agrícolas leñosos generan biomasa residual potencialmente aprovechable desde un punto de vista energético a partir de dos operaciones agrícolas básicas:

- Poda de los cultivos: Consiste en desramar los árboles para optimizar el crecimiento de los frutos. Normalmente se realiza de forma anual durante el invierno.
- Arrancada de los cultivos: Consiste en eliminar los cultivos una vez estos llegan al final de su vida útil como plantación. Esta técnica genera grandes cantidades de biomasa. Se considera que la vida útil de la plantación finaliza una vez la producción de frutos no es rentable para cubrir los costes de explotación.

Para determinar el potencial de biomasa generado en la comarca del Segrià se seleccionaron los siguientes cultivos: Frutales, frutales con cáscara, viñedos y olivares. Todos los cultivos seleccionados se encuentran cartografiados en la base de referencia del *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya* disponible en la página web del *Centre de Recerca Ecològica i aplicacions Forestals (CREAF)* y actualizado en el año 2013.

Posteriormente, mediante la aplicación de un coeficiente de producción de residuos de poda y arrancada (véase tabla 2), se calculó la biomasa generada en todo el territorio comarcal.

Cultivos seleccionados	Coeficiente de producción (toneladas peso seco /ha año)	
	Residuos de poda	Residuos de arrancada
Olivar	Secano	0,40
	Regadío	0,80
Viñedo	Secano	1,00
	Regadío	1,90
Frutal	Secano	0,99
	Regadío	1,65
Frutal con cáscara	Secano	0,57
	Regadío	2,00

Tabla 2. Coeficientes de producción de residuos de poda y arrancada en cultivos leñosos.

Fuente: Urbina, Dalmases et al. 2001.

2.2. Cálculo de la biomasa residual agrícola disponible en la comarca del Segrià para abastecer a la planta de gasificación

Para desarrollar el plan logístico de aprovisionamiento de la biomasa se ha elaborado un cronograma de disponibilidad de ésta. El modelo desarrollado considera que la biomasa residual se recolecta en las parcelas agrícolas dónde se genera. Además, también se supone que el transporte de la biomasa se realiza siempre en forma de rama hasta los centros logísticos de

biomasa (CLB), dónde los residuos de poda serán almacenados para posteriormente alimentar a la planta de gasificación. El uso de este centro logístico de transferencia conlleva ciertas ventajas:

- Si el secado de la biomasa se realiza en las parcelas agrícolas y sin cubiertas exteriores, éste dependerá fuertemente de las condiciones meteorológicas de la zona. Si se utiliza un CLB para secar la biomasa residual disponible, se asegura un abastecimiento continuo de la planta de gasificación.
- Se evitan posibles plagas generadas por la acumulación de residuos en las parcelas agrícolas. Estos restos de poda acumulados en los márgenes de las parcelas hacen proliferar diversos organismos patógenos que ponen en riesgo las cosechas.
- El rendimiento de la astilladora será mayor, ya que se dispondrá de grandes cantidades de biomasa residual para ser triturada.
- Se optimiza el transporte de la biomasa hacia la planta de gasificación. Inicialmente, se transporta la biomasa con alto contenido de humedad hacia el CLB, reduciendo la eficiencia del transporte. No obstante, esta reducción se ve compensada por la mayor capacidad de transporte que presenta la rama frente a la astilla, puesto que presenta una mayor densidad aparente.
- El astillado de la biomasa se realiza en seco, en las instalaciones del CLB, tras dos meses de secado en cubierto. Se considera que el tiempo necesario para que cualquier biomasa se seque hasta el 30% en contenido de agua es de dos meses. Además, cuando el astillado se realiza en seco (humedad inferior al 30%) el rendimiento de la astilladora aumenta hasta un 60 %.
- La biomasa almacenada en el CLB se transporta hacia la planta en unas condiciones óptimas para su uso en continuo, es decir, seca y en forma de astilla.

Una vez establecidas las suposiciones del modelo, se ha generado un **diagrama temporal** de disponibilidad de biomasa. Inicialmente, partiendo de la biomasa residual anual y mediante la aplicación de un coeficiente de estacionalidad de podas, se ha obtenido la biomasa residual generada mensualmente en cada municipio de la comarca. Estos criterios de estacionalidad han sido extraídos del *Pla de Biomassa de Catalunya de 2001 (Urbina et. Al.)*. Como se puede observar en la Tabla 3 los coeficientes temporales de generación de residuos se corresponden con el periodo de poda y aclareo de los cultivos seleccionados.

Cultivo	Primer mes de poda	Último mes de poda
Frutal	Diciembre	Abril
Olivar	Enero	Mayo
Cáscara	Diciembre	Marzo
Viñedo	Octubre	Marzo

Tabla 3. Criterios de estacionalidad de la generación de residuos agrícolas en cultivos leñosos.

Fuente: Urbina, et al. 2001.

Estos criterios de estacionalidad se han transformado en un coeficiente de producción mensual (véase tabla 4) distribuyendo de forma igualitaria la generación de biomasa residual para todos los meses de poda y aclareo.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0,2
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0
0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25
0,17	0,17	0,17	0	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0,17

Tabla 4. Coeficientes de estacionalidad de la generación de residuos agrícolas en cultivos leñosos.

Fuente: Elaboración propia a partir de Urbina, et al. 2001.

Una vez disponemos de las toneladas residuales generadas de forma mensual se debe tener en cuenta el tiempo necesario para secar la biomasa. De esta forma, la biomasa seca disponible en el CLB, y por lo tanto, apta para ser astillada y transportada a la planta de gasificación, corresponde a la biomasa generada en los campos agrícolas dos meses atrás.

También hay que tener en cuenta que la disponibilidad de biomasa residual viene expresada en toneladas de peso seco, por lo que debe ser multiplicada por un factor de 1,3 para ser expresada en toneladas con un 30% de contenido en humedad.

A continuación se muestra el esquema metodológico establecido para calcular la biomasa residual disponible en cada municipio de la comarca (véase figura 5).

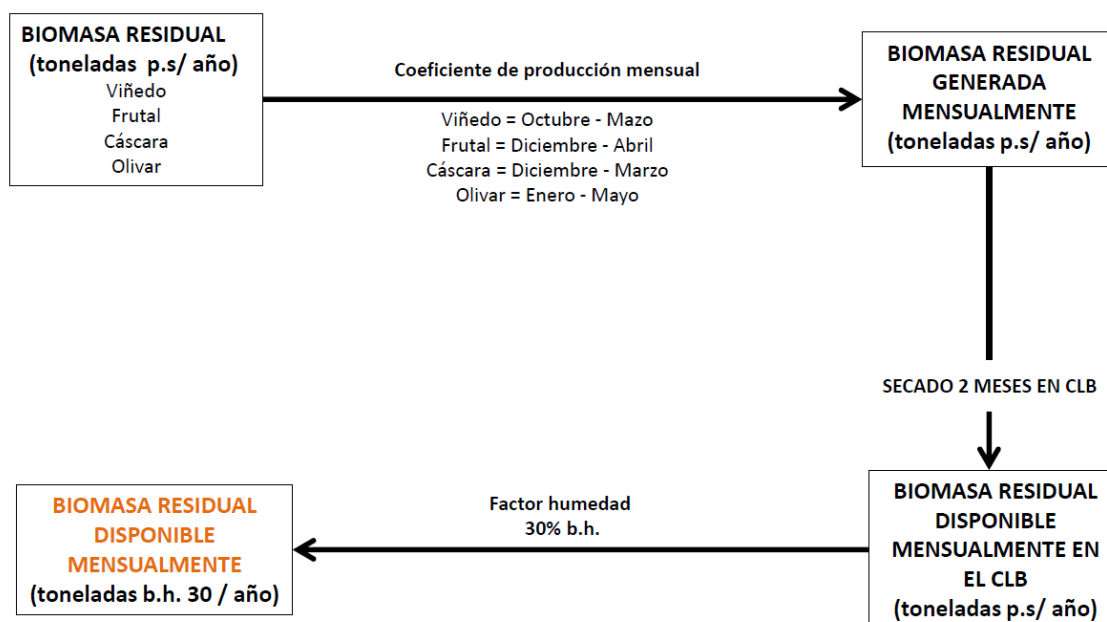


Figura 5: Esquema metodológico establecido para el cálculo de biomasa residual disponible en los municipios de la comarca del Segrià.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se ha determinado la disponibilidad del recurso se puede establecer la viabilidad de operación de la planta. Para determinar la viabilidad de operación se ha comparado el consumo de la planta con el diagrama temporal de disponibilidad. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.

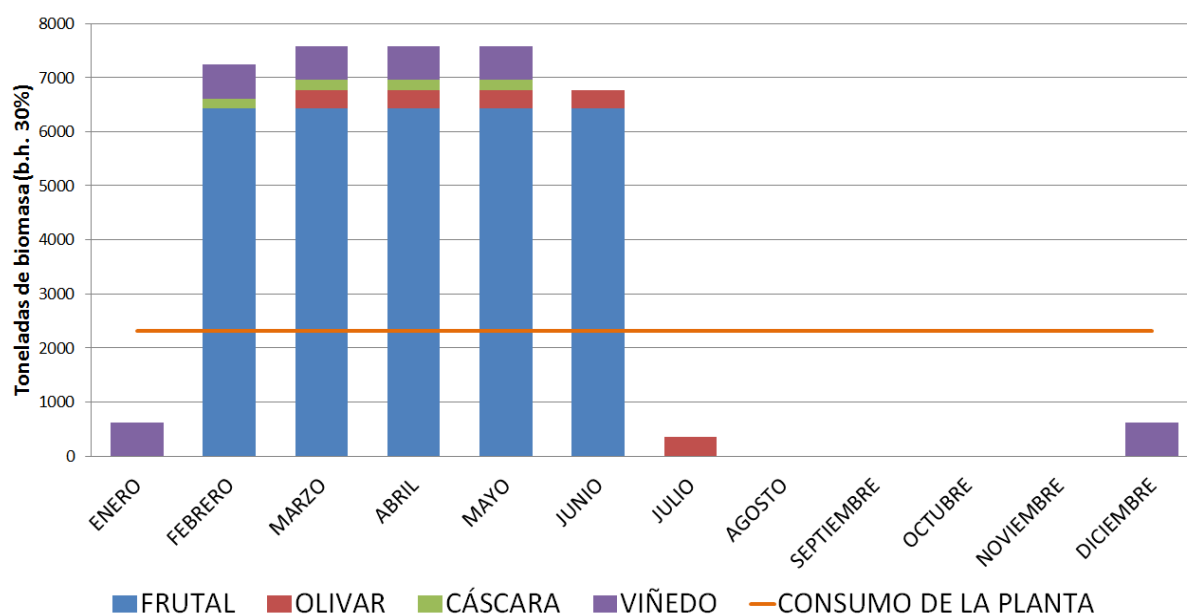


Figura 6: Diagrama temporal de la disponibilidad de biomasa residual agrícola de diferentes cultivos leñosos en la comarca del Segrià.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5 pueden observarse aquellas épocas del año que presentan un déficit de biomasa por falta de generación de residuos agrícolas.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Biomasa requerida	2321	2321	2321	2321	2321	2321	2321	2321	2321	2321	2321	2321	10.517
Excedente y Déficit	-1693	4915	5263	5263	5263	4452	-1972	-2321	-2321	-2321	-2321	-1693	

Tabla 5: Tabla resumen del abastecimiento anual de biomasa de la planta de gasificación.

Fuente: Elaboración propia.

De forma general, la biomasa de la comarca del Segrià permite alimentar la planta de gasificación de biomasa en un régimen de trabajo intensivo (7.200 horas anuales). Se puede observar que existe un excedente de biomasa durante los meses primaverales y un déficit durante los meses de verano, otoño e invierno. Este factor obliga a mantener un stock de la materia prima. El déficit anual es de 14.639 toneladas de biomasa. Por lo tanto, el conjunto de instalaciones de almacenamiento de los CLB deberán superar esta capacidad.

La planta de gasificación puede abastecerse exclusivamente con los recursos obtenidos de los cultivos leñosos de viñedo y árboles frutales. Esto indica que los CLB deben situarse en zonas próximas a los cultivos, minimizando así los costes de transporte de la biomasa.

3. Cálculo del consumo de biomasa agrícola residual demandado por la planta de gasificación

Para ubicar la planta de gasificación se debe establecer, en primer lugar, la cantidad de biomasa que debe suministrarse anualmente. Este consumo de materia prima incluye la biomasa operativa que utiliza la planta de forma mensual más un stock de seguridad de dos semanas.

El consumo máximo de biomasa en el gasificador es de 3.500 kg/h. Si consideramos que la planta trabaja de forma intensiva a lo largo del año se obtiene un total de 7.200 horas de funcionamiento. Por lo tanto, se requieren 25.200 toneladas de biomasa con humedad inferior al 15% para alimentar al gasificador durante un año.

$$\text{Consumo del gasificador de biomasa} = 3,5 \text{ Tm/h} \cdot 7200 \text{ h} = 25.200 \text{ Tm}$$

De forma general, se considera que la biomasa será suministrada a la planta de cogeneración con un 30% de humedad, transcurridos dos meses desde su astillado en campo o centro logístico. Dado que el gasificador consume 3.500 kg/h de biomasa con un 15% de humedad, el peso de la biomasa al perder la humedad será de 2.975 kg/h.

$$15\% = \frac{3.500 - \text{peso biomasa entrada } (p)}{3500} \rightarrow p = 2.975 \text{ Kg/h}$$

Si aplicamos de nuevo la expresión para el cálculo de la humedad, obtenemos un consumo de biomasa total en planta de 3.867,5 Kg por cada hora de funcionamiento.

$$30\% = \frac{p30 - p}{p} \rightarrow p30 = 3.867,5 \text{ Kg/h}$$

Suponiendo un funcionamiento anual de la planta de 7.200 horas el consumo de biomasa total de la planta será de $27,846 \cdot 10^6$ kg/año, es decir, 27.846 toneladas.

$$\text{Consumo del gasificador de biomasa} = 3,8675 \text{ Tm/h} \cdot 7200 \text{ h} = 27.846 \text{ Tm}$$

Se requiere un stock mínimo para garantizar el suministro de la planta de gasificación. El stock de seguridad solo debe incluirse en el consumo de planta durante el primer mes de funcionamiento. Posteriormente se debe ir manteniendo este stock, por lo que no debe incrementar sustancialmente el consumo de la planta en condiciones normales (sin accidentes).

$$\begin{aligned} \text{Stock de seguridad} &= \text{Biomasa mensual consumida por la planta (Tm/mes)} \div 2 \\ &= 2.320,5 \text{ Tm/mes} \div 2 = 1.160,25 \text{ Tm/mes} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el consumo anual de la planta se puede calcular como:

$$\begin{aligned} \text{Consumo anual} &= \text{Consumo del gasificador de biomasa} + \text{stock de seguridad} \\ &= 27.846 \text{ Tm} + 1.160 \text{ Tm} = 29.006 \text{ Tm anuales} \end{aligned}$$

4. Ubicación estratégica de la planta de gasificación y los CLB

Existen ciertos parámetros estratégicos que permiten establecer de forma óptima la ubicación de la planta de cogeneración. A continuación se desarrollarán los criterios más útiles para seleccionar la ubicación del proyecto dentro de la comarca del Segrià.

4.1. Criterios de superficie

Se calcula que el espacio de almacenamiento para una tonelada de biomasa leñosa astillada es aproximadamente de 2 m^2 (AVEBIOM, 2012). Por lo tanto, podemos dimensionar la superficie del almacén en la planta a partir de la biomasa necesaria para garantizar la continuidad de la producción en el caso de que se produzca algún corte del suministro. Esta superficie de almacenamiento es aproximadamente unos 2500 m^2 .

$$\text{Superficie stock seguridad} = 1.160,25 \text{ Tm/mes} \cdot 2 \text{ m}^2/\text{Tm} = 2.320,5 \text{ m}^2$$

Como ya se ha expuesto anteriormente existe un déficit de 14.639 toneladas de biomasa para abastecer la demanda en la planta de gasificación durante los meses comprendidos entre Julio-Enero (véase figura 7). Este hecho genera la necesidad de almacenar la biomasa producida en los meses excedentes. Con tal fin se construyen los Centros Logísticos de Biomasa (CLB), que albergarán la biomasa a la espera de ser transportada hasta las instalaciones de la planta de cogeneración.

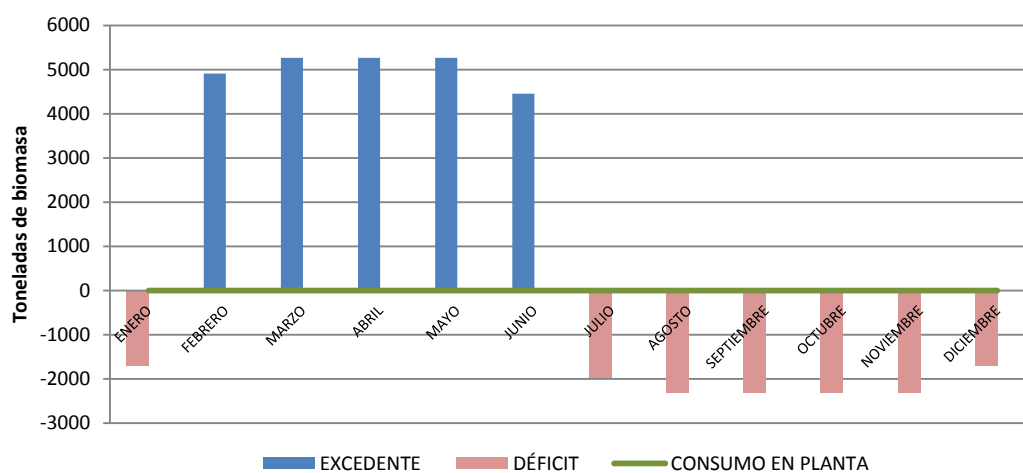


Figura 7: Gráfico del abastecimiento anual de biomasa de la planta de gasificación.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se requiere una superficie capaz de albergar un total de 14.639 toneladas de biomasa. Esta cantidad de biomasa corresponde a una superficie aproximada de 30.000 m^2 .

$$\text{Superficie CLB} = 14.639 \text{ Tm} \cdot 2 \text{ m}^2/\text{Tm} = 29.278 \text{ m}^2$$

Con el fin de determinar los CLB necesarios para albergar la biomasa, se considera que la superficie óptima de almacén es aproximadamente de 6000 m^2 (AVEBIOM, 2012). Por ello, este proyecto considera la implantación de 4 CLB (uno de ellos con doble capacidad) en la comarca del Segrià.

4.2. Criterios económicos

Existe la necesidad de que la planta de cogeneración se sitúe cerca de los centros de consumo de energía térmica y eléctrica.

Dentro de la comarca del Segrià el mayor núcleo urbano, y por lo tanto, el núcleo con mayor demanda térmica, es la ciudad de Lleida. Como puede observarse en la figura 10, el municipio seleccionado en el estudio (Albatàrrec) está en el extrarradio de la ciudad de Lleida, permitiendo así abastecer al sector industrial concentrado en la zona metropolitana de la ciudad.

Además, tal y como puede observarse en la figura 8, el municipio seleccionado de Albatàrrec presenta conexión con una línea de media tensión a 220 kV, con lo que se facilita la inyección de la electricidad generada a la red de transporte eléctrica.

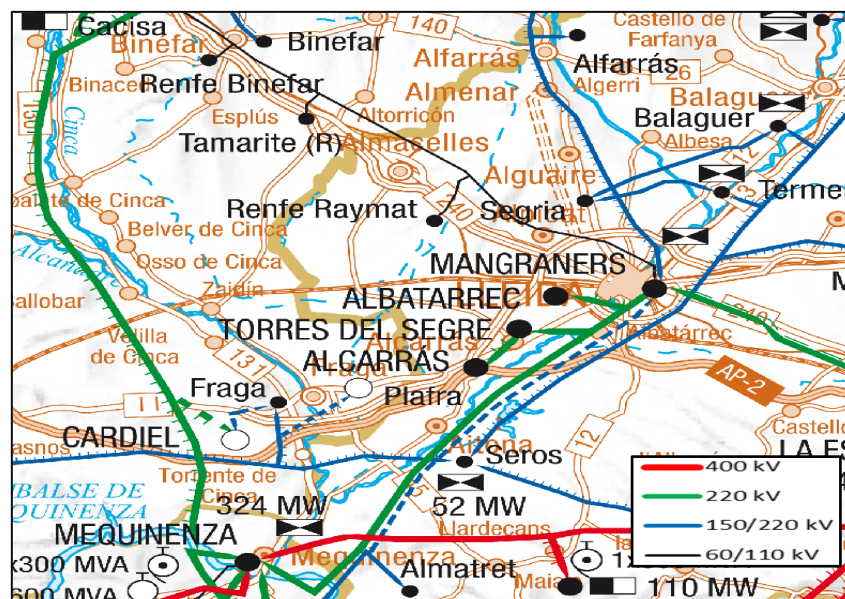


Figura 8. Distribución de la red eléctrica en la comarca del Segrià.

Fuente: Red eléctrica Española (REE), Mapa del sistema eléctrico ibérico por sectores, 2012.

4.3. Criterios logísticos

La planta de gasificación de biomasa requiere un buen planeamiento logístico de suministro. Por ello, se deben seleccionar diversos CLB para almacenar la biomasa que será requerida por la planta. Para localizar la planta se ha seleccionado un municipio bien interconectado con la red viaria comarcal. Se ha seleccionado el municipio de Albatàrrec, puesto que conecta con la mayoría de redes viarias primarias y secundarias existentes en la zona: AP-2, N-II, N-240, E-90 y C-12 (véase figura 9).

Es esencial que los puntos de producción de biomasa (campos agrícolas) y los puntos de distribución (CLB) estén bien conectados por infraestructuras viarias. La tabla 6 muestra las conexiones existentes entre las zonas de producción y almacenamiento de biomasa.

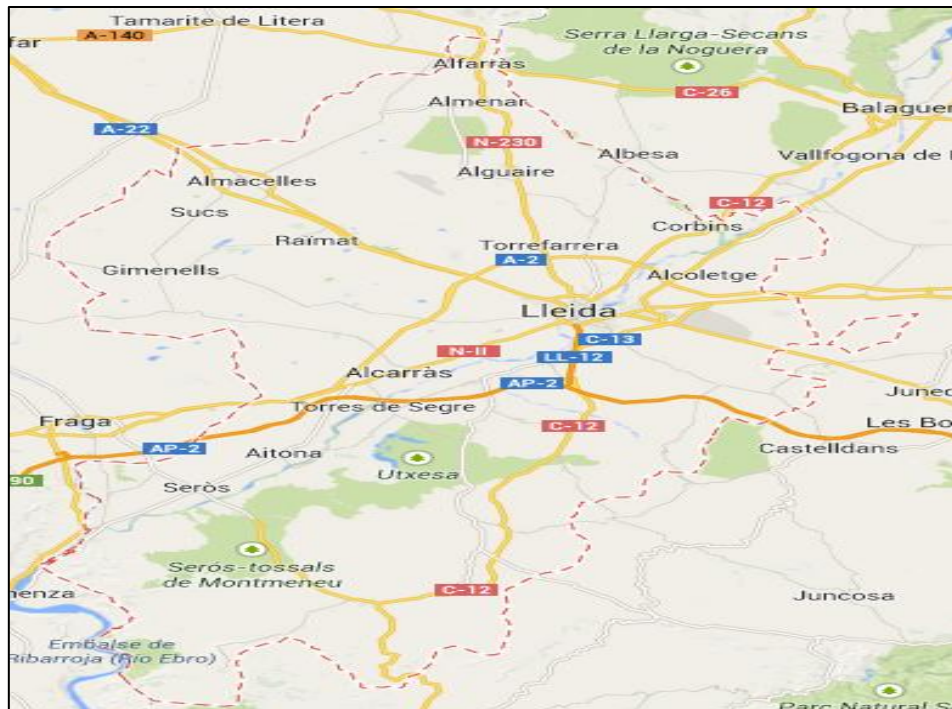


Figura 9. Distribución de la red viaria de transporte en la comarca del Segrià.

Fuente: Google maps.

	Municipio destino	Conexión viaria	Municipios origen
CLB 1 (doble capacidad)	Alpicat	N-II	Lleidà Alpicat
CLB 2	Soses	AP-2 / E-90 LP-7043	Soses Torres del Segre
CLB 3	Els Alamús	A-2	Els Alamús Corbins, Alcoletge
CLB 4	Torrebesses	C-12	La Granja d'Escarp, Torrebesses, Sarroca de Lleidà, Llardecans

Tabla 6. Conexión viaria de los centros logísticos de biomasa localizados en la comarca del Segrià.

Fuente: Google maps.

Una vez analizados los parámetros que determinarán la viabilidad técnica y logística de la planta se ha establecido la siguiente ubicación de los centros logísticos de biomasa (CLB) y de la planta de cogeneración por gasificación de residuos agrícolas (véase figura 10).

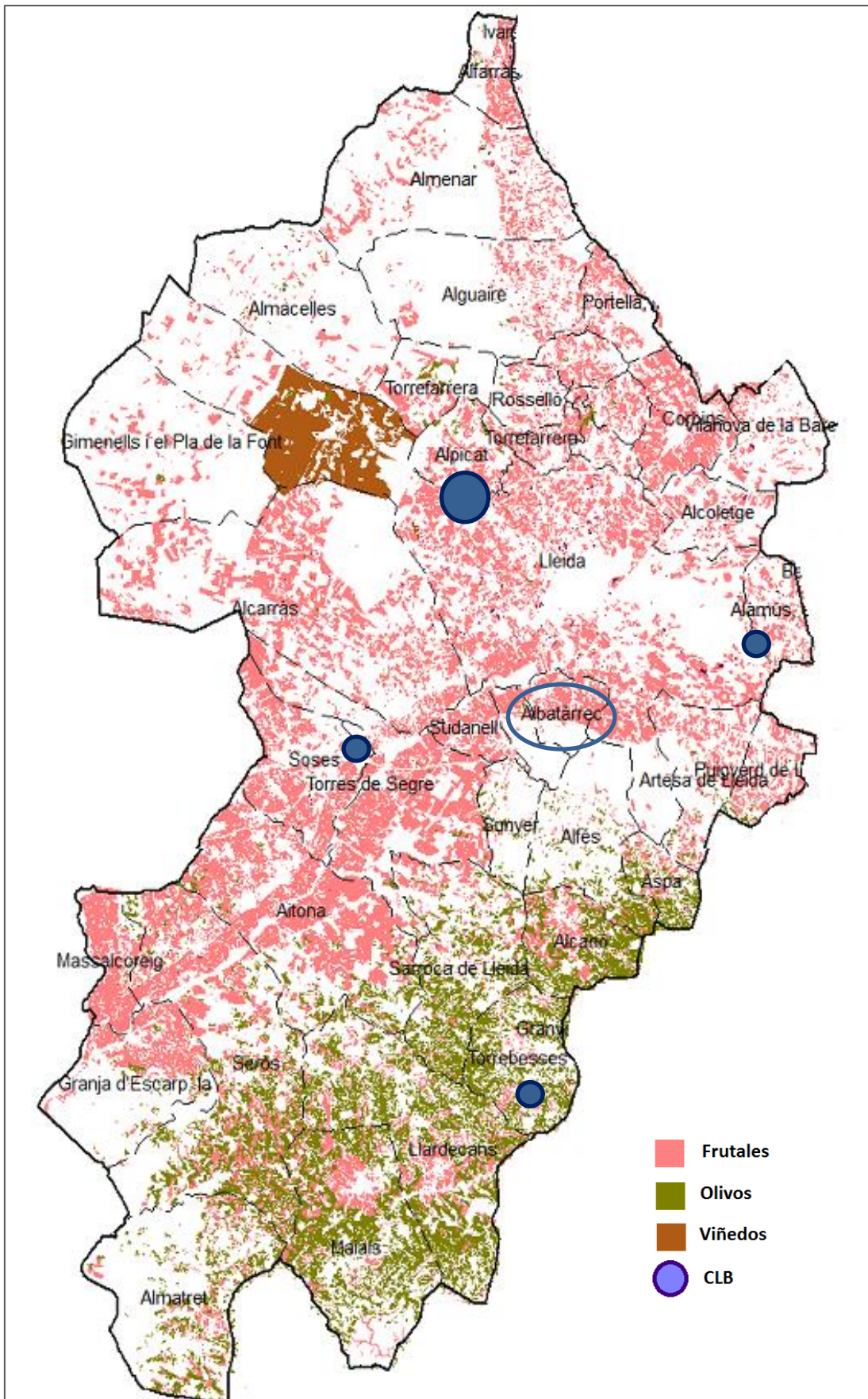


Figura 10. Mapa de la distribució de los CLB y la planta de cogeneración en la comarca del Segrià.

Fuente: Elaboración propia.

5. Balance energético de la gasificación de los restos agrícolas en el proceso de cogeneración

5.1. Cálculo del poder calorífico de la biomasa

Para determinar el PCI o poder calorífico inferior de la biomasa de entrada al gasificador, partiremos de la biomasa disponible en base húmeda al 15%. Según la normativa UNE 164001 EX, el PCI de la biomasa en base húmeda se calcula mediante la expresión:

$$PCI = (PCS_0 \cdot 1.000 (1-H_m) - 11.27 \cdot (H_m \cdot 100) - 1.322) / 1.000$$

Dónde PCS_0 es el poder calorífico superior de la biomasa con humedad del 0%. Como los residuos agrícolas de entrada procederán de diferentes cultivos, se tomará un valor medio del PCS_0 obtenido de forma experimental (Dalmases et. al, 2001) para diferentes tipos de biomasa. La tabla 7 muestra el valor del PCS_0 obtenido para diferentes residuos agrícolas.

Tipología de residuo agrícola	PCS_0 (MJ/kg)
Frutales	15,314
Olivo	15,730
Frutales con cáscara	15,041
Viñedo	15,275
	X = 15,340

Tabla 7. Valores del PCS_0 obtenidos para diferentes muestras de biomasa residual agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

Tomando como referencia este PCS_0 se puede calcular el PCI de la biomasa a diferentes humedades (véase tabla 8). Nótese que el valor obtenido para una biomasa en base húmeda del 15% es de aproximadamente 11,5 MJ/Kg.

Humedad base húmeda (%)	PCI (MJ/kg)
0,5	5,7845
0,4	7,4312
0,3	9,0779
0,2	10,7246
0,15	11,54795
0,1	12,3713
0,05	13,19465

Tabla 8. Valor del PCI de la biomasa residual en función del grado de humedad en base húmeda.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Cálculo del rendimiento energético global del proceso de cogeneración

1) Rendimiento energético del gasificador:

La entrada de biomasa proporciona una potencia de 14.913,9 kW.

$$15.340 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 3.500 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 53.690.000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 14.913,9 \text{ kW}$$

A la salida del gasificador se obtiene un gas sintético con una potencia de 11.250,0 kW.

$$9.000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 4.500 \frac{\text{KJ}}{\text{Nm}^3} = 40.500.000 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{kW}}{3600 \text{ kJ}} = 11.250,0 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el rendimiento global de la gasificación es del 74,5 %.

$$\frac{11.250,0 \text{ kW}}{14.913,9 \text{ kW}} = 0,754$$

2) *Rendimiento del motor generador:*

$$3.380 \text{ kWe} / 11.250,0 \text{ kW} = 0,301$$

3) *Rendimiento global (incluyendo potencia térmica recuperable):*

$$(3.380 \text{ kWe} + 5.320 \text{ kWt}) / 14.913,9 \text{ kW} = 0,583$$

5.3. Cálculo de la producción eléctrica y térmica del proceso

En base a las horas trabajadas por la planta de gasificación de biomasa y mediante los datos de potencia suministrada por el equipo de cogeneración, se pueden obtener los valores de energía generadas por el proceso.

1) *Energía eléctrica:* se produce íntegramente a partir del equipo motogenerador. Se calcula:

$$E_e = P_e \cdot t$$

$$E_e = 3.380 \text{ KWh}_e \cdot 7.200 \text{ h} = 24.336 \text{ Mwh}_e$$

2) *Energía térmica:* se produce por el motor de generación integrado en el equipo de cogeneración. Esta energía térmica procede de la fricción mecánica de los componentes del motor, de las pérdidas por efecto joule del generador y de la radiación y calor sensible transmitidos por los gases de combustión. Se calcula:

$$E_t = P_t \cdot t$$

$$E_t = 5.320 \text{ KWh}_t \cdot 7.200 \text{ h} = 38.304 \text{ Mwh}_t$$

A continuación, en la figura 11, se muestra el diagrama de Sankey del proceso. En este diagrama se pueden observar los flujos energéticos del sistema desde la entrada de la biomasa hasta la generación de energía térmica y calorífica. Se observa que las mayores pérdidas del proceso se producen en la primera etapa de gasificación ya sea para acondicionar el gas sintético a la salida del reactor (10%) o por las imperfecciones termodinámicas del equipo (24,5%).

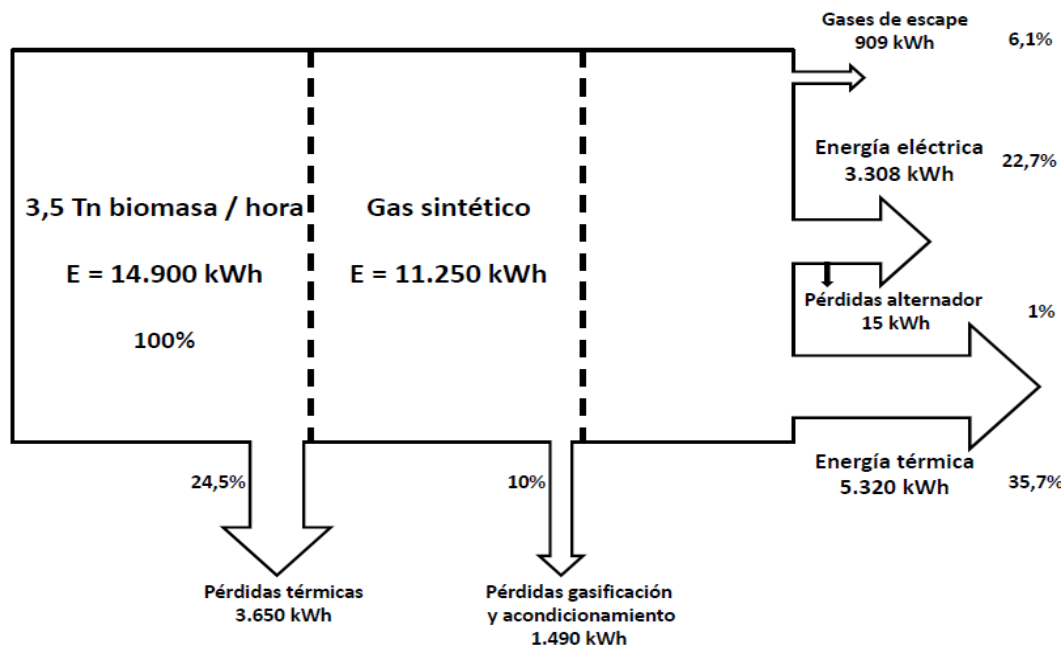


Figura 11. Diagrama de Sankey del proceso de gasificación de residuos agrícolas para la obtención de energía eléctrica y térmica.

Fuente: Elaboración propia.

6. Análisis de la viabilidad económica de la planta

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto es necesario establecer diferentes escenarios que permitan valorar el riesgo de la inversión. En este estudio, se consideran las retribuciones estatales recibidas por la generación de energía eléctrica como el principal factor modelador de los distintos escenarios. Debe tenerse en cuenta que todos los escenarios han sido analizados con la venta de energía térmica y sin ella, puesto que la ubicación de la planta será un elemento clave para poder incorporar la energía calorífica producida dentro del mercado. Distinguimos los siguientes escenarios:

Escenario 1: Las retribuciones a la generación eléctrica se rigen mediante el RD 661/2007, que establece incentivos temporales para aquellas instalaciones que utilicen energías renovables con la finalidad de que se posicionen en el mercado. Se supone que la venta de energía se realiza a precio fijo o de tarifa. A continuación, en la tabla 9, se muestra la retribución asociada a la electricidad producida por cogeneración con biomasa.

Subgrupo	Potencia	Plazo (años)	Tarifa regulada (c€/ kWh)	Prima de referencia (c€/ kWh)	Precio de venta (€/MWh)
b.8.1	P ≥ 2MW	0-15	13,4216	9,2462	226,678

Tabla 9. Retribución de a la cogeneración con biomasa del RD 661/2007.

Fuente: RD 661/2007.

Escenario 2.1: Las retribuciones a la generación eléctrica se rigen por el nuevo RD 413/2014 pendiente de futura publicación (véase información relativa en el anexo II). En este escenario se supone una producción de electricidad limitada por el real decreto de 6.500 horas anuales. Estas restricciones suponen un complemento de retribución a la operación de la planta generadora. A continuación se muestra el precio de venta considerado por este escenario:

Precio venta 2014-2016 = Precio de mercado¹ + Retribución a la inversión + Retribución a la operación

Precio de venta 2014-2016 = Precio de mercado + 272,5960 + 29,2410

Precio de venta 2016-2029 = Precio de mercado

Escenario 2.2: Las retribuciones a la generación eléctrica se rigen por el nuevo RD 413/2014 publicado el 6 de Junio de 2014 (véase información relativa en el anexo II). En este escenario se supone una producción nominal de electricidad con un funcionamiento anual de la planta de gasificación de 7.200 horas anuales. Por lo tanto, se pierden las retribuciones de operación, a la vez que se incrementa el ingreso generado por el incremento de la producción eléctrica. A continuación se muestra el precio de venta considerado por este escenario:

Precio de venta 2014-2016 = Precio de mercado + Retribución a la inversión

Precio de venta 2014-2029 = Precio de mercado + 272,5960

Precio de venta 2016-2029 = Precio de mercado

Una vez definidos los escenarios, el estudio de viabilidad económica determinará cuál es el coste máximo de la biomasa que permite rentabilizar el proyecto. Por lo tanto, a partir del análisis de diferentes indicadores de inversión se podrán comparar los resultados obtenidos para los costes máximos rentables con los costes asociados a la obtención de biomasa.

6.1. Metodología para analizar la viabilidad económica de la planta de gasificación

Para realizar el análisis económico de la planta de gasificación se ha aplicado la metodología de análisis de costes y beneficios. Se han utilizado los siguientes indicadores de inversión: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) e Índice de Rentabilidad Financiera (IR_f). Estos indicadores serán usados para determinar la viabilidad de los distintos escenarios generados previamente.

6.1.1. Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

El VAN se define como el valor actualizado de los rendimientos esperados, es decir, la diferencia entre el valor actual de beneficios y costes previstos. Para tomar decisiones de inversión se escogen aquellos proyectos que maximicen el VAN. El VAN se calcula a partir de la siguiente ecuación:

Donde, n es la vida útil de la planta; k es el número de años; y es el tipo de interés; I_0 es el coste de inversión; y F_k es el flujo neto de caja en el año k .

¹ El Precio de mercado se fija en 49€/MWh para el año 2014, 50€/MWh para el año 2015 y 52€/MWh para los años posteriores al 2015 según el RD 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuo.

La interpretación del VAN, su significado y el proceso para la toma de decisiones se resumen en la tabla 10.

Valor	Significado	Decisión
VAN > 0	La inversión producirá beneficios por encima de la rentabilidad exigida.	El proyecto puede aceptarse.
VAN < 0	La inversión producirá pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida.	El proyecto debería no ser aceptado.
VAN = 0	La inversión no producirá beneficios ni pérdidas.	El proyecto no conlleva ningún resultado económico. La decisión se debe tomar en función de otros criterios.

Tabla 10. Interpretación del VAN, significado y proceso para la toma de decisiones en una inversión.

Fuente: Elaboración propia.

El flujo neto de caja (F_k) o *cash-flow*, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F_k = IV - CFT - CVT - I - F + A$$

Donde IV son los ingresos de las ventas totales; CFT son los costes fijos totales; CVT son los costes variables totales; I son los impuestos; F son las cargas financieras; y A es la amortización.

Los costes totales (CT) de un proyecto de inversión son la suma de los costes fijos totales (CFT) y de los costes variables totales (CVT):

$$CT = CFT + CVT$$

Los costes fijos totales (CFT) consisten en la amortización (A) y el coste de la póliza de seguros. Finalmente, los costes variables totales (CVT) incluyen los costes variables como por ejemplo, el mantenimiento, coste de materia prima, energía y salarios. La amortización (A) se calcula como el coste de inversión dividido por la vida útil de la inversión, normalmente en años.

6.1.2. Cálculo de la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

La **TIR** o Tasa Interna de Rentabilidad es la tasa de interés que proporciona un proyecto con un valor actual neto de valor nulo, es decir, la tasa de interés por la cual los costes de la inversión conducen a beneficios de la inversión. Por lo tanto, la inversión en un proyecto es aceptable cuando la TIR es mayor que el coste de capital, que desde el punto de vista del inversor, corresponde con el retorno esperado de la inversión. El TIR también se puede definir como el rendimiento del proyecto.

$$VAN = \sum_{k=1}^n \frac{F_k}{(1+TIR)^k} - I_0 = 0$$

Donde VAN es el Valor Actual Neto; k es el número de años; TIR es la Tasa Interna de Retorno; I_0 es el coste de inversión; y F_k es el flujo neto de caja en el año k.

La interpretación de la TIR, su significado y el proceso de toma de decisiones se resumen en la tabla 11.

Valor	Significado	Decisión
TIR > r	La inversión producirá una rentabilidad mayor que el coste de oportunidad del capital (r), es decir, la rentabilidad mínima requerida.	El proyecto puede aceptarse.
TIR < r	La inversión producirá una rentabilidad menor que el coste de oportunidad del capital (r), es decir, la rentabilidad mínima requerida.	El proyecto debería no ser aceptado.
TIR = r	La inversión no producirá rentabilidad.	Es indiferente.

Tabla 11. Interpretación de la TIR, significado y proceso de decisión para una inversión.

Fuente: Elaboración propia.

En general, un proyecto de inversión puede aceptarse con un valor del VAN positivo y con un TIR mayor que otro proyecto de inversión. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos criterios un proyecto se podría aceptar si:

- Su Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) es superior al coste de capital o interés financiero, es decir, al coste de los recursos propios y ajenos (incluyendo los costes de financiación del proyecto).
- Su Valor Actual Neto (VAN), obtenido mediante la actualización de los flujos de capital generados a una tasa equivalente al coste del capital, es positivo.
- Se debe tener en cuenta que el VAN mide la rentabilidad en términos absolutos y la TIR en términos relativos.

6.1.3. Cálculo del Índice de Rentabilidad Financiera (IR_f)

El Índice de Rentabilidad Financiera (IR_f) es un criterio para evaluar la rentabilidad de un proyecto. Son viables aquellos proyectos con un IR_f > 1, ya que permiten recuperar la inversión si tenemos en cuenta el tiempo transcurrido sobre el valor del capital. Se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$IR_f = \frac{VAN}{I_0}$$

Donde VAN es el Valor Actual Neto; y I₀ es el coste de la inversión.

6.2. Descripción de los costes de inversión, operación y mantenimiento

La inversión necesaria para adquirir los equipos de gasificación y cogeneración es de 12.600.000 €, según los resultados publicados por el estudio *Commercial assessment in advanced conversion technology (gasification) for biomass projects*, Junio de 2007. Debe tenerse en cuenta que la inversión inicial incluye la adquisición, instalación y puesta en marcha de los equipos. Las pólizas de seguro se consideran el 1% del total del inmueble y se pagan anualmente, representando una porción de los costes fijos mensuales. También se consideran costes fijos aquellos derivados de la adquisición de terrenos y construcción de los CLB.

Para realizar el análisis de viabilidad económica de la inversión es necesario definir los costes que se van a generar mediante el desarrollo de la actividad productiva. Esta actividad genera diversos costes variables asociados a la operación y mantenimiento de la planta. Estos costes variables se describen a continuación:

Costes de personal: Se requieren aproximadamente unas 20 personas para desarrollar las actividades de la planta y transportar la biomasa desde los centros de producción. Se considera que el salario medio de los operarios es de 30.000 € anuales.

Costes logísticos: Definidos en el Anexo I. Equivale al coste de aprovisionamiento de la materia prima. Este coste será comparado con el valor máximo que permite la rentabilidad del proyecto.

Costes de mantenimiento: La empresa suministradora se encarga de proporcionar estos servicios de mantenimiento con unos costes de 180.000 € anuales.

Costes CLB: Estos costes fijos constituyen la totalidad de costes determinados por la existencia de los CLB. En este caso se incluyen los costes de adquisición de terrenos y construcción de los almacenes. El coste es de 175 €/m² de almacenamiento (PEMADE, 2000), por lo que representa un coste de 5.123.650 € (29278 m² repartidos en 4 CLB, uno de ellos con doble capacidad).

Hay que tener en cuenta que en los costes variables no se incluyen costes energéticos, puesto que la planta consume parte de la energía producida para abastecer a los equipos en funcionamiento (situación de autoconsumo).

6.3. Resultados del análisis económico de la planta de gasificación

6.3.1. Resultados obtenidos para los costes logísticos o de aprovisionamiento de materia prima

A continuación, en la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para los costes logísticos de suministro de biomasa a la planta de cogeneración por gasificación de biomasa.

Descripción de los costes	Coste (€)	Coste unitario (€/tonelada)
Distribución hasta CLB	66.461	2,25
Astillado biomasa en CLB	634.226	21,49
Transporte hasta planta	13.081	0,44
Total	713.768	24,19

Tabla 12. Resultados obtenidos para los costes logísticos de suministro de biomasa.

Para validar los resultados obtenidos para el astillado de biomasa se muestra en la tabla 13 una recopilación de los costes asociados al tratamiento de la biomasa publicados en diversos informes técnicos.

	Tipo de biomasa	Precio Astillado (€/Tn)
Informe PER 2013	Forestal	13,7
Experiencias con biomasa agrícola. IDEA, 2008	Agrícola leñosa	22,12
Aprovechamiento energético de cultivos leñosos. AVEBIOM, 2009	Agrícola leñosa	27,15

Tabla 13. Costes recopilados en la bibliografía para el astillado de la biomasa.

Los resultados obtenidos para el transporte de la biomasa no son comparables con otras experiencias, puesto que las distancias entre los centros de producción agrícola y los CLB pueden ser muy variables. No obstante, este estudio analiza estos costes para poder realizar un análisis económico completo de la planta de cogeneración por gasificación de biomasa.

También debe tenerse en cuenta que existen costes de tratamiento externalizados a otras actividades. Se trata de los costes de poda y recolección, que son asumidos por los agricultores. Se considera que estos costes los asume el agricultor ya que es una actividad vital para el desarrollo de la producción. No obstante, para motivar a los agricultores a participar en el proyecto y suministrar la biomasa residual de sus cosechas, se debe valorar un retorno económico al agricultor. A continuación, en la tabla 14, se muestran los resultados de costes de extracción y recolección obtenidos por diferentes estudios.

Costes de extracción y recolección para cultivos leñosos (€/Tn)	
IDAE, 2008	41,92
<i>Pla de Biomassa 2001</i>	45,62

Tabla 14. Costes recopilados en la bibliografía para la extracción y recolección de biomasa.

Fuente: IDAE.

A continuación, en la tabla 15, se muestran los precios de venta de la biomasa forestal de las principales empresas distribuidoras de biomasa en España.

Precio biomasa forestal astillada (€/Tn)	
Biomasa TradeCentre	82
AVEBIOM	102

Tabla 15. Precios recopilados en la bibliografía para la astilla de procedencia forestal.

Fuente: Biomasa TradeCentre, AVEBIOM.

6.3.2. Resultados globales de rentabilidad del proyecto

A continuación, en la tabla 16, se muestra un resumen con los resultados obtenidos para el análisis de inversión de los diferentes escenarios analizados. Los resultados destacados son aquellos que presentan un coste máximo más bajo, puesto que al tratarse de un proyecto de inversión, parece acertado limitar la rentabilidad del proyecto a la opción más pesimista.

Escenario	VAN	TIR	IR_f
Escenario 1	148,3 €	138,4 €	127,8 €
Escenario 1 sin Q	98,9 €	106,3 €	100,3 €
Escenario 2.1	29,7 €	28,8 €	30,1 €
Escenario 2.1 sin Q	4,9 €	5,0 €	5,3 €
Escenario 2.2	39,5 €	37,7 €	37,2 €
Escenario 2.2 sin Q	9,9 €	9,6 €	9,7 €

Tabla 16. Coste máximo de obtención de biomasa para que los escenarios planteados en el estudio sean viables económicamente.

Para el escenario 1, el estudio económico muestra que el coste de la biomasa puede ascender hasta los 127,8 €/Tm. Este resultado da un gran margen para comprar biomasa residual y permitir que la inversión sea viable. En la Figura 12 se muestra la evolución del precio máximo de la biomasa para que el escenario 1 con venta de energía térmica sea rentable.

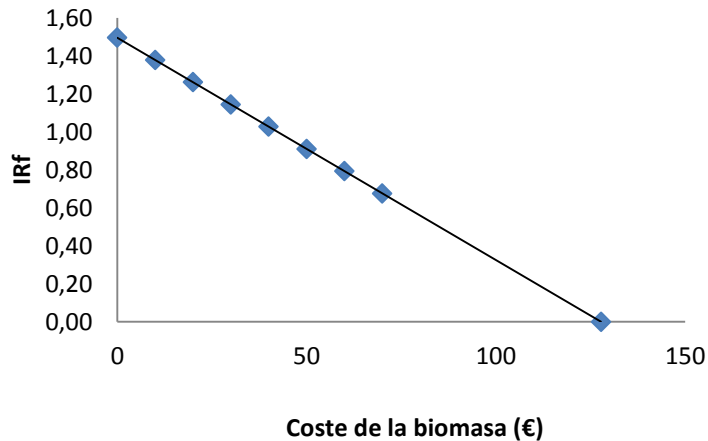


Figura 12. Análisis de la viabilidad económica del escenario 1 sin venta de energía térmica mediante el método del Índice de Rentabilidad Financiera.

Cuando no tenemos en cuenta la venta de energía térmica los resultados muestran una inversión viable, aunque se reduce el margen de beneficio, y por tanto, el coste máximo para obtener la biomasa se reduce a 98,9 €/Tm. En la figura 13 se muestra la evolución del precio máximo de la biomasa para que el escenario 1 sin venta de energía térmica sea rentable.

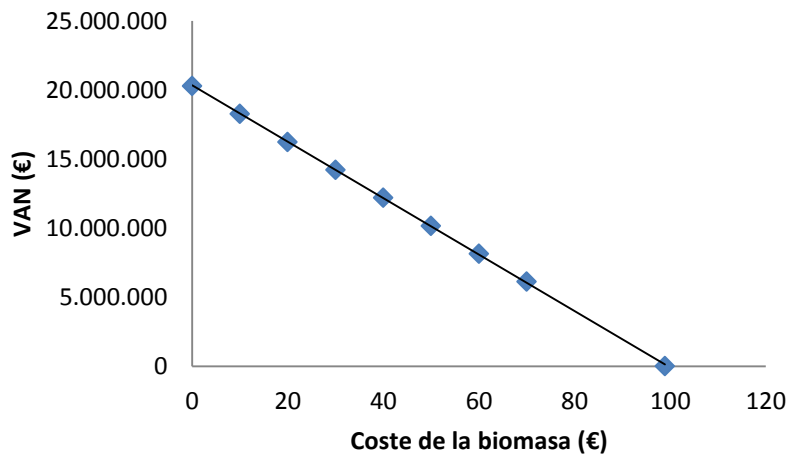


Figura 13. Análisis de la viabilidad económica del escenario 1 con venta de energía térmica mediante el método del Valor Actual Neto.

Para el escenario 2.1, el estudio muestra que la inversión es viable cuando tenemos en cuenta la venta de energía térmica. En este caso, el margen de beneficio es mucho más bajo que en los primeros escenarios, y se sitúa en 28,8 €/Tm, precio muy próximo al de coste de aprovisionamiento. En la figura 14 se muestra la evolución del precio máximo de la biomasa para que el escenario 2.1 con venta de energía térmica sea rentable.

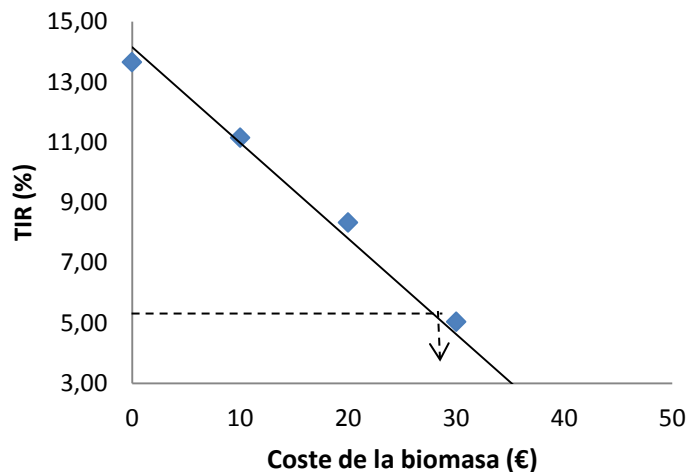


Figura 14. Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.1 con venta de energía térmica mediante el método de la Tasa Interna de Rentabilidad.

Cuando no tenemos en cuenta la venta de energía térmica se considera que el proyecto no es viable puesto que el máximo coste de biomasa que asegura la rentabilidad del proyecto, en este caso 4,9 €/Tm, que es inferior al coste real de aprovisionamiento. En la figura 15 se muestra la evolución del precio máximo de la biomasa para que el escenario 2.1 sin venta de energía térmica sea rentable.

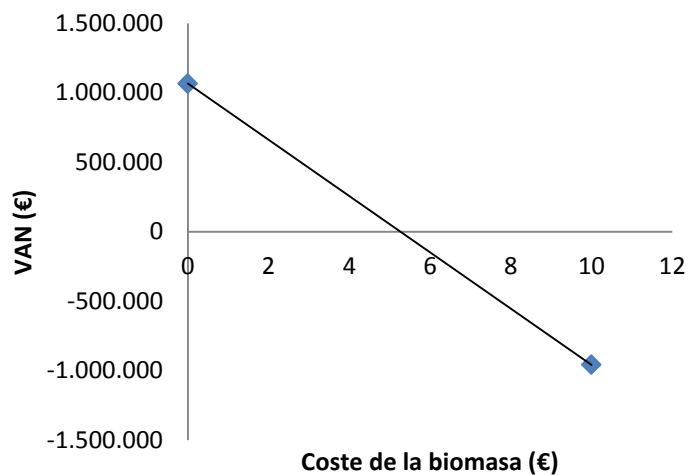


Figura 15. Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.1 sin venta de energía térmica mediante el método del Valor Actual Neto.

Para el escenario 2.2, el estudio muestra la viabilidad del proyecto cuando se vende energía térmica generada en el proceso, con un coste máximo de biomasa de 37,2 €/Tm. En la figura 16 se muestra la evolución del precio máximo de la biomasa para que el escenario 2.1 con venta de energía térmica sea rentable.

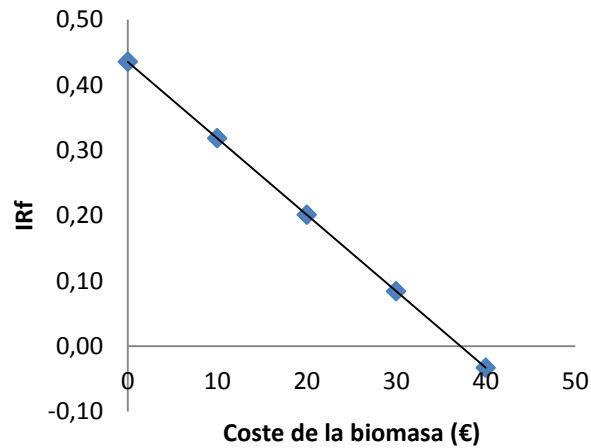


Figura 16. Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.2 con venta de energía térmica mediante el método del Índice de Rentabilidad Financiera.

No obstante, cuando no se considera la venta de energía térmica, el resultado de viabilidad es negativo, con un coste máximo de biomasa de 9,6 €/Tm. En la figura 17 se muestra la evolución del precio máximo de la biomasa para que el escenario 2.2 sin venta de energía térmica sea rentable.

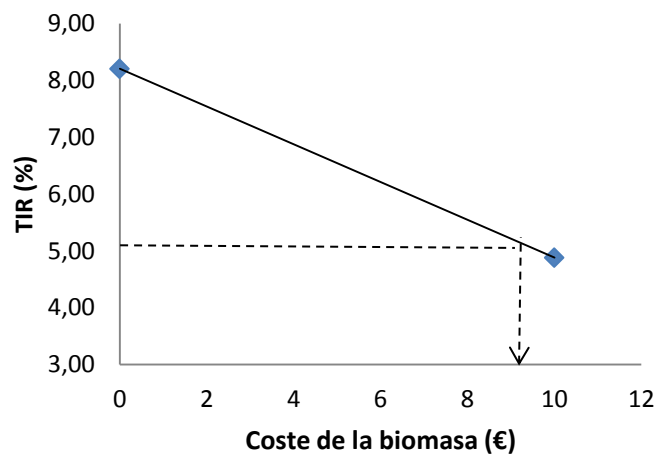


Figura 17. Análisis de la viabilidad económica del escenario 2.2 sin venta de energía térmica mediante el método de la Tasa Interna de Rentabilidad.

A continuación se muestra, en la tabla 17, un resumen de los resultados obtenidos para el análisis de viabilidad de los diferentes escenarios:

Escenario	Legislación	Venta energía eléctrica	Venta energía térmica	Coste máximo de la biomasa (€/Tn)	Coste de la biomasa	Viabilidad
Escenario 1	RD 661/2007	SI	SI	127,8	24,19	SI
		SI	NO	98,9		SI
Escenario 2.1	RD 413/2014	SI (limitada)	SI	28,8		SI
		SI (limitada)	NO	4,9		NO
Escenario 2.2	RD 413/2014	SI	SI	37,2		SI
		SI	NO	9,6		NO

Tabla 17. Resumen de los resultados obtenidos para los diferentes escenarios considerados.

Teniendo en cuenta que durante los próximos años sólo pueden acontecerse los escenarios 2.1 y 2.2 debido al cambio en la legislación española, se considera como mejor escenario el 2.2 con venta de energía térmica, puesto que presenta un coste máximo de la biomasa más elevado. Para analizar la competitividad de nuestra planta dentro del mercado generador español, debemos comparar el coste unitario de generación eléctrica con el de otras energías generadoras.

Partiendo de los resultados obtenidos para la evolución del coste unitario de generación eléctrica del escenario 2.2 (véase tabla 18), se puede obtener el precio unitario de generación cuando el coste de la biomasa es de 37,2 €/Tm.

Coste de la biomasa (€)	0	10	20	30	40	50	60	70
Coste de generación (€/MW)	82	93	105	116	128	139	151	162

Tabla 18. Costes de generación eléctrica para diferentes costes de biomasa en el escenario 2.2.

Si se representan los resultados obtenidos (véase figura 18) se puede obtener la expresión que relaciona el precio de la biomasa con el coste unitario de generación.

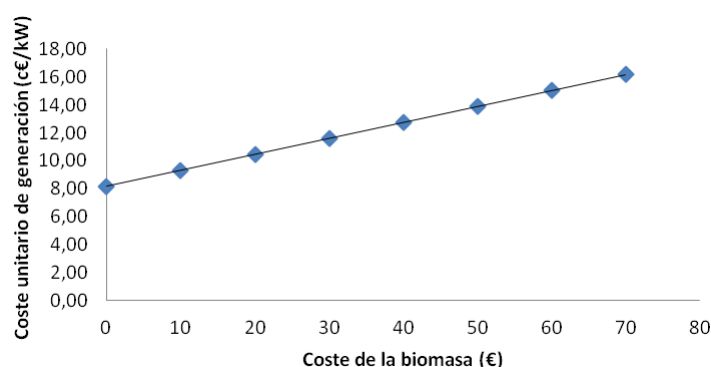


Figura 18. Evolución del coste de generación de energía eléctrica para el escenario 2.2 sin venta de energía térmica.

Por lo tanto, el coste unitario de generación eléctrica cuando el coste de la biomasa es de 37,2 €/Tm es de 12,44 c€/kW.

$$\text{Coste unitario de generación eléctrica} = 0,1144 \cdot 37,2 + 8,1897 = 12,44 \text{ c€/kW}$$

Ahora, ya se puede comparar el coste de generación de la planta (línea discontinua roja) con el coste de generación de otras energías renovables para analizar su futura competitividad en el mercado². En la figura 19 se muestran las perspectivas de diversas tecnologías renovables hasta el año 2030. Actualmente la planta es competitiva con la energía solar, geotérmica y mareomotriz. a partir del año 2020 la energía FV y solar termoeléctrica reducirán por debajo de la biomasa sus costes de generación.

² Estudio técnico PER 2011-2020. Evolución tecnológica y prospectiva de los costes de las energías renovables.

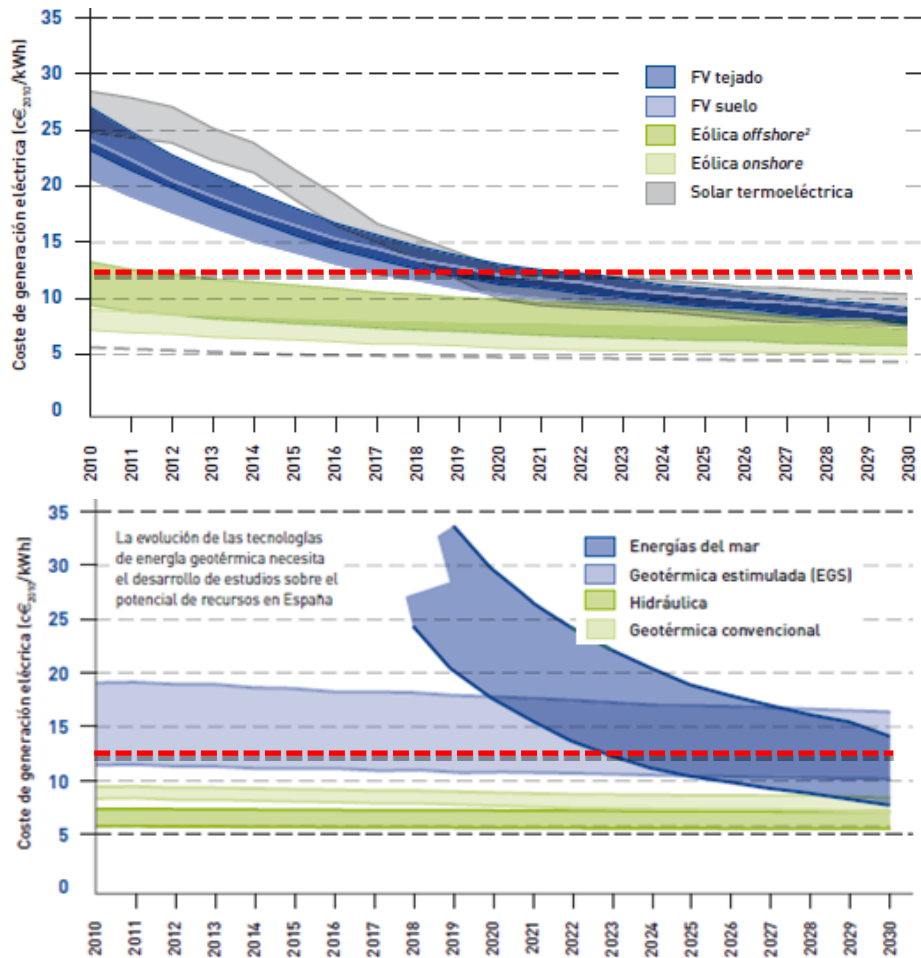


Figura 19. Evolución de los costes de generación en nuevas energías renovables, IDAE 2010.

En la figura 20 se muestra la evolución de los costes de generación para el sector biomasa. Como se puede observar el coste para la planta de gasificación está dentro de lo esperado para el conjunto de biomasa a pequeña escala. No obstante no se espera una gran reducción de los costes, que en el mejor de los casos llegará al 15-20%.

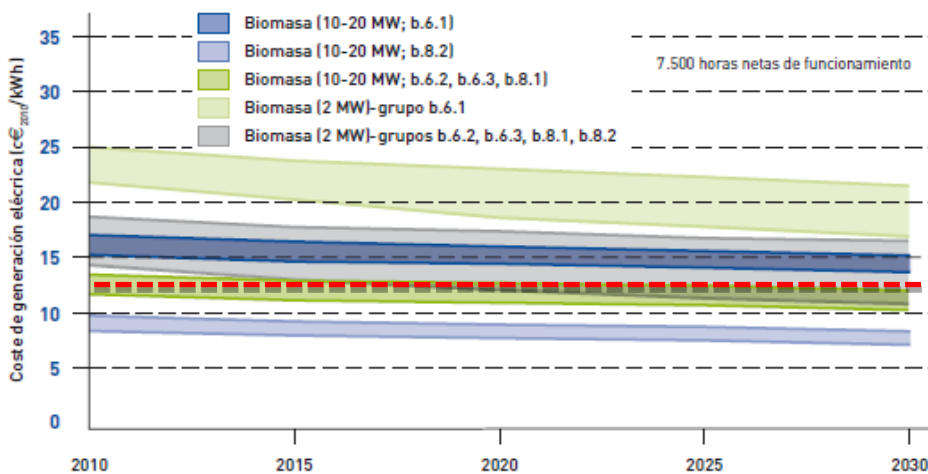


Figura X. Evolución de los costes de generación eléctrica con biomasa, IDAE 2010.

7. Análisis DAFO

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> - Recurso gestionable, renovable y competitivo - Creación directa e indirecta de empleo - Energía limpia y sostenible, reducción GEI - Coste inferior a la biomasa forestal - Desarrollo local de una estructura empresarial - Valorización de residuos agrícolas - Costes de generación competitivos actualmente - Elevado rendimiento del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad limitada por la generación de biomasa agrícola residual - Dificil coordinación logística - La biomasa es variable en sus características energéticas - Elevados costes de inversión - Se requiere mucho espacio para el almacenamiento de la astilla - Pocas referencias a nivel estatal - Emisión de partículas y NO_x en la atmosfera
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad para tratar otro tipo de biomasa y residuos - Reducción de la dependencia energética de la comarca - Desarrollo rural de la comarca - Reducción de incendios por quema de restos de poda en los campos agrarios - Sector en crecimiento y con buenas expectativas de futuro 	<ul style="list-style-type: none"> - Mercado de la demanda térmica dominado por el gas natural - Desconocimiento social, necesidad de divulgación - Competencia con industria de la madera, astilla y pellets de biomasa - Lentitud de los permisos administrativos - Reformas energéticas y suspensión de primas, inseguridad jurídica - Riesgo de sobreexplotación

Tabla 19. Análisis DAFO para el proyecto de cogeneración.

Fuente: Elaboración propia.

8. Conclusiones

- La actividad de la planta de cogeneración utiliza un recurso propio de la zona y genera actividad económica y empleo en los sectores tradicionales, que en los últimos años, han sido abandonados.
- La biomasa residual agrícola se presenta en la comarca del Segrià como un recurso abundante y accesible energéticamente. Se disponen de 91.263 Tm de biomasa residual agrícola que podrían ser valorizadas en aprovechamientos energéticos. Por lo tanto, la disponibilidad de biomasa para la planta, que consume 20.006 Tm anuales en un régimen de producción intensivo, está totalmente garantizada. Se debe garantizar el suministro de biomasa mediante la elaboración de contratos de garantía con diferentes cooperativas agrícolas de la comarca.
- La ubicación estratégica de la planta de cogeneración en el municipio de Albatàrrec permite reducir los costes logísticos y facilita la incorporación de energía térmica y eléctrica en el mercado energético.
- El rendimiento del proceso de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual agrícola es muy elevado, de un 58,3%. El rendimiento de la gasificación a gran escala es del 74,5%, mucho mayor al rendimiento obtenido con pequeños gasificadores que se sitúan entre el 30-50 %.

- A partir del análisis de los escenarios estudiados se observa que la viabilidad del proyecto sólo puede ser aceptada para aquellos escenarios que tienen en cuenta un gran respaldo del estado mediante retribución a la generación. Los mejores resultados se obtienen para los escenarios del antiguo RD 661/2007 .Con el nuevo decreto RD 414/2014 la rentabilidad de los escenarios se reduce considerablemente y solo son viables aquellos escenarios que consideran la venta de energía térmica producida por la actividad de la planta de cogeneración. En conclusión se puede decir que la entrada en vigor de la nueva legislación representa un freno para el desarrollo del sector energético de la biomasa en nuestro país.
- Los resultados obtenidos para el coste logístico de la biomasa residual agrícola (24 €/Tm) muestran que puede ser mucho más competitiva que los precios de mercado de suministro con biomasa forestal (82 €/Tm). Por lo tanto, el aprovechamiento local de los residuos generados por el sector agrícola representa una reducción del coste de la biomasa como materia prima.
- El coste de extracción y recolección de la biomasa residual agrícola representa una parte importante del coste del recurso. En este estudio se considera que estos costes son asumidos por el agricultor, puesto que deben realizar la poda de los cultivos para mejorar su producción. No obstante, se debe tener en cuenta una tasa de devolución para fomentar que los agricultores participen en el proyecto de forma activa. El escenario ganador puede asumir el hasta el 31% de los costes del agricultor (37,2-24,2 = 13 €/Tm).
- La evolución del mercado indica que actualmente la planta de gasificación presenta unos costes de generación eléctrica competitivos con otras energías renovables. Por lo tanto, aunque la inversión inicial sea elevada, se considera que la instalación de la planta de cogeneración es rentable y que el periodo de amortización es razonable.
- Los resultados obtenidos en este proyecto se fundamentan en experiencias de tratamiento de biomasa realizadas para cultivos leñosos agrícolas. No obstante, y debido a la variabilidad de las propiedades de la biomasa, se debe plantear la realización de una prueba piloto experimental para determinar con mayor exactitud los parámetros que puedan determinar la viabilidad económica y técnica del proyecto en la comarca del Segrià.
- En general, para que este tipo de proyectos sean viables se requiere la colaboración de las administraciones para que fomenten el sector mediante ayudas a este tipo de instalaciones. También es necesario fomentar una consciencia social respecto a los beneficios ambientales del uso de la biomasa tanto para el territorio como para la reducción de los impactos generados por el sistema energético actual. Por último, juegan un papel fundamental los inversores, que deben empezar a considerar este mercado como una realidad con buenas expectativas de futuro.

Abstract

The present study aims to carry out an analysis of technical and economic feasibility for the implementation of a cogeneration power plant based on agricultural biomass gasification in Segrià, Catalonia. This technology allows reevaluating agricultural residues providing a synthetic gas suitable to generate electricity and heat. The activity of the cogeneration plant also contributes to improve the sustainability of the territory while employment and economic activity is created.

An analysis of biomass availability in the region is performed in order to determine technical feasibility and evaluate the capacity of the territory to supply the nominal consumption of the cogeneration power plant.

To determine the economic viability of the project some economic indicators have been studied in order to accept or reject the project considering the costs and benefits generated by the plant during its lifetime. The logistic of the process has been developed in order to evaluate the costs associated with the transportation and treatment of agricultural residual biomass unto the power plant. Other associated costs have been determined by specifications provided by the technology company. In order to know the income of the activity through the sale of its energy production this projects evaluates the energy balance of the process. Then, by applying the RD 413/2014, which regulates the remuneration for renewable energy in Spain, this project considers the feasibility of different future scenarios for the power plant.

The results of the study show that the region of Segrià has biomass enough to develop this activity in its territory. Economic viability results highlight the brake to renewables which has imposed new RD 413/2014 through limits on economic retributions. However, this study finds that through intensive plant production a fully competitive cost compared with other renewables is easily achieved with this biomass gasification technology.

Referencias bibliográficas

Documentos académicos

AMENGUAL ROMANÍ, Carmen; TRIGUERO GIL, Álvaro. "Implantación central de biomasa forestal y aprovechamiento de las masas forestales". Director: Marta Batlle Beltrán. Barcelona: Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, 2013. Ingeniería en organización industrial.

BRETAÑA DEL CAMPO, Estela. "Estudio técnico-económico de la instalación de una planta de biomasa para generación eléctrica". Director: Francisco Gonzáles Hierro. Madrid: Universidad Pontificia de Madrid, 2007. Escuela técnica superior de ingeniería. Ingeniería en organización industrial.

CANÓ POL, Joan. "Balanz energètic de dos sistemes d'aprofitament de la biomasa forestal per produir energia a Osona: planta de cogeneració versus calderes descentralitzades". Director: Dr. Josep Maria Chimenos Ribera. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2011. Máster Interuniversitario UB-UPC de Ingeniería en Energía.

DEL VAL GENTO, Verónica; ANTOLÍN GIRALDO, Gregorio. "Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual". Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales. Valladolid, 2009.

LA CAL HERRERA, José Antonio. "Viabilidad de la integración de una planta de gasificación de biomasa". Directores: Dr. Francisco Jurado Melguizo, Dr. Blas Ogáyar Fernandez. Universidad de Jaén, 2013. Escuela Politécnica Superior de Jaén. Departamento de ingeniería eléctrica.

MARTÍNEZ NUÑEZ, Roberto. "Ingeniería básica de una planta de cogeneración con biomasa". Universidad de Cantabria, 2012. Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.

MOLLÓ MANONELLES, Oriol. "Estudi de la viabilitat tècnica i econòmica de gasificació de residus de serraria per a la generació elèctrica i tèrmica". Director: Joan Ignasi Rosell Urrutia. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Univeritat de Lleida, 2009.

PULIDO VENDRELL, Rosa. "Designing of gasification power plant for remote area in Thailand". Directors: Daniel Garcia Almiñana; Somcgai Jijitsawat. Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrasa. Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.

TORRES FARRÀS, Jordi. "Pla d'empresa d'una planta de cogeneració per biomassa". Director: Marc Bernadich Marquez. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2012.

Documentos de archivo e institucionales

Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM). "Biomun, bioenergía para municipios. Nuevos emprendimientos en el sector bioenergético: Los centros Logísticos de Biomasa". Valladolid, 2013.

Consortio OPET SUR ESPAÑA. Area de biomasa de SODEAN, S.A. "Potencial y aprovechamiento de la biomasa del olivar en Andalucía". Sevilla, 2003.

DECC; NNFFC. Review of technologies for gasification of biomass and wastes". York, 2007.

Departament d'Indústria, Comerç i Turisme de la Generalitat de Catalunya. "Informe final aprofitament i pla d'actuació en residus de cultius llenyosos". Pla de biomassa de Catalunya 2001. Autores: Urbina, Dalmases. Lleida, 2001.

Dept. de la Presidència, Dept. d'Economia i Coneixement, Dept. de Territori i Sostenibilitat, Dept. d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural, Dept. d'Empresa i Ocupació. Grup de treball de biomassa de la Generalitat de Catalunya. "Estratègia per promoure l'aprofitament energètic de la biomassa forestal i agrícola". Barcelona, 2014.

Direcció General del Medi Natural, Departament de Medi Ambient i Habitatge. "Guia per a la redacció d'estudis d'avaluació de la disponibilitat de biomassa". Barcelona, 2011.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). "Biomasa: Gasificación". Elaborado por BESEL, S.A. Madrid, 2007.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). "Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020". Madrid, 2011.

Plataforma de Enxeñaria da Madeira estrutural (PEMADE); Universidad de Santiago de Compostela "Proyecto experimental de modelos logísticos de parques de biomasa. Estructuras de madera". Santiago de Compostela, 2013.

Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa. "Generación de electricidad a través de la valorización de biomasa". Autores: DE GREGORIO, Margarita. Directora de APPA Biomasa, entidad gestora de la Unión por la Biomasa y Coordinadora de BIOPLAT.

Renowables East. "Commercial Assessment. Advanced Conversion Technology (Gasification) for biomass projects". Norwich, 2007.

ANEXO I: METODOLOGIA UTILIZADA PARA EL CÁLCULO DE LOS COSTES LOGISTICOS

A partir del plan logístico elaborado se han calculado los costes asociados a la distribución y transporte de la biomasa.

Para analizar los costes de este escenario logístico se han realizado una serie de suposiciones que configuran el modelo desarrollado. Estas suposiciones son las siguientes:

- Se supone que se consigue recolectar el 70 % de la biomasa disponible en cada municipio seleccionado.
- La distribución de los CLB y de la planta de gasificación considerados responde a los criterios anteriormente seleccionados en el apartado 4 del presente estudio.
- El astillado de la biomasa se realiza siempre en seco debido a la capacidad de almacenamiento que proporcionan los CLB.

Metodología para el cálculo de los costes de distribución hasta los CLB

Una vez analizada la disponibilidad de los recursos agrícolas se calculan los costes asociados a su distribución hacia los CLB, dónde la materia prima será procesada. El modelo parte de los residuos agrícolas apilados en forma de rama en las parcelas.

Existen diversos procesos implicados en la gestión de los residuos desde el lugar de recogida hasta su almacenamiento y procesado en los CLB. Se distinguen los siguientes costes asociados:

1. Coste del transporte en rama hasta los CLB

Se calculan a partir del tiempo necesario para transportar y cargar /descargar la biomasa disponible en forma de rama. Este tiempo se obtiene a partir de la capacidad de transporte de los camiones. A partir de esta capacidad de transporte se puede calcular el número de viajes necesarios para transportar la biomasa hacia los CLB. Si tenemos en cuenta la velocidad y distancia determinada para cada municipio, se puede obtener el tiempo necesario para transportar la biomasa al CLB. Se definen los siguientes parámetros:

- Densidad aparente de la biomasa en rama: Se considera constante para todas las especies leñosas estudiadas. La densidad aparente es de 0,4 toneladas/map.
- Capacidad de transporte del camión¹: Se considera de 8 m³ aparentes.
- Tiempo de carga/descarga en rama² = 15,07 Tm/h
- Velocidad del transporte: Se considera de 52 km/h.
- Distancias de transporte: Dependen del municipio que suministra la biomasa a cada CLB. Se resumen en la tabla 1.

¹ Capacidad estándar de un remolque agrícola.

² Obtenido del PER 2011-2020.

Municipio origen	Municipio Destino	CLB	Capacidad de almacenamiento (toneladas)	Distancia
Alpicat	Alpicat	CLB 1	12.796	5
Lleida				10
Soses	Soses	CLB 2	8.410	5
Torres del Segre				6
Alcoletge	Els Alamús	CLB 3	4.295	7
Els Alamús				5
Corbins				14,5
La Granja d'Escarp	Torrebesses	CLB 4	4.008	35
Llardecans				9
Sarroca de Lleida				7
Torrebesses				5

Tabla 1. Resumen de las distancias de transporte desde los municipios suministradores de biomasa a los CLB situado en el municipio de Alcarràs.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para obtener el coste de transporte hacia los CLB se aplica un precio horario de alquiler para este servicio. El coste horario considerado para el alquiler del vehículo es de 37,84 €/h³.

2. Costes del astillado en los CLB

Los costes de astillado se calculan a partir del tiempo necesario para astillar la biomasa requerida. Este tiempo se obtiene mediante el rendimiento de la maquina astilladora. El rendimiento de la astilladora⁴ es de 7,5 toneladas/hora para acopios inferiores a 100 toneladas y de 13 toneladas/hora para acopios superiores a las 100 toneladas.

Finalmente, para obtener el coste de astillado, se aplica un precio de alquiler de la maquinaria. En este caso el precio de alquiler de la maquina astilladora⁵ es de 150 €/hora para acopios superiores a las 100 toneladas.

Metodología para el cálculo de los costes de transporte de los CLB hasta la planta de gasificación

Se tienen en cuenta los mismos parámetros usados para el transporte de la biomasa desde los campos hacia los CLB. No obstante, estos parámetros varían sus valores en función de las características de la biomasa. Se definen los siguientes parámetros:

- Densidad aparente de la biomasa en estado seca y astillada: Se distingue entre las diferentes especies leñosas estudiadas. Para determinar los costes asociados a su transporte se toma la densidad aparente⁶ media de los cultivos estudiados, en este caso 0,2052 Tm/map.

³ Coste horario subministrado por la empresa transportista de biomasa APENSOL.

⁴ Rendimiento facilitado por la empresa de aplicaciones forestales Les Atxes.

⁵ Precio de alquiler facilitado por la empresa de aplicaciones forestales Les Atxes.

⁶ Según el informe *Pla de biomassa de Catalunya 2001*.

Densidad aparente de la biomasa leñosa (Tm/map)	
Astilla de especies frutales con y sin cáscara	0,1878
Astilla de viñedo y olivar	0,2226
	0.2052

Tabla 2. Densidad aparente de la biomasa residual agrícola leñosa.

Fuente: Elaboración propia.

- Capacidad de transporte del camión: Se considera de 8 m³ aparentes.
- Tiempo de carga/descarga en astilla⁷: Es mucho más bajo que el tiempo de carga y descarga de la rama ya que se carga directamente a los camiones mediante un tubo succionador. En cambio, en rama se necesita una camión con pinza. El rendimiento de carga y descarga es de 53.85 Tm/hora.
- Velocidad del transporte: Se considera de 52 km/h.
- Distancias de transporte: Dependen de la localización del CLB. Las distancias entre el CLB y la planta de cogeneración por gasificación se muestran en la tabla 3.

Centro logístico de biomasa	Distancia a la planta de gasificación (km)
CLB 1	5
CLB 2	7
CLB 3	5
CLB 4	14,5

Tabla X. Distancia de los CLB a la planta de gasificación.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra el esquema metodológico empleado para determinar los costes de astillado y transporte de la biomasa para el escenario logístico establecido en este estudio:

⁷ Datos obtenidos del PER 2011-2020.

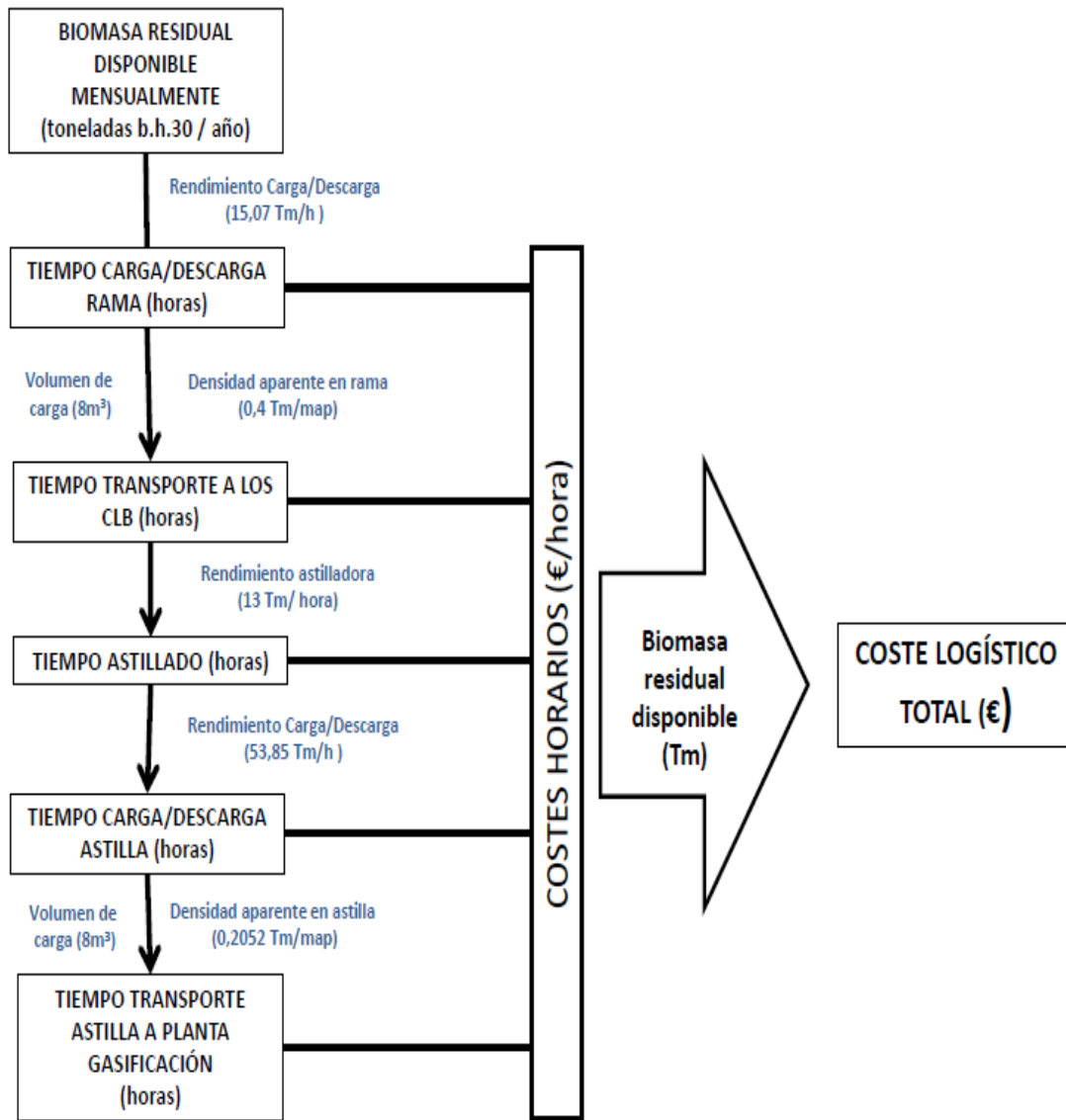


Figura 1. Esquema de la metodología utilizada para el cálculo de los costes logísticos.

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO II: DOCUMENTACIÓN RELATIVA A LA RETRIBUCIÓN ESPAÑOLA A LA GENERACIÓN EN
ENERGIAS RENOVABLES**



I. DISPOSICIONES GENERALES

MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO

6123 *Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.*

Grupo	Subgrupo	Combustible	Potencia	Tecnología/ Combustible	Año de autorización de explotación definitiva	Código Instalación Tipo
b.8	-	-	-	-	2014	IT-01201
b.8	-	-	-	-	2015	IT-01202
b.8	-	-	-	-	2016	IT-01203
c.2	-	licores negros	-	licores negros	Hasta 2006	IT-01256
c.2	-	licores negros	-	licores negros	2006 en adelante	IT-01257
b.8	-	-	-	-	1996	IT-01183
b.8	-	-	-	-	1997	IT-01184
b.8	-	-	-	-	1998	IT-01185

Código de Identificación	Vida Útil Regulatoria (años)	Coeficiente de ajuste $C_{1,a}$ (*)	Retribución a la Inversión Rinv 2014-2016 (€/MW)	Retribución a la Operación Ro (€/MWh) 2014	Retribución a la Operación extendida (€/MWh) 2014	Horas de funcionamiento máximo para la percepción de Ro (h)	Nº Horas equivalentes de funcionamiento mínimo Nh (*) Anual 2014-2016 (h)	Umbral de funcionamiento Uf (*) Anual 2014-2016 (h)	Porcentajes aplicables a Nh y Uf anuales, para el cálculo del nº de horas equivalentes de funcionamiento mínimo y del umbral de funcionamiento de los periodos de 3, 6 y 9 meses (%)		
									3 meses	6 meses	9 meses
IT-01195	25	1,000	145.691	33,688	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01196	25	1,000	169.044	33,958	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01197	25	1,000	193.377	34,240	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01198	25	1,000	217.308	34,517	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01199	25	1,000	240.572	29,020	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01200	25	1,000	259.616	29,241	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01201	25	1,000	272.596	29,241	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01202	25	1,000	275.352	0,000	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01203	25	1,000	278.109	0,000	-	6.500	3.000	1.000	10%	20%	30%
IT-01207	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01208	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01209	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01210	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01211	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01212	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01213	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01214	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01215	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01216	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01217	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01218	25	0,000	0	0,000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%
IT-01219	25	0.073	34.334	0.000	-	4.895	2.200	800	10%	20%	30%

VALOR ACTUAL NETO (VAN = - coste total inversión + $\Sigma(\text{Cash-flow}/(1 + i))$)

	VAN	TIR	IRf
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 0 €/Tm	0 25.842.486	23	1,5
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 10 €/Tm	10 23.819.262	22	1,4
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 20 €/Tm	20 21.796.038	20	1,3
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 30 €/Tm	30 19.772.815	19	1,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 40 €/Tm	40 17.749.591	18	1,0
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 50 €/Tm	50 15.726.367	17	0,9
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 60 €/Tm	60 13.703.143	15	0,8
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 70 €/Tm	70 11.679.920	14	0,7

VALOR ACTUAL NETO (VAN = - coste total inversión + $\Sigma(\text{Cash-flow}/(1 + i))$)

	VAN	TIR	IRf
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 0 €/Tm	0	20.276.332	19 1,2
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 10 €/Tm	10	18.253.108	18 1,1
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 20 €/Tm	20	16.229.884	17 0,9
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 30 €/Tm	30	14.206.661	16 0,8
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 40 €/Tm	40	12.183.437	14 0,7
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 50 €/Tm	50	10.160.213	13 0,6
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 60 €/Tm	60	8.136.990	11 0,5
VAN (15 años) de la planta si $y = 5\%$ y el precio de la biomasa es de 70 €/Tm	70	6.113.766	10 0,4

60		3.314.976	3.330.355	3.361.113	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838	-1.280.838
70		3.120.054	3.135.433	3.166.191	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760	-1.475.760
CASH-FLOW DE LA PLANTA (= BDI + AMORTIZACIÓN)																
0	17.283.650	5.636.752	5.652.131	5.682.889	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938	1.040.938
10	17.283.650	5.441.830	5.457.209	5.487.967	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016	846.016
20	17.283.650	5.246.908	5.262.287	5.293.045	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094	651.094
30	17.283.650	5.051.986	5.067.365	5.098.123	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172	456.172
40	17.283.650	4.857.064	4.872.443	4.903.201	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250	261.250
50	17.283.650	4.662.142	4.677.521	4.708.279	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328	66.328
60	17.283.650	4.467.220	4.482.599	4.513.357	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595	-128.595
70	17.283.650	4.272.298	4.287.677	4.318.435	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517	-323.517

VALOR ACTUAL NETO (VAN = - coste total inversión + $\Sigma(\text{Cash-flow}/(1 + i))$)

	VAN	TIR	IRf
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 0 €/Tm	0 6.090.271	14	0,4
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 10 €/Tm	10 4.067.048	11	0,2
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 20 €/Tm	20 2.043.824	8	0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 30 €/Tm	30 20.600	5	0,0
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 40 €/Tm	40 -2.002.623	1	-0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 50 €/Tm	50 -4.025.847	-2	-0,2
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 60 €/Tm	60 -6.049.071	-5	-0,3
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 70 €/Tm	70 -8.072.295	-8	-0,5

VALOR ACTUAL NETO (VAN = - coste total inversión + $\Sigma(\text{Cash-flow}/(1 + i))$)

	VAN	TIR	IRf
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 0 €/Tm	0	1.065.271	7 0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 10 €/Tm	10	-957.952	3 -0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 20 €/Tm	20	-2.981.176	-2 -0,2
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 30 €/Tm	30	-5.004.400	-4 -0,3
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 40 €/Tm	40	-7.027.623	-8 -0,4
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 50 €/Tm	50	-9.050.847	-11 -0,5
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 60 €/Tm	60	-11.074.071	-15 -0,6
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 70 €/Tm	70	-13.097.295	-19 -0,8

VALOR ACTUAL NETO (VAN = - coste total inversión + $\Sigma(\text{Cash-flow}/(1 + i))$)

			VAN	TIR	IRf
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 0 €/Tm	20.276.332	0	7.522.447	15	0,4
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 10 €/Tm	18.253.108	10	5.499.223	13	0,3
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 20 €/Tm	16.229.884	20	3.475.999	10	0,2
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 30 €/Tm	14.206.661	30	1.452.776	7	0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 40 €/Tm	12.183.437	40	-570.448	4	0,0
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 50 €/Tm	10.160.213	50	-2.593.672	2	-0,2
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 60 €/Tm	8.136.990	60	-4.616.895	-1	-0,3
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 70 €/Tm	6.113.766	70	-6.640.119	-4	-0,4

VALOR ACTUAL NETO (VAN = - coste total inversión + $\Sigma(\text{Cash-flow}/(1 + i))$)

		VAN	TIR	IRf
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 0 €/Tm	0	1.956.293	8	0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 10 €/Tm	10	-66.931	5	0,0
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 20 €/Tm	20	-2.090.155	1	-0,1
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 30 €/Tm	30	-4.113.378	-2	-0,2
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 40 €/Tm	40	-6.136.602	-5	-0,4
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 50 €/Tm	50	-8.159.826	-8	-0,5
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 60 €/Tm	60	-10.183.049	-12	-0,6
VAN (15 años) de la planta si y = 5% y el precio de la biomasa es de 70 €/Tm	70	-12.206.273	-15	0,7

