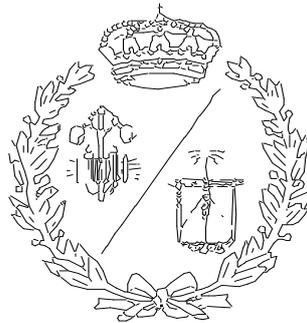


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**ESTUDIO TÉCNICO DEL APROVECHAMIENTO  
ENERGÉTICO DE LA BIOMASA FORESTAL  
MEDIANTE LA EVALUACIÓN DEL  
RENDIMIENTO DE LA PLANTA**

**(Technical Study of Energy Utilization from Forest  
Biomass through Plant Performance Evaluation)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Guillermo López Castellanos

Junio - 2025

TÍTULO DEL PROYECTO	<b>ESTUDIO TÉCNICO DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA FORESTAL MEDIANTE LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA PLANTA</b>		
AUTOR	<b>GUILLERMO LÓPEZ CASTELLANOS</b>		
DIRECTORA	<b>TAMARA LLANO ASTUY</b>		
TITULACIÓN	<i>GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES</i>	FECHA	
		20/06/2025	

### **PALABRAS CLAVE**

Biomasa forestal; Energía renovable; Ciclo Rankine; Planta de 2 MW; Escalado industrial; Sostenibilidad energética; Análisis técnico-económico.

### **Resumen**

Este Trabajo Fin de Grado estudia la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento energético de la biomasa forestal en Cantabria. Tomando como referencia el análisis técnico y económico de la planta de Biomasa de Cantabria (10 MW), se modela el funcionamiento de una instalación de generación eléctrica mediante ciclo Rankine con caldera de lecho fluido burbujeante. Posteriormente, se aplica un escalado para diseñar una planta de menor capacidad (2 MW), denominada BioNansa, adaptada a las características del medio rural. El trabajo incluye una estimación de costes basada en el método exponencial (factor de los seis décimos) y una evaluación del rendimiento global de la planta. Se concluye que aunque la rentabilidad de plantas pequeñas es limitada sin ayudas públicas, este modelo puede ser utilizado en zonas rurales con abundantes recursos forestales, favoreciendo la sostenibilidad de los montes, la economía circular de la zona y el desarrollo local.

### **Abstract**

This Final Degree Project examines the technical and economic feasibility of forest biomass energy utilization in Cantabria. Based on the technical and economic analysis of the 10 MW Biomasa de Cantabria plant, a model is developed for an electricity generation facility using a Rankine cycle with a bubbling fluidized bed boiler. A scaling process is then applied to design a

smaller-capacity plant (2 MW), named BioNansa, tailored to the characteristics of a rural environment. The study includes a cost estimation using the exponential method (six-tenths rule) and an assessment of the plant's overall performance. The results suggest that, although small-scale plants show limited profitability without public support, this model can be implemented in rural areas with abundant forest resources, contributing to forest sustainability, local circular economy, and rural development.

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el contexto actual de transición energética, las energías renovables se presentan como una alternativa viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental. Cantabria, pese a disponer de una importante superficie forestal y de recursos renovables, cuenta con una única planta de generación de energía eléctrica mediante biomasa. Este hecho plantea la necesidad de analizar por qué no se ha desarrollado una red de instalaciones similares, considerando tanto los aspectos técnicos como los económicos y sociales. Asimismo, se pretende estudiar la posibilidad de replicar este modelo a escala menor en otras zonas rurales de la región, aprovechando el excedente de residuos forestales y fomentando así el desarrollo local.

### **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

A partir del análisis detallado de la planta de Biomasa Cantabria, se ha definido un modelo de funcionamiento continuo basado en la transformación térmica de residuos forestales mediante una caldera de lecho fluido burbujeante, generando vapor sobrecalentado que acciona una turbina de condensación para la producción de energía eléctrica. Mediante un escalado adaptado a una nueva localización y potencia reducida, se ha desarrollado una estimación de costes que contempla inversión inicial, operación y mantenimiento. El estudio ha permitido identificar los principales factores que condicionan la viabilidad económica: coste del combustible, consumo de agua y electricidad, eficiencia térmica y potencial de autoconsumo eléctrico.

Se concluye que, con el apoyo de medidas institucionales (ayudas o subvenciones), este modelo puede ser replicable en el ámbito rural, contribuyendo al aprovechamiento sostenible del monte y a la reducción del riesgo de incendios.

### **CONCLUSIONES / PRESUPUESTO**

- El proceso de acondicionamiento de biomasa y su conversión en energía eléctrica mediante ciclo Rankine es eficaz y adaptable a distintas escalas.
- El análisis económico evidencia la necesidad de apoyo institucional para que plantas de menor tamaño sean viables.
- La replicabilidad del modelo depende de la disponibilidad local de materia prima, del coste logístico y del marco normativo.
- La implantación de plantas descentralizadas de biomasa puede suponer una oportunidad para dinamizar el medio rural y reducir el abandono forestal.

### **BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE**

Chilton, C. (Abril de 1955). Six Tenths Factor. *Chemical Engineering*, 112-114.

MITECO. (2020). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN:	2
1.1.	ANTECEDENTES	2
1.2.	MIX ENERGÉTICO Y SITUACIÓN ENERGÉTICA EN CANTABRIA	6
1.3.	INSTALACIÓN DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA UBICADA EN CANTABRIA	7
1.4.	OBJETIVO	9
2.	METODOLOGÍA	10
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO EN UNA PLANTA DE 10MW	10
2.1.1.	Consumos	14
2.1.2.	Personal	16
2.1.3.	Mantenimiento	17
2.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE UNA PLANTA DE 2MW	21
2.2.1.	Escalado	21
2.2.2.	Nueva planta: BioNansa	22
3.	RESULTADOS	31
3.1.	EMPLAZAMIENTO Y TAMAÑO DE LA NUEVA PLANTA	31
3.2.	COSTES SEGÚN LA METODOLOGÍA	31
3.2.1.	Gastos de explotación de la planta BioNansa	33
3.2.2.	BioNansa	37
3.2.3.	Comprobación de los parámetros con Biomasa de Cantabria	38
3.2.4.	Discusión comparativa: análisis técnico-económico frente a otros casos	40
4.	CONCLUSIONES	44
5.	BIBLIOGRAFÍA	46
6.	ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	50

# 1. INTRODUCCIÓN:

## 1.1. ANTECEDENTES

El cambio climático provocado en gran parte por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera están causando daños graves en el entorno natural, de manera que vamos a dejar un mundo peor a nuestros sucesores del que recibimos de nuestros antecesores. Y no debemos olvidar que, como dice un proverbio indio:

*“No heredamos la tierra de nuestros ancestros, la tomamos prestada de nuestros hijos.”*

Ciertamente, son los propios procesos industriales y el transporte, los causantes de una gran parte de las emisiones GEI. Pero, al mismo tiempo, es el sector industrial el que ofrece distintas soluciones para generar energía renovable mediante procesos productivos basados en la sostenibilidad, sustituyendo los combustibles fósiles por recursos naturales renovables que no comprometan las necesidades de las generaciones futuras, reduciendo emisiones directas GEI. Son sistemas de generación de energías renovables (EERR): la hidroeléctrica, eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, geotermia, la biomasa, el biogás y los biocarburantes y la energía mareomotriz (MITECO, 2005).

Es un incentivo explorar las posibilidades de construir unas instalaciones industriales relacionadas con este tema de las energías renovables, que pudieran, de alguna forma, ser implantadas a pequeña o mediana escala en el medio rural de Cantabria, una región que está en la actualidad casi a la cola de las regiones españolas en la generación de EERR, como representa la imagen siguiente (Figura 1), que muestra el porcentaje de fuentes renovables dentro del mix energético de cada comunidad.

## Ratio Potencia renovable/potencia por CC.AA. (%) y Potencia renovable (MW)

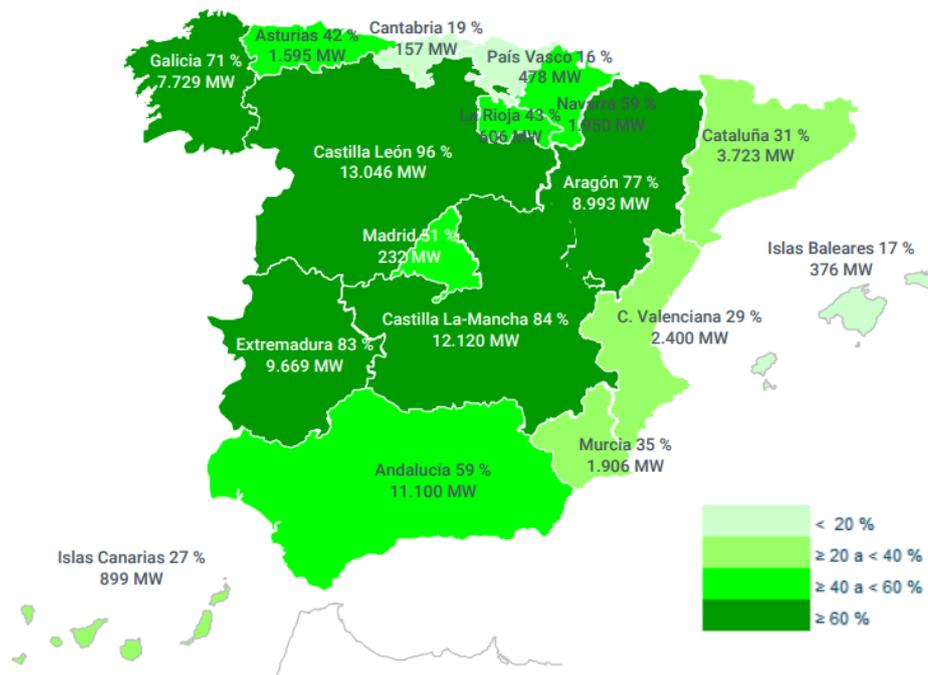


Figura 1: Generación con fuentes renovables por CC.AA. Fuente: Red Eléctrica, marzo 2023

Una primera opción contemplada fue el estudio del autoabastecimiento de energía en las explotaciones ganaderas, por medio del metano obtenido de la digestión anaeróbica de restos agrícolas y, sobre todo del estiércol de los animales.

Pero la existencia de una planta como la de BIOMASA DE CANTABRIA, en la que la energía se genera a partir de restos forestales, y el hecho de que se facilitó el acceso a sus instalaciones y a sus datos de explotación gracias a unas prácticas no curriculares durante 2 meses en la planta, era una oportunidad que decantó la balanza por esta segunda opción, la de poder conocer y aprovechar la experiencia real de una empresa para poder plantear más instalaciones de este tipo a menor escala en otras zonas rurales de la región Cántabra.

La planta, se ubica en Reocín (Cantabria) y a pleno funcionamiento, con las mayores exigencias, tanto a nivel de calidad como de respeto por el medio ambiente, encajaba perfectamente como modelo para este TFG, que contempla unas instalaciones de tipo industrial como solución relativamente cercana y accesible a un tipo de energía renovable. Resulta una opción muy interesante para el entorno rural de Cantabria, una comunidad en la que más del 68 % de su superficie está ocupada por terrenos cuyo uso

es forestal, con un total de 363.793 hectáreas. (CONSEJERÍA DE DESARROLLO RURAL, GANADERÍA, PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2022)

Se trata, además, de una energía renovable, que, a diferencia de la solar o la eólica, es almacenable y que, es considerada una energía regenerativa, en el sentido de que contribuye no solo a reducir el impacto ambiental, reutilizando, y por tanto reduciendo residuos, que, en este caso son de origen forestal, sino que contribuye a restaurar y mejorar los ecosistemas que le abastecen de la materia prima que emplea. Su explotación implica la limpieza de materia orgánica de origen forestal, lo que es clave en la prevención de incendios y también para poder disfrutar de esos bosques, con la posibilidad que ello supone de creación de otros modelos de negocio.

Por otra parte, una planta de este tipo genera también beneficios de tipo social, pues su explotación crea empleo en el entorno rural cercano, tanto directo como indirecto que, en su mayor parte, no necesita de una cualificación técnica especial, contribuyendo así a frenar el éxodo rural.

Las plantas de biomasa se pueden clasificar según el tipo de biomasa utilizada y el proceso de conversión (Motola, y otros, 2022). Algunas de las categorías más comunes son:

- Plantas de gasificación de biomasa: La biomasa se convierte en un gas combustible mediante un proceso de gasificación. Este gas se utiliza para generar electricidad o calor. Las plantas de gasificación tienen la ventaja de generar menores emisiones contaminantes, y el gas producido puede ser más eficiente para algunos procesos industriales.
- Plantas de pirólisis de biomasa: En este tipo de plantas, la biomasa se somete a un proceso de pirólisis (descomposición por calor sin oxígeno) para obtener biocombustibles líquidos, como el bioaceite, que luego se puede utilizar en aplicaciones industriales o para generar electricidad.
- Plantas de digestión anaeróbica de biomasa: Utilizan residuos orgánicos (como estiércol o residuos alimentarios) para producir biogás a través de la digestión anaeróbica. Este gas, principalmente metano, se quema para generar energía.
- Plantas de combustión de biomasa: Estas plantas utilizan biomasa (madera, residuos agrícolas, etc.) para generar calor mediante combustión. El calor

producido se emplea para generar vapor que, a su vez, acciona turbinas para producir electricidad. Son la opción más común debido a su eficiencia y la simplicidad de su proceso.

Las plantas de combustión de biomasa para la generación de energía eléctrica o la generación combinada de electricidad y calor (cogeneración) pueden clasificarse según la tecnología de conversión y el tipo de biomasa utilizada (sólida en forma de astillas, líquida en forma de aceites o biocombustibles líquidos o biogás). Respecto a la tecnología de conversión de este tipo de plantas, éstas pueden ser de combustión directa con calderas de lecho fluido, de parrilla fija o de combustión en horno con caldera acuotubular (Blasiak, 2013); (Sivabalan, Suhaimi, Hamdan, & Jagadeesh, 2021), turbinas de vapor de agua de ciclo Rankine o de ciclos Rankine Orgánicos (en inglés *Organic Rankine Cycle*, ORC) las cuales utilizan fluidos orgánicos con menores puntos de ebullición que el agua, para generar electricidad con calor de baja temperatura y las cuales pueden ser ideales para cogeneración de baja potencia o para plantas pequeñas o con baja temperatura de proceso (Braumakis, Charalampidis, & Karellas, 2021); (Cavazzini & Dal Toso, 2015). Y finalmente las plantas de combustión que emplean tecnologías híbridas como las de cogeneración (en inglés, *Combined Heated and Power* CHP) y de trigeneración (en inglés, *Combined Cooling, Heat and Power*, CCHP) estas instalaciones generan electricidad y calor de forma simultánea (Salimi, Hosseinpour, Mansouri, & N. Borhani, 2022).

Este trabajo está basado en el estudio tecno-económico de dos instalaciones de ciclo combinado a partir de la combustión de biomasa sólida en caldera de lecho fluidizado con turbina de vapor de agua de ciclo Rankine.

## **1.2. MIX ENERGÉTICO Y SITUACIÓN ENERGÉTICA EN CANTABRIA**

El mix energético de España ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas, y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 establece las directrices para continuar este proceso hasta el año 2030. En línea con los objetivos de la Unión Europea, el PNIEC establece la meta de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 23 % para 2030 respecto a los niveles de 1990, y aumentar la participación de las EERR en el consumo final de energía hasta un 42 % para ese mismo año.

En particular, el sector eléctrico es crucial para lograr estos objetivos, y se espera que las energías renovables representen un 74 % del total de la electricidad generada en España en 2030. La energía eólica y la solar fotovoltaica serán los pilares de este crecimiento, con un fuerte aumento de su capacidad instalada. Sin embargo, el PNIEC también contempla la importancia de otras fuentes renovables como la biomasa, que se presenta como una opción clave para la generación térmica y la producción de electricidad a partir de residuos agrícolas, forestales y otros materiales orgánicos. Esta fuente de energía tiene el potencial de contribuir significativamente a la descarbonización de la economía española, especialmente en regiones como Cantabria.

En Cantabria, la situación energética refleja una gran oportunidad para aprovechar el potencial de la biomasa. La región posee un 68% de su territorio dedicado a masas forestales (Gobierno de Cantabria, 2021), que generan una abundante oferta de biomasa. Sin embargo, la dependencia de fuentes de energía no renovables sigue siendo alta, y el aprovechamiento de recursos renovables, especialmente la biomasa, está por debajo de su capacidad potencial. A pesar de este panorama, la estrategia energética de Cantabria se alinea con los objetivos del PNIEC, promoviendo el desarrollo de proyectos de energías renovables y la inclusión de la biomasa en el mix energético regional como parte de la transición hacia una economía más sostenible.

El PNIEC 2021-2030 también subraya la importancia de las energías renovables locales para mejorar la seguridad energética y reducir la dependencia de fuentes externas. Para Cantabria, una de las claves de su desarrollo energético radica en el aprovechamiento

de los residuos forestales y agroindustriales para la generación de energía a través de plantas de biomasa. Este tipo de plantas pueden no solo contribuir a la descarbonización del sector energético, sino también generar empleo rural y fomentar la economía circular al utilizar recursos locales. (MITECO, Impacto económico, de empleo, social y sobre la salud pública del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, 2020) (MITECO, Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, 2020).

### **1.3. INSTALACIÓN DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA UBICADA EN CANTABRIA**

A continuación, para contextualizar este TFG se llevará a cabo una breve descripción de la empresa que sirvió como marco para la realización de este TFG. Será la empresa en la que se base el análisis tecno-económico propuesto en el Valle del Nansa.

La Compañía fue constituida en el año 2011, bajo el nombre de BIOMASA DE CANTABRIA S.L. Pertenece al Grupo de Empresas ARMANDO ALVAREZ, S.A. La empresa emplea como materia prima restos forestales de eucalipto procedentes de la tala de árboles destinados al proceso de producción de pasta papelera. Los restos de ramas, follaje, copas, corteza y demás restos leñosos se empaican para ser triturados y transportados a sus instalaciones.

Su recinto (véase Figura 2) comprende 18.708 m<sup>2</sup> y se ubica en el Parque Empresarial del Besaya, en Reocín. La superficie correspondiente a instalaciones es de 3.800 m<sup>2</sup>, y la edificación construida, incluyendo oficinas, es de 1.100 m<sup>2</sup>.



Figura 2: Localización geográfica e imagen aérea de Biomasa de Cantabria. Fuente: Biomasa de Cantabria.

La empresa se dedica, en exclusiva, a la generación de energía eléctrica mediante un **ciclo de Rankine** (caldera y turbina de vapor) que emplea biomasa como combustible, con el objetivo de producir energía eléctrica de la manera más eficiente y eficaz posible, en una planta diseñada para trabajar en un régimen continuo máximo.

La biomasa se quema en una caldera donde se generará vapor sobrecalentado, que impulsa una turbina, que aprovecha la energía gracias al rotor de la turbina, acoplada a un alternador que produce la energía eléctrica, cuyo fin es la venta distribuida a la red. El vapor se recircula por un aerocondensador y cierra el ciclo interno de agua, evitando pérdidas y aprovechando los recursos al máximo. A continuación, en la Figura 3, puede verse la distribución de las etapas principales de la planta.

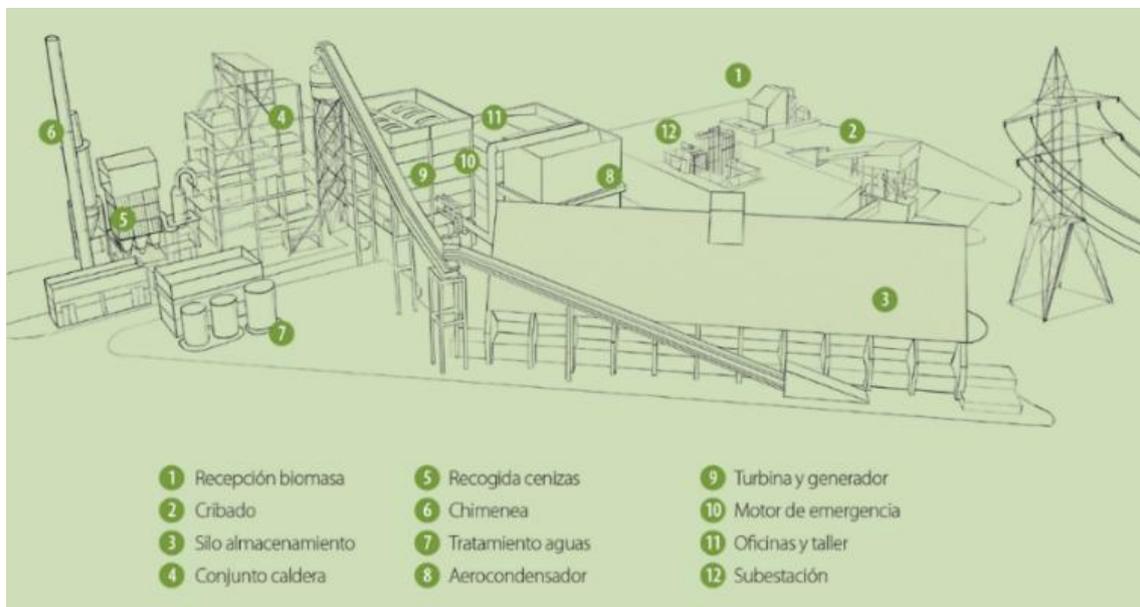


Figura 3: Distribución de las distintas partes en Biomasa de Cantabria. Fuente: Biomasa de Cantabria

## **1.4. OBJETIVO**

En este Trabajo Fin de Grado, se analizará el aprovechamiento energético de la biomasa forestal, mediante la evaluación del rendimiento de una planta de combustión de biomasa y generación de energía eléctrica. Para ello, se trabajará con datos reales de una empresa de combustión de biomasa ubicada en Cantabria.

En primer lugar, se llevará a cabo un estudio técnico de la planta de referencia de 10 MW de capacidad, no cuyo alcance tendrá en cuenta la obra civil e instalaciones, el equipamiento necesario o la legislación aplicable. En el estudio se analiza el proceso de generación de energía eléctrica teniendo en cuenta los materiales empleados, el personal necesario, las revisiones y mantenimiento periódico de este tipo de instalaciones, los controles de calidad y controles ambientales necesarios. Otro de los objetivos del TFG además del estudio técnico de la planta de referencia de 10 MW es su estudio económico que ha servido de base para evaluar la viabilidad de la puesta a punto de una instalación de este tipo, a menor escala en el Valle del Nansa en Cantabria.

Para analizar la viabilidad de la implantación de una planta a pequeña escala, en este TFG se ha tomado como referencia una planta existente y a pleno funcionamiento, la de Biomasa Cantabria en Reocín. El estudio abarca las etapas principales desde el acondicionamiento de la materia prima, su almacenamiento y las etapas de combustión y de generación de energía eléctrica. El conocimiento del proceso productivo permite elaborar un estudio económico preliminar para la construcción de una posible planta en una nueva ubicación, en la que, partiendo del volumen de restos forestales disponibles, se calculan sus dimensiones. Se parte de los datos reales de la planta existente, aplicando un escalado, con las correcciones necesarias que tengan en cuenta que, si se trata de una planta de menor tamaño que la que hemos tomado como referencia, los costes unitarios son mayores. Se aplicará tanto a la obra civil y las instalaciones, como a los materiales, el personal, etc. Con esto se identifican todas las variables a tener en cuenta en el estudio económico de la planta, susceptibles de una valoración más ajustada, en el futuro, si se necesita una mayor precisión. De la misma forma, para determinar, tanto los precios de coste de los materiales, la energía, el personal, etc. como el precio de venta de la electricidad generada, se utilizaron los proporcionados por la planta de Biomasa Cantabria.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO EN UNA PLANTA DE 10MW**

Se detallan a continuación las etapas necesarias para la conversión de la biomasa en energía eléctrica, mediante un proceso térmico de ciclo Rankine. Tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 4, de elaboración propia,

El primer paso es la recepción de camiones a la planta, que se depositan en una nave de recepción, encargada de distribuir uniformemente la carga en unas cintas que conducen hasta la torre de cribado, donde se acondiciona la biomasa. Allí, se produce un proceso de separación de las piedras que pudiera contener la biomasa recibida gracias a unas rampas, por donde caen debido a su propio peso. Tras esto, la biomasa pasa por un electroimán que elimina los posibles clavos y restos metálicos existentes, para finalmente entrar a un cribado de discos que separa los trozos más grandes de madera y enviarlos a la trituradora, empezando de nuevo este ciclo. Posteriormente, cuando ya se ha conseguido eliminar cualquier impureza que afecte al rendimiento de la biomasa, se transporta mediante unas cintas transportadoras al silo almacén, donde una cinta retráctil se encarga de repartirla por toda su superficie de forma equitativa. La biomasa se almacena aquí durante una semana aproximadamente, donde pierde algo de humedad de manera pasiva sin intervención de mecanismos de secado. Unos tornillos sin fin se encargan de recoger la biomasa situada al fondo del silo, que mediante cintas transportadoras se dirige hasta el silo de uso diario.

El silo de uso diario, que cuenta con capacidad para una media hora de funcionamiento a plena carga de manera autónoma, alimenta la caldera de biomasa. Paralelamente, se inyectan arenas feldespáticas en la cámara de combustión, otorgando unas condiciones óptimas de funcionamiento del lecho fluido burbujeante.

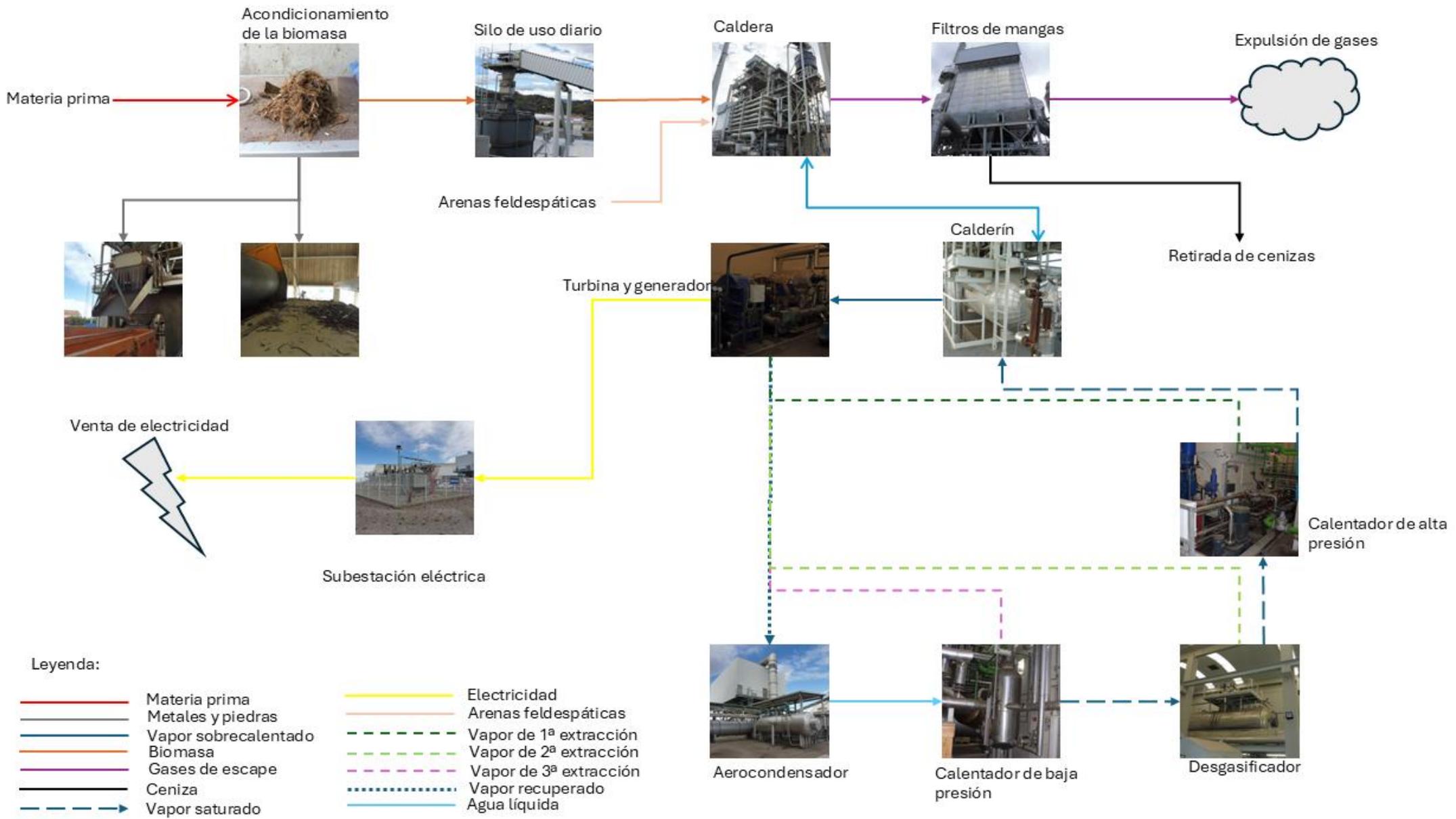


Figura 4: Diagrama de flujo del proceso productivo

La caldera es, junto a la turbina, el elemento más importante de la planta. Es una caldera tubular, vertical y de circulación natural, y como se ha mencionado previamente cuenta con un sistema de combustión burbujeante (en inglés, *Bubbling Fluidized Bed*, BFB). Dicha caldera es una de las mejores opciones a la hora de trabajar con materiales heterogéneos, como lo es la biomasa, manteniendo la mezcla en suspensión y favoreciendo la reacción completa a temperaturas cercanas a los 900° C y presión de 63 bar. Para ello, se inyecta aire desde la parte inferior de la caldera generando turbulencia para que las partículas queden en suspensión sin ser arrastradas fuera del hogar.

Como ya se ha comentado, la caldera trabaja en régimen continuo y no para en ningún momento, salvo en la parada anual para su revisión. En caso de producirse una avería, la caldera se embotellaría para conservar el calor y presión, y de esta manera conseguir que la puesta en marcha sea sencilla y con bajos consumos. Tiene una producción nominal de vapor de 45 toneladas de vapor, con un consumo medio de combustible de 14,5 t/h y una temperatura de gases en chimenea de 144° C.

Las cenizas que se produzcan en la combustión se retiran a través de una tolva para su traslado a un centro de gestión de residuos. Los gases de combustión atraviesan un sistema de filtros que elimina la mayor parte de partículas antes de dejarlos salir por la chimenea.

El agua de las paredes laterales de la caldera se calienta, generando burbujas que suben hasta el calderín, donde se produce la separación líquido-vapor del agua. La parte líquida se recircula hasta las paredes de la caldera de nuevo, mientras que el vapor saturado obtenido se recircula por el interior de la caldera a través de dos sobrecalentadores y una fase de atemperación, que arroja un chorro de vapor sobrecalentado a 460° C y 60 bar de presión.

A continuación, se representa en la Figura 5 un esquema detallado de la caldera, los silos, el calderín y el hogar, los cuales quedan integrados dentro de la caldera:

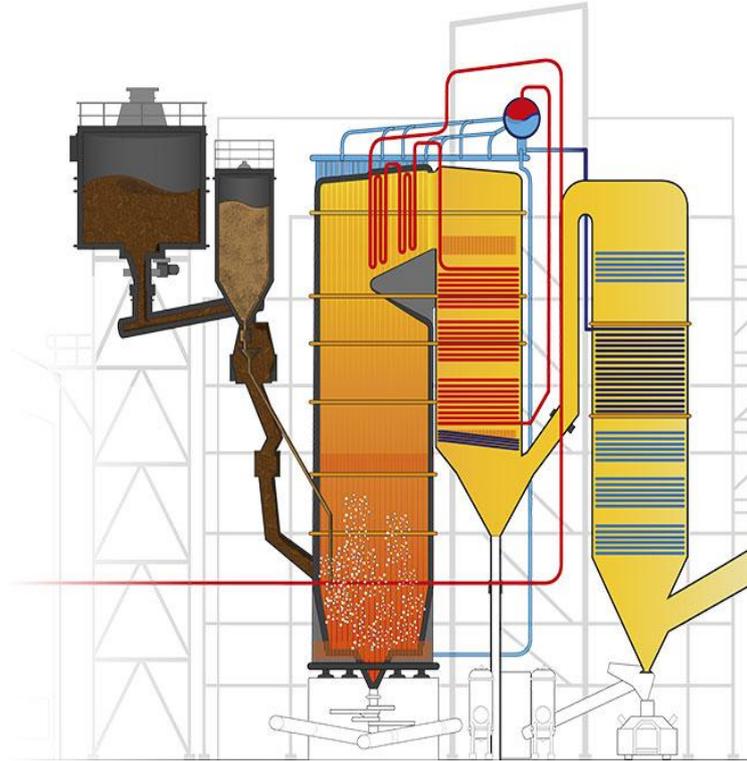


Figura 5: Esquema de la caldera. Fuente: Biomasa de Cantabria

Este vapor, tiene unas condiciones de temperatura y presión elevadas, es decir, una elevada entalpia que se envía por tuberías a la turbina de condensación acoplada a un generador eléctrico. En la turbina el vapor se expande, donde reduce su presión y temperatura. Esta diferencia de entalpias que sufre el vapor, a causa de su expansión, se dice que es la energía que la turbina ha podido transformar en movimiento rotacional en su eje (salto entálpico).

Durante la expansión del vapor se producen tres extracciones: la primera se destina al calentador de alta presión, la segunda va directamente al desgasificador y la tercera al calentador de baja presión. El vapor restante se conduce al aerocondensador, donde se enfría y condensa, permitiendo su reintegración en el ciclo mediante un sistema de bombeo y tratamiento. Todas las extracciones se aprovechan para transferir calor al vapor que circula por los distintos calentadores y desgasificador, mejorando la eficiencia del vapor antes de entrar de nuevo al calderín.

La caldera cuenta con sistemas de purga continua e intermedia para mantener el control de los sólidos presentes en el ciclo, evitando incrustaciones y daños a los equipos. Las

emisiones de gas son tratadas en los filtros de mangas antes de ser enviadas a la chimenea, de 35 metros de altura.

Finalmente, la energía generada en la turbina se eleva de 6,3 kV a 55kV en la subestación eléctrica de la planta, para finalmente verter la energía producida a la red de distribución.

### 2.1.1. Consumos

En todo ese proceso de conversión de la biomasa en energía se tienen los siguientes consumos:

#### Combustible

El consumo de biomasa en la caldera depende directamente del grado de humedad de ésta. En la Tabla 1 se detallan los diferentes consumos de combustible en función de la humedad:

*Tabla 1: Consumo de biomasa en función de la humedad. Fuente: Manual de operación (Biomasa de Cantabria), febrero 2013*

Humedad Biomasa	Consumo Biomasa
40%	12,5 ton/h
50%	18,1 ton/h
55%	19,4 ton/h

La caldera trabaja de forma continuada, noche y día, todo el año, salvo una parada anual programada para efectuar una revisión completa de las instalaciones. Ese silo con capacidad para siete días de trabajo cubre la posibilidad de falta de material por huelgas o por cualquier contingencia. **El consumo de biomasa en Biomasa Cantabria fue de 105.854,21 toneladas en 2023.**

## Consumo de arena



Figura 6: Entrada de arena a la caldera. Fuente: Elaboración propia, marzo 2025

Es necesario suministrar arena natural (feldespato) al hogar de la caldera para realizar el arranque de ésta y como lecho durante la operación normal (véase Figura 6).

**El consumo de arena en 2023 fue de 2.782,80 t.**



Figura 7: Silo de cenizas y recogida posterior. Fuente: Elaboración propia, marzo 2025

Las cenizas de la primera fase, las escorias y la arena del hogar son recogidas (véase Figura 7) por una empresa llamada "Turba de Cantabria" de manera gratuita y las gestionan ellos. Se utilizan para turba para jardines.

## Consumo de agua

El agua se usa en la planta, tanto para las labores de limpieza en la planta, como para los servicios sanitarios o para la torre de refrigeración. El agua bruta, procedente de la red de abastecimiento del Ayuntamiento de Reocín, es desmineralizada en una unidad de tratamiento dentro de la planta y así poder usarla en el ciclo agua-vapor. **El consumo total de agua en 2023 fue de 14.577,64 m<sup>3</sup>.**

## Consumo de gas

Existen dos puntos de consumo de gas natural en la planta, uno son los quemadores de caldera (para arranques y estabilizaciones de la combustión) y el otro es el sistema del motor de gas. En la Tabla 2 se muestran ambos. **El consumo de gas en 2023 fue de 58.952 Nm<sup>3</sup>.**

Tabla 2: Consumos de gas. Fuente: Manual de Operación (Biomasa de Cantabria)

Equipo	Potencia (kW)
Caldera	14.200
Motor de gas	2.744

### **Consumo de electricidad**

La energía eléctrica se emplea en el proceso principalmente para transporte de combustible y para el funcionamiento general de la planta. Procede toda de su propia producción, no hay un gasto externo. **En 2023 se autoconsumieron 6.731,34 MWh.**

### **2.1.2. Personal**

El personal que emplea Biomasa Cantabria en los procesos descritos en el apartado anterior, quedan representados en el organigrama de la Figura 8. En el puesto de mayor responsabilidad está el jefe de planta de quien depende RRHH, el jefe de operaciones y el jefe de mantenimiento. El jefe de mantenimiento es responsable de un instrumentista, un mecánico, un supervisor y cinco operarios electromecánicos. El jefe de operaciones tiene a su cargo un analista, cinco jefes de turno, cinco operadores de campo, y dos trabajadores en la recepción de la biomasa.

Durante la semana se trabaja a jornada partida, y, normalmente hay en la planta unas 10 o 12 personas: El Jefe de Planta, el de Operaciones y el de Mantenimiento, se encargan de que todo funcione correctamente. También un administrativo, la persona que controla los accesos, un encargado, un mecánico y tres o cuatro operarios.

Dado que la caldera debe de trabajar de forma continua, es muy importante prever cualquier fallo en el proceso, que lo pueda interrumpir, lo que generaría grandes pérdidas económicas. Los operarios tareas de control del proceso y mantenimiento de las instalaciones, las revisiones de rutina, el trabajo de reparación y el reemplazo de piezas desgastadas o que no funcionan, la reparación de pequeñas averías, preparando los recambios que se van a utilizar en la parada anual, etc.

Durante los fines de semana y durante la noche, no llegan camiones de biomasa y sólo están tres personas constantemente (3 turnos de 8 horas cada día) y son un jefe de

turno, un operador de campo y un operario electromecánico. Su trabajo consiste fundamentalmente en controlar las máquinas y solucionar alguna pequeña incidencia. Si el problema fuera más importante avisan a los retenes (el jefe de mantenimiento, el de operaciones o el instrumentista) para que vayan a solucionarlo.

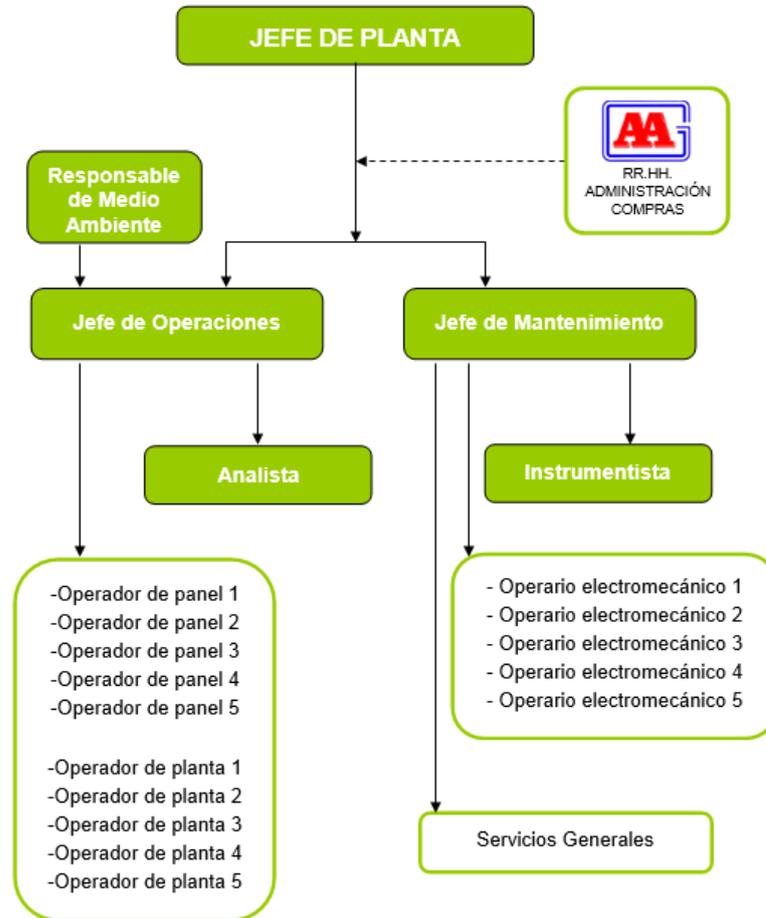


Figura 8: Esquema de trabajadores de la empresa. Fuente: Biomasa de Cantabria

### 2.1.3. Mantenimiento

El mantenimiento de las instalaciones en una planta de biomasa es una tarea fundamental.

Se lleva a cabo tanto mantenimiento correctivo, que soluciona aquellos fallos imprevistos, como mantenimiento predictivo, que está orientado a detectar posibles fallos antes de que ocurran mediante técnicas analíticas, incluyendo ensayos no destructivos (END).

Existe un departamento para este tipo de mantenimiento, que es el más utilizado, y se encarga de gestionar el historial de mediciones y asegurar un control preciso de los equipos.

También se encarga del equilibrado de los ejes en motores y turbinas, calibrando la posición mediante una serie de pesos calculados con gráficas polares. Además, se programan revisiones periódicas de los grupos, haciendo hincapié en los equipos críticos de la planta, como por ejemplo la turbina, que cuenta con sensores para su monitorización continua y que permite prever los posibles fallos en su etapa más temprana mediante el análisis de ciertos parámetros.

En la planta se aplican múltiples técnicas de inspección y mantenimiento preventivo que se enfocan en la detección de los fallos en equipos críticos en su etapa más incipiente. Entre ellas se encuentra la endoscopia, que permite inspecciones visuales en zonas inaccesibles sin necesidad de desmontar el equipo, mientras que la termografía detecta anomalías térmicas en los equipos durante su funcionamiento normal.

Por otro lado, se emplean también distintos métodos como los líquidos penetrantes, partículas magnéticas y la radiografía industrial para poder identificar pequeñas muescas y discontinuidades en las piezas, ya sean en la superficie o en las caras internas de los materiales.

El análisis de aceite permite conocer el estado de los lubricantes mediante parámetros como la viscosidad, partículas en suspensión o contenido metálico, y se realiza tanto en laboratorio como a través del propio proveedor especializado en ello.

El análisis de vibraciones, realizado con instrumentos como acelerómetros y transductores, permite detectar aquellos posibles desequilibrios o desgastes en los equipos rotativos, ayudándose de mediciones de temperatura.

Por último, se realiza una parada técnica cada año destinado a las tareas de mantenimiento intensivo en equipos clave. En la caldera, se realizan inspecciones visuales, mediciones de espesores en las paredes y ensayos no destructivos según la normativa vigente. En la chimenea, se realizan controles de ultrasonidos y pruebas con partículas magnéticas, además de los ya mencionados. En el caso de la turbina, se

revisan las partes más importantes y expuestas al deterioro, como son los cojinetes, la alineación del eje y una inspección boroscópica para evaluar el estado de los álabes.

Todas estas intervenciones y operaciones tienen como objetivo prolongar la vida útil de los equipos y evitar averías que supongan un elevado coste de arreglo.

### **Control de calidad**

Las plantas de biomasa, en el cumplimiento de la Ley 7/2022 sobre residuos y suelos contaminados, deben llevar un registro anual detallado de la cantidad, tipo, origen, medio de transporte y método de valorización de los residuos utilizados, conservándolo durante cinco años. Biomasa de Cantabria cumple con esta normativa mediante registros internos y controles ambientales, entre ellos un control de emisiones atmosféricas en la chimenea, autorizado por la Consejería de Medio Ambiente. Este control garantiza la trazabilidad entre la biomasa utilizada y los niveles de emisión registrados.

Además, la planta gestiona cuatro líneas de aguas residuales dentro de la planta: aguas aceitosas, aguas no aceitosas, aguas fecales y aguas pluviales.

Las aguas con presencia de aceites pasan por un separador de hidrocarburos y son gestionadas como residuos peligrosos, mientras que las aguas no aceitosas reciben un tratamiento que las permite cumplir con las condiciones de vertido. Antes de ello, todas las aguas pasan hacia una arqueta de muestreo que conecta con la red general del polígono industrial. Las aguas pluviales se dirigen directamente a un tanque de tormentas, que desemboca en el Arroyo de La Mina de Reocín.

Biomasa de Cantabria dispone de autorización de vertido desde 2012 y realiza controles anuales de sus vertidos y del ruido ambiental que producen, según la normativa autonómica. Todo se integra dentro de su Sistema de Gestión Medioambiental, que se revisa y audita periódicamente para asegurar el cumplimiento legal, fomentar la mejora continua y prevenir su impacto ambiental.

## **Requisitos legales**

Es muy importante conocer, antes de montar una planta de estas características, los requisitos exigibles por la legislación vigente, tanto a nivel europeo, estatal, autonómico y local.

Con carácter anual la planta comunicará a la Dirección General de Medio Ambiente los datos sobre las emisiones a la atmósfera y la generación de residuos peligrosos, de acuerdo con el Real Decreto 508/2007 del 20 de abril y con el nuevo Registro Estatal de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (PRTR- España). Además, la planta debe mantener actualizados el registro interno con toda la normativa aplicable y los compromisos voluntarios asumidos, que forma parte del Sistema de Gestión Medioambiental (SGMA).

Biomasa de Cantabria incorpora en su SGMA muchas referencias legales, incluyendo normas sobre el traslado y eliminación de residuos, emisiones atmosféricas, contaminación acústica, responsabilidad ambiental, control de vertidos, almacenamiento de productos químicos y requisitos técnicos para el uso de gases fluorados, entre otras.

Este sistema está acreditado bajo la normativa ISO 14001 y desde el 2023, cuenta también con la certificación EMAS, que acredita un compromiso de la empresa con la mejora continua, la prevención de la contaminación emitida y con el cumplimiento de la legislación ambiental vigente de forma rigurosa.

## **2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE UNA PLANTA DE 2MW**

### **2.2.1. Escalado**

Una vez mostrado todo el proceso de transformación de la biomasa en electricidad en la planta de referencia, el siguiente paso será hacer el escalado para una planta de estas características, pero de menor capacidad y analizar la viabilidad económica de una planta de menor entidad, para su posible implantación en un entorno diferente.

El primer paso será determinar la ubicación de esa nueva planta de menor tamaño, para lo que habrá que tener en cuenta una serie de factores, como son: su proximidad a los bosques que nos proporcionarán el combustible, la biomasa, con unos accesos adecuados para los camiones y también para el personal que trabajará en ella. Por supuesto que los datos geotécnicos de la parcela, la red de saneamiento, agua, teléfono, etc. serán también muy a tener en cuenta para la construcción de la planta, al igual que el tema de la subestación eléctrica y su conexión a la red.

El dato de partida, para dimensionarla, que se ha considerado que es el del volumen de biomasa esperado para tratar en la planta, el número de camiones semanales que previsiblemente llegarán a esa nueva planta. De ahí deduciremos las instalaciones necesarias, tanto en lo referente a los edificios y urbanización, como para la maquinaria o el personal necesario.

Montar una planta de este tipo puede ser una buena opción para un municipio o una mancomunidad de ellos, y en el análisis de su viabilidad habrá que tener en cuenta no sólo el beneficio económico, contemplando ingresos y gastos, sino también los sociales, con los empleos creados; y los ambientales, con el cuidado y regeneración de los bosques. Un buen mantenimiento no sólo va a ser una gran medida en la prevención de incendios, sino que va a permitir disfrutar de ellos y la promoción de un tipo de turismo respetuoso con el medio natural: senderismo, rutas a caballo, excursiones, etc.

### **2.2.2. Nueva planta: BioNansa**

Para concretar la posibilidad de escalado, se contemplará la construcción de una nueva planta ficticia, denominada BioNansa, para la que se ha estimado una **capacidad de 22 camiones a la semana**, lo que representa aproximadamente el 20% de la de Biomasa Cantabria. Será, por tanto, capaz de procesar del orden de  $105.854\text{tn} \times 20\% = \mathbf{21.171}$  **tn/año de biomasa**.

#### **Obra Civil**

Partiendo de las instalaciones de Biomasa de Cantabria se han analizado las necesidades de la nueva planta para alojar la maquinaria, oficinas, taller, almacén, etc. Teniendo en cuenta los siguientes factores:

Es imprescindible contar con un pequeño almacén para la maquinaria y sus repuestos. En la planta de BioNansa, hemos considerado un volumen de biomasa de 21.171 tn/año, que suponen en siete días un total de 406 tn, a almacenar en el silo cubierto.

De ahí el material es llevado, mediante cinta transportadora a la torre de cribado, antes de pasar a los silos que alimentan la caldera.

El silo principal de BioNansa lo estimamos en  $1.600\text{ m}^3$  (20% de los  $8000\text{ m}^3$  de Biomasa de Cantabria) mientras que, el silo de consumo diario, situado en lo alto de la caldera es mucho más pequeño pues solo contiene combustible para unas dos horas de funcionamiento de esa caldera, unas 60 tn, suponiendo un rendimiento en la caldera igual al de la planta de referencia (89,9%).

Por lo que se refiere a las instalaciones que van a ser precisas con el cambio de escala, en función de la biomasa disponible esperada, se proponen algunos cambios para reducir costes en la nueva planta propuesta:

- Prescindir de los precalentadores y del economizador.
- Utilizar las aguas del río Nansa para el enfriamiento y evitar la instalación de un aerocondensador.
- Evitar los elementos duplicados tales como bombas de alimentación de agua de caldera, las bombas de condensado del escape de la turbina, o los compresores de aire de instrumentación de la caldera.

Teniendo en cuenta lo expuesto, se estima que las superficies cubiertas de la planta necesarias podrían ser sobre 1.700 m<sup>2</sup>, lo que representa aproximadamente el 45% de las de Biomasa de Cantabria, para una planta con un 20% de su producción nominal.

Por lo que se refiera a las oficinas, taller y almacén, habida cuenta el personal que va a trabajar en la nueva planta, se puede estimar una superficie de unos 420 m<sup>2</sup>, que representan el 38% de las oficinas de Biomasa Cantabria.

Por lo que se refiere a la urbanización de la nueva planta, tiene que contemplar espacio suficiente para la maniobra de los camiones que llegan para descargar la biomasa, incluido su pesaje, así como aparcamientos suficientes, tanto para el personal que trabaja allí, como las posibles visitas. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera que la urbanización de la planta de Bionansa será de unos 7.500m<sup>2</sup>. Así pues la superficie total sería de 9.620 m<sup>2</sup> considerando el espacio necesario para las instalaciones, oficinas y urbanización.

### **Costes Unitarios**

Se contempla en este apartado el coste que corresponde a las naves que albergarán la maquinaria, incluida la destinada a oficinas, almacenes, así como las zonas de acopio de la biomasa, los viales interiores de la parcela, los accesos, etc. No hay que olvidar el **coste de adquisición de los terrenos**, que estaría fuera del alcance de este TFG.

El coste de construcción por m<sup>2</sup> de una nave industrial puede variar mucho dependiendo de ciertos factores, como por ejemplo las condiciones del terreno, el método de cimentación, la calidad de los materiales y el tipo de actividad que se desarrollará. En este caso, al tratarse de una instalación de producción, los precios oscilan entre los 700 y 800 €/ m<sup>2</sup>, al requerir infraestructuras específicas para maquinaria e instalaciones técnicas. Este coste se podría incrementar si se existieran requisitos adicionales, como sistemas de ventilación o cimentaciones complejas.

De la misma manera, influyen el tamaño y diseño de la nave, ya que los proyectos más grandes se benefician de economías de escala, reduciendo el coste unitario.

El coste de urbanizar la parcela en la que se monta la planta se encuentra en el rango de los 80-100 €/m<sup>2</sup> si la parcela no cuenta con servicios previos, así como impuestos (en

este caso un IVA del 21%), tasas municipales y costes indirectos (proyecto, dirección de obra, suministros, seguros, maquinaria auxiliar, etc.). En cuanto a los plazos de ejecución, se estima entre 6 y 12 meses, comparándolo con obras de características similares.

En estos precios se han contemplado los costes correspondientes al Proyecto y Dirección de Obra, así como el de la Licencia de Obra. Si el promotor de la obra es un municipio, no necesitará pagar Licencia de Obra. Los costes directos incluyen tanto los materiales y la mano de obra como los correspondientes a los gastos generales: luz, agua, alquileres de casetas y maquinaria, grúas, seguros, etc.

### **Costes de la Maquinaria**

El cálculo de los costes de la maquinaria se podría estimar partiendo del correspondiente a los de la caldera y la turbina, habida cuenta de que representan aproximadamente el 70% del coste total de la maquinaria.

Para el caso concreto del cálculo del coste de la Maquinaria lo que procedería sería pedir presupuesto a las empresas que la suministran y la montan, pero para este estudio preliminar he empleado el Método Exponencial o de las Seis Décimas.

En proyectos de ingeniería química y de energía, es común estimar costes de equipos o instalaciones a distinta escala mediante este método. Se trata de un procedimiento empírico utilizado para estimar los costes de equipos o plantas de diferentes tamaños en función de su capacidad. Este método se basa en la economía de escala, un concepto económico que sugiere que, a medida que aumenta la escala de producción o la capacidad de una planta, el coste unitario de producción disminuye debido a la optimización de recursos, la especialización de procesos y la distribución de costos fijos entre un mayor número de unidades producidas (Moore, 1959).

Las economías de escala se refieren a la reducción del coste unitario a medida que aumenta la escala de producción o de capacidad de una planta, debido a factores como la optimización de procesos, la especialización y la distribución de costes fijos entre mayor número de unidades producidas o de capacidad instalada.

Al tener disponible información acerca de la inversión en maquinaria de una planta de 10MW, se pueden evaluar los costes de la planta de 2MW aplicando la ecuación 1 del método de los 6 décimos (Chilton, 1950).

$$\frac{C2}{C1} = \left(\frac{I2}{I1}\right) x \left(\frac{S2}{S1}\right)^n \text{ (ec. 1)}$$

- C1 Coste de la maquinaria de la planta de referencia
- C2 Coste de la maquinaria de la planta nueva
- I1 Índice de coste del año de montaje de la planta de referencia
- I2 Índice de coste del año de la planta nueva
- S1 Capacidad de la planta de referencia
- S2 Capacidad de la planta nueva

El factor n es el factor de escala característico del tipo de equipo o planta. En el caso típico de plantas químicas, estudios clásicos fijaron este exponente aproximadamente en 0,6, de ahí el nombre “seis décimos”, para reflejar economías de escala. Un valor  $n < 1$  indica que, al duplicar la capacidad, el costo aumenta en menos del doble, evidenciando economías de escala (coste unitario decreciente). De hecho, la famosa publicación de Chilton (1950) en Chemical Engineering difundió esta aproximación de  $n \approx 0,6$  para estimar el costo de plantas completas a partir de plantas de referencia.

En resumen, la metodología exponencial permite estimar el costo de una planta de biomasa de 2 MW a partir de los datos de costo de una planta similar de 10 MW, aplicando la fórmula anterior con  $n \approx 0,6$ . Esta aproximación, utilizada adecuadamente, proporciona estimaciones de orden de magnitud útiles en etapas iniciales de diseño. Conviene recalcar que la precisión depende de que ambas instalaciones sean técnicamente análogas (misma tecnología, diseño comparable) y de actualizar otros factores como inflación y ubicación. En el caso planteado, asumiremos que la planta de 2 MW comparte configuración con la de 10 MW, por lo que se puede aplicar este factor de escala (n) para estimar el coste de la maquinaria con una razonable aproximación de ingeniería.

El análisis de escalabilidad para la planta BioNansa (con capacidad de 20% de la de Biomasa Cantabria) permite apreciar cómo los costes unitarios por MW de capacidad aumentan debido a la falta de economías de escala. Sin embargo, al eliminar ciertos elementos como los precalentadores o la opción de utilizar un río para condensar el vapor, la inversión inicial podría reducirse sustancialmente, haciendo la planta más accesible para su instalación en áreas rurales.

El factor  $n$  se mueve en un rango entre 0,5 y 0,85 dependiendo del tipo de industria. En la Tabla 3 figuran los distintos valores para el exponente  $n$ , en función del tipo de industria:

Tabla 3: Valores de  $n$  según la industria. Fuente: (Remer, 1990)

Industria	
Plantas químicas y de proceso	0.67
Gases	0.65
Polímeros	0.72
Bioteología	0.67
Plantas de energía	0.75
Tratamiento de efluentes	0.75
Refrigeración	0.75
Promedio para cualquier planta	0.67

Para hallar un valor de  $n$  más ajustado a la realidad, se realiza un estudio de las principales plantas de producción de energía eléctrica de biomasa instaladas en España de diferente capacidad. A continuación, en la Tabla 4 se exponen los costes de la maquinaria de dichas plantas.

Para la estimación de los costes de maquinaria de las distintas plantas, se utiliza un factor de escalado basado en la planta de 10 MW de Biomasa Cantabria, en la que se ha determinado que el coste de la maquinaria representa el 80% del coste total de inversión. Este factor ha sido validado mediante la comparación de los datos históricos

disponibles, asegurando que la relación es representativa de las economías de escala típicas para este tipo de instalaciones.

Tabla 4: Coste de las principales plantas de biomasa en España. Fuente: Elaboración propia

Coste de plantas de biomasa en España					
Capacidad (MW)	Coste inversión total (M€)	Coste maquinaria (M€)	Nombre	Año	Coste actualizado de la maquinaria al 2024 (M€)
10	40	32	Biomasa de Cantabria	2013	47,36542932
49,9	135	108	Greenalia SA	2016	171,3232571
30	51	40,8	Sangüesa	2002	113,1209875
16	49	39,2	Briviesca	2010	71,02455852
49,5	112	89,6	Cubillos del Sil	2020	138,9097426
20	80,9	64,72	Ence Mérida	2014	100,1753043
16	21	16,8	Jaén	2001	46,57923016
1,7	5,2	4,16	Níjar (Almería)	2004	11,38821319
50	100	80	Puertollano	2020	124,0265559
31,5	100	80	Ence El Ejido	2018	115,3090251

Los costes se han actualizado al presente año de acuerdo con el índice IPRI (Índice de Precios Industriales) de Cantabria correspondiente en cada año.

Posteriormente, se representa en una curva (véase Figura 9) la relación Coste/Capacidad y obtenemos la función potencia asociada, de donde podremos extraer el factor n.

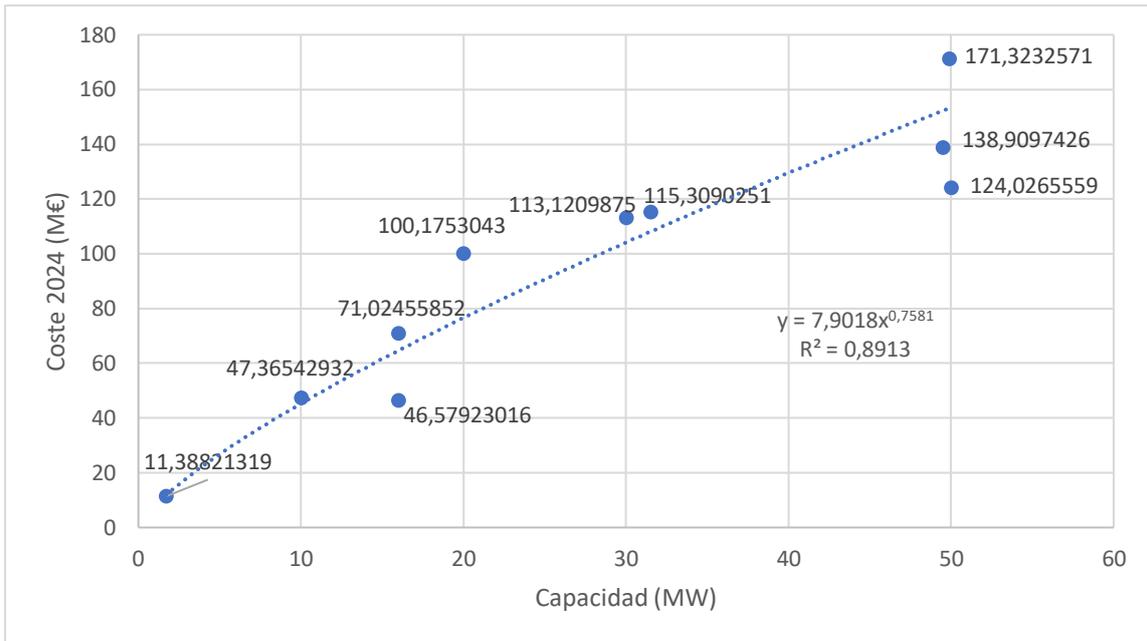


Figura 9: Relación capacidad/coste de las principales plantas de biomasa en España. Fuente: Elaboración propia

Comprobando con la tabla donde se representan los valores posibles de n y obteniendo la función de la tendencia en la misma forma que la fórmula original, vemos que tiene sentido y es cercano al que más se asemeja a una planta de biomasa: Planta de energía (n=0,75).

Observamos también que el valor de  $R^2$  es 0,8913 (muy alto), lo que indica que el 89,13% de la variabilidad de datos se explica con este modelo utilizado.

Por tanto, el valor n para este caso concreto es n=0,7581 basado en el ajuste potencial de la gráfica.

Comparando la ecuación original con la obtenida mediante el método gráfico en su misma forma, observamos que:

$$y = 7,9018 \cdot x^{0,7581}$$

$$C2 = C1 \cdot \frac{I2}{I1 \cdot S1^n} \cdot S2^n$$

Por comparación:

$$y \equiv C2 ; x \equiv S2$$

$$C1 \cdot \frac{I2}{I1 \cdot S1^n} = 7,9018$$

$$n = 0,7581$$

El valor de I contempla la variación anual de los precios debido a la inflación. Con este factor, se actualizan los costes de las plantas montadas anteriormente, al momento actual en el que se están calculando los costes de la nueva planta. Para ello nos apoyaremos en el Índice de Precios Industriales (IPRI), que es un indicador que mide la evolución mensual de los precios de los productos industriales fabricados y vendidos en el mercado interior, excluyendo los gastos de transporte y comercialización y el IVA. Además, los datos se han tomado referidos a las industrias energéticas en Cantabria durante los últimos 25 años.

Para la nueva planta, la de BioNansa, entre la elaboración del proyecto, obtención de permisos y licencias, más el tiempo de construcción se estimará el año 2028 como fecha final para su puesta en marcha. Como no existen datos del Índice de Precios de ese año, haré una estimación basada en el método Holt-Winters.

Dicho método es un modelo de suavizamiento exponencial adaptado para series temporales que permite realizar previsiones futuras basándose en datos históricos. Este enfoque es útil para predecir tendencias y estacionalidades en variables económicas o de rendimiento. Para obtener el valor del IPRI en 2028, se ha ajustado el modelo a los datos históricos disponibles, aplicando tres componentes clave: el nivel, la tendencia y la estacionalidad. Este modelo es ideal en contextos donde se necesita proyectar valores futuros a partir de patrones previos, especialmente en áreas donde los datos tienen una clara tendencia y variación estacional.

### **Fórmula de Holt-Winters (Triple Exponential Smoothing):**

A continuación, se presenta la fórmula del método Holt-Winters, que utilizamos para la predicción del índice en 2028:

$$y_{t+h} = (L_t + h \cdot T_t) \cdot S_{t+h-m \cdot s} \quad (ec. 2)$$

Fuente: (Holt, 2004), (Winters, 1960).

Donde:

$L_t$ : Nivel en el tiempo  $t$ , que el valor suavizado de la serie temporal.

$T_t$ : Tendencia en el tiempo  $t$ , que indica el cambio en el nivel a lo largo del tiempo.

$S_{t+h-m \cdot s}$ : Componente estacional de la serie en el tiempo  $t + h - m \cdot s$ , que indica la estacionalidad y se ajusta con base en el periodo de la estacionalidad  $s$ .

$h$ : Horizonte de la predicción.

$s$ : Periodicidad de la estacionalidad.

Para adaptarlo a nuestro caso, se realizan las siguientes modificaciones:

$$IPRI_{2028} = (L_{2024} + (2028 - 2024) \cdot T_{2024}) \cdot S_{2028} \quad (ec. 3)$$

Donde:

$L_{2024}$  sería el valor suavizado del IPRI en el último año de los datos disponibles, tomando en cuenta las fluctuaciones pasadas.

$T_{2024}$  es la tendencia del IPRI observado en los datos históricos, es decir, el incremento o decremento promedio esperado en el IPRI a medida que avanza el tiempo.

$S_{2028}$  es el ajuste estacional del año 2028, que representa los factores que afectan los precios de la energía renovable en ciertos períodos del año, como variaciones estacionales de la oferta y la demanda o políticas gubernamentales

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. EMPLAZAMIENTO Y TAMAÑO DE LA NUEVA PLANTA**

Se concluye que la zona óptima para ubicar la planta de diseño (de 2MW) es el Valle del Nansa, puesto que cuenta con una gran cobertura forestal, especialmente de eucalipto y pino. La importancia del sector forestal en la zona lo demuestra el dato de que haya hasta 9 municipios que presentan más de un tercio de su territorio dedicado al bosque: Alfoz de Lloredo, Comillas, Herrerías, Valdáliga, Los Tojos, Ruente, Ruiloba, Polaciones, Mazcuerras y Cabezón de la Sal. La zona en cuestión cuenta con un total de 18 municipios, con una superficie de 995,5 Km<sup>2</sup> y una población de 31.541 habitantes. (Asociación de Desarrollo Rural Saja – Nansa, 2018)

De acuerdo con los cálculos que obtendremos más adelante, la planta de diseño podría abastecerse de biomasa de manera sostenible a escala comarcal, sin tener que recurrir a transportes de larga distancia. Además, el tamaño reducido de la planta hace que se adapte mejor a zonas rurales como esta. Un beneficio colateral de esta zona es la generación de empleo local directo e indirecto, contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la zona sin desbordar los recursos de la comarca.

Todo esto está alineado con los objetivos marcados en el PNIEC 2023-2030, que promueve el desarrollo renovable descentralizado en zonas rurales, la mejora de la salud y la justicia social.

### **3.2. COSTES SEGÚN LA METODOLOGÍA**

El coste total de la maquinaria de la planta de Biomasa Cantabria, cuya finalización fue en el año 2013, según nos han informado, es aproximadamente de 29.500.000 €, según los datos aportados por la empresa. Este dato sirve como base a la hora de aplicar el método del escalado en la sección 2.2.

Aplicando los datos conocidos a la fórmula de Holt-Winters (ec. 3) obtenemos que el IPRI en el año 2028 es de 146,14.

Por tanto, conocidos los siguientes datos y aplicándolos en la fórmula de las 6 décimas (ec. 1):

Tabla 5: Costes, capacidades e índices conocidos de la fórmula de Holt-Winters

C1 Biomasa	S1 Biomasa	S2 BioNansa	I2 (2028)	I1 (2013)
29.500.000 €	10 MW	2 MW	146,14	83,46

$$\frac{C2}{29.500.000} = \frac{146,14}{83,458} \times \left(\frac{2}{10}\right)^{0,7581} = 1,751 \times 0,2952 = 0,517$$

Despejando la C2, resulta un Coste de la Maquinaria para BioNansa: C2=15.248.740,92€

Este valor es un 48,3% más bajo que el coste de la maquinaria de la planta de referencia, que refleja de forma evidente las economías de escala que caracterizan a este tipo de instalaciones (Bramakis, Charalampidis, & Karellas, 2021).

### **Costes totales de construcción de la planta BioNansa**

De acuerdo con lo expuesto se consideran los siguientes **costes de construcción** de la planta BioNansa:

Edificios para maquinaria y Oficinas:  $(1.710+418) \times 800 \text{ €/ m}^2 = 1.702.400 \text{ €}$

Urbanización=  $7.483 \text{ m}^2 \times 100 \text{ €/ m}^2 = 748.300 \text{ €}$

Coste de la obra civil = 2.450.700 €

Todas las cantidades contempladas en estos apartados se entienden **SIN IVA**, por lo que, si sumamos este impuesto, que es del 21%, se tendrá:

Coste Total de la Obra Civil (IVA incluido) =  $2.450.700 \times 1,21 = 2.965.347 \text{ €}$

### **Coste Total**

La inversión inicial para el montaje de la nueva planta de biomasa, BioNansa, será la suma de los costes (incluido el IVA) correspondientes a la Obra Civil, que incluye tanto los Edificios, como la Urbanización, más los costes de la Maquinaria.

Coste de la Obra Civil + Coste de Maquinaria=  $2.965.347+15.248.740 = 18.214.087 \text{ €}$

Queda pendiente el Coste del Terreno, que, como ya se indicó en la metodología, queda fuera del alcance de este TFG.

### **3.2.1. Gastos de explotación de la planta BioNansa**

#### **Personal**

Teniendo en cuenta que la planta de biomasa de diseño tiene una potencia de 2MW y que trabajará en régimen continuo (24 horas, 365 días al año), es necesario organizar la estructura operativa adaptada a su menor tamaño, sin que ello afecte a la seguridad ni eficiencia del proceso. En comparación con plantas como la de Biomasa de Cantabria, es viable plantear un organigrama más reducido, pero igual de funcional, debido a la menor carga de trabajo y aprovechando la polivalencia del personal. Como existirá un menor tránsito de camiones (en torno a 5 camiones al día), se podrían fijar unos horarios más limitados, sólo en jornada laboral de lunes a viernes, de manera que se minimice el número de personas necesarias.

Por tanto, se estima un total de nueve trabajadores que se distribuyen de la siguiente manera: un responsable técnico de la planta, que asume las tareas de supervisión general y coordinación operativa; un administrativo encargado de la gestión documental, logística y contabilidad básica; tres operarios de planta encargados de las tareas de operación, mantenimiento preventivo y correctivo; tres operarios a turnos que garanticen la vigilancia y operación en continuo durante las noches, fines de semana y festivos; y una persona encargada de los servicios generales, responsable del apoyo en limpieza, mantenimiento auxiliar y control de accesos. Por razones económicas, la recogida y transporte de los materiales del bosque podría ser acometido por personal propio, que pudiera realizar otros trabajos dentro de la propia empresa, reduciendo de esta manera el número de trabajadores necesarios y abaratando el precio de la biomasa.

A la hora de calcular el coste unitario de cada trabajador, habrá que tener en cuenta, no sólo su salario, sino también otros conceptos relacionados con la cuota de la Seguridad Social que deben ser pagados por la empresa:

- Contingencias comunes: el 23,6% del salario bruto.

- Contingencias profesionales: el 3,5% en el caso de los contratos indefinidos y el 5,3% en el de los contratos temporales.
- Prestaciones por desempleo: el 5,5% para los contratos indefinidos y el 6,7% para los temporales.
- Fondo de Garantía Salarial (FOGASA): 0,2% del salario bruto.
- Formación: 0,6% del salario bruto.

También se deberán tener en cuenta los gastos ocasionados por bajas o permisos de trabajo, ropa de trabajo, transporte del personal, etc.

Teniendo en cuenta todos estos conceptos se van a considerar los siguientes costes anuales:

- Personal cualificado:  $3.500 \text{ €} \times 14 \text{ pagas} = 49.000 \text{ €/año}$
- Personal no cualificado:  $2.500 \text{ €} \times 14 \text{ pagas} = 35.000 \text{ €/año}$

En este caso, se tendrá un coste de personal anual de:

**Coste anual de Personal** =  $49.000 \times 2 \text{ trab.} + 35.000 \times 7 \text{ trab.} = \mathbf{343.000 \text{ €/año}}$

### **Materiales**

Otro coste importante en la explotación de la planta está en los materiales que se consumen en el proceso. Se tomaron como referencia los costes de la empresa Biomasa Cantabria del año 2023.

Los precios unitarios que se consideran son los siguientes:

- Biomasa: 45€/t. Sin embargo, para la nueva planta, entendiéndose que serán camiones propios los que recogerán y transportarán la biomasa, se estima un coste algo inferior, 38 €/t
- Gas: Cada mes cambia el precio. Se contempla: 50.4€/MW
- Arena: 48€/t
- Agua: 0.45€/m<sup>3</sup>

### **Consumos y Coste en la planta de Bionansa**

De acuerdo con la proporción del 20% respecto a la planta de referencia (2MW frente a 10MW), los consumos y costes correspondientes en la planta de BioNansa serían los siguientes, suponiendo un rendimiento igual en los equipos:

**Biomasa:**  $105.854 \text{ tn} \times 20\% = 21.171 \text{ tn} \times 40 \text{ €/tn} = \mathbf{846.840 \text{ €}}$

**Consumo de energía:**  $6.731 \text{ Mw} \times 20\% = 1.346 \text{ Mw}$  (autoconsumo)

**Gas:**  $685 \text{ Mwh} \times 20\% = 137 \text{ Mwh} \times 50 \text{ €/Mwh} = \mathbf{6.850 \text{ €}}$

**Arena:**  $2.782 \text{ tn} \times 20\% = 556 \text{ €/tn} \times 48 \text{ €/tn} = \mathbf{26.688 \text{ €}}$

**Agua:**  $14.578 \text{ m}^3 \times 20\% = 2.916 \text{ m}^3 \times 0,45 \text{ €/m}^3 = \mathbf{1.312 \text{ €}}$

Coste total de materiales = 881.690 €

### **Gastos Generales y Mantenimiento**

Además de los materiales y del coste de personal hay uno muy importante, que corresponde al mantenimiento de las instalaciones. No solo los ensayos y pruebas sino también las piezas que hay que sustituir, las labores de lubricación, etc.

También son importantes los Gastos Generales: Seguros, materiales de oficina, etc.

De acuerdo con los datos proporcionados por Biomasa Cantabria, esos costes se pueden estimar aproximadamente en un 10% de incremento sobre los de Materiales y de Personal

Coste total: Personal + Materiales + Gastos Generales = 378.000 + 881.690 + 125.969 €

Coste Total = 1.385.659 €

### **Venta de energía**

La energía eléctrica generada por Biomasa Cantabria, S.L. llega, desde la subestación existente en la planta a la red, propiedad de Red Eléctrica Española (REE), que realiza una previsión de la demanda eléctrica del día siguiente. Dentro del mercado diario, los

productores de energía eléctrica envían sus ofertas a OMIE, que se encarga de recibir dichas ofertas y ordenarlas.

El precio de la energía generada en la planta tiene un precio que viene marcado por **OMIE** (Operador del Mercado Ibérico de Energía), que es el operador del mercado eléctrico designado para España, y que se encarga de gestionar y organizar el pool eléctrico y las sesiones que se producen cada día para establecer el precio de la luz en nuestro país.

Sus decisiones están supervisadas, tanto por la CNMC como por el Consejo de Reguladores del MIBEL (órgano regulador conjunto de España y Portugal).

La función principal de OMIE es asegurar que el mercado eléctrico español funciona de manera eficaz, transparente, independiente y de forma competitiva:

- Permite el libre acceso al pool eléctrico de todos los agentes que deseen vender o comprar energía, suprimiendo toda barrera de acceso.
- Se encarga de comunicar de manera transparente toda la información relevante sobre precios, ofertas, cantidades y liquidaciones del mercado energético.
- Organiza el mercado diario y el mercado intradiario.
- Se encarga de gestionar los servicios de ajuste del sistema eléctrico: control de frecuencia, tensión, reserva y restricciones técnicas.
- Calcula y publica el precio final medio del mercado mayorista de producción eléctrica, además de los componentes del precio de la luz final.

Diariamente se publican en su web los resultados de las subastas energéticas. A través de [su página e informes](#) podrás encontrar el precio al que las comercializadoras comprarán la energía para venderla posteriormente a sus clientes.

- Precio medio del mercado en España y Portugal.
- Evolución del precio de la electricidad en un año.
- Variación del precio de la electricidad en función de las horas.
- Cantidad neta de energía que se compra y vende.
- Cantidad de energía eléctrica que produce cada tipo de tecnología.

Además, cada mes, **OMIE publica informes** con información detallada sobre la evolución del mercado eléctrico.

Para 2.023 se tiene un precio medio de 100,2 €/MWh

### 3.2.2. BioNansa

Se estima inicialmente una producción de energía un 20% de la de Biomasa Cantabria =  
73.925 x 20% = 14.785 MWh

Venta total de energía en BioNansa a Red Eléctrica Española = 14.785 MWh x 100,2  
€/MWh = 1.481.457 €

Resultado de la explotación = 1.481.457 – 1.385.659 = 95.798 €

Dicha explotación podrá suministrar de energía a unas 10000 personas, puesto que  
conocemos tanto la generación de electricidad de la planta al cabo de un año (14.785  
MWh) como el consumo medio de los hogares en España (3.487 kWh). (Iberdrola, 2024)

$$n^{\circ} \text{ hogares} = \frac{14.785.000 \text{ kWh/año}}{3.487 \frac{\text{kWh}}{\text{año} \cdot \text{hogar}}} = 4240 \text{ hogares}$$

Además, sabemos que en los hogares viven una media de 2,5 personas (INE, 2021), por  
lo que:

$$n^{\circ} \text{ personas} = 4.240 \text{ hogares} \cdot \frac{2,5 \text{ personas}}{\text{hogar}} = 10.600 \text{ personas abastecidas}$$

### **Ayudas y subvenciones**

De ese beneficio anual habría que descontar una parte para la amortización de los costes  
iniciales de montaje de la planta, lo que confirma que la viabilidad económica para este  
tipo de instalaciones pasa por poder contar con ayudas, con subvenciones de las  
administraciones públicas.

Consciente de ello, y también de los beneficios sociales y medioambientales que  
generan, las Comunidades Autónomas y la Administración Central tienen prevista una  
serie de ayudas. Por una parte, está la retribución a la operación que es el producto de  
los megavatios producidos por el precio que marca el pool eléctrico (OMIE), y por otra

parte está la retribución a la inversión que recibe anualmente la empresa y que es variable, en función de la amortización que se haya ido realizando. Se contempla en este caso, la devolución de lo invertido, con un periodo de retorno, de unos treinta años.

Esto parece explicar el hecho de que, por ejemplo, en Cantabria, solo contemos actualmente con una planta de biomasa, que pertenece a un grupo empresarial muy potente, con el músculo financiero como para afrontar este tipo de inversiones.

Las ayudas de la Administración Central están recogidas en el 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.

Concretamente en su Artículo 2. Ámbito de Aplicación. Apartado 8. Grupo b.8 se dice que están incluidas *“Centrales de generación eléctrica o de cogeneración que utilicen como combustible principal biomasa procedente de instalaciones industriales del sector agrícola o forestal. Se entenderá como combustible principal aquel combustible que suponga, como mínimo, el 90 por ciento de la energía primaria utilizada, medida por el poder calorífico inferior”*

En el TÍTULO IV se hace referencia al Régimen retributivo específico, que en su Artículo 16, fija la Retribución a la inversión de la instalación tipo.

### **3.2.3. Comprobación de los parámetros con Biomasa de Cantabria**

#### **Construcción:**

La superficie construida es de 3.800 m<sup>2</sup> más otros 1.100 m<sup>2</sup> de oficinas. Tiene también otros un recinto urbanizado de otros 18.708 m<sup>2</sup>

Coste según hipótesis de cálculo

- Edificación= 3.800 + 1.100 = 4.900 m<sup>2</sup>

Estimando un coste unitario de 800 €/m<sup>2</sup>, resulta un coste total de 3.920.000 €

- Urbanización= 18.708 m<sup>2</sup> x 100 €/ m<sup>2</sup> = 1.870.800 €

Por lo tanto, el coste total de las obras ascendería a: 5.790.800 €

El plazo de ejecución de los trabajos de construcción de la planta: 23 meses

Para la Maquinaria se estima un coste de 30.000.000 €

Coste inicial total = 5.790.800+30.000.000 = 35.790.800 €

### **Gastos de Explotación**

Biomasa: 105.854 tn x 46 €/tn = 4.869.284 €

Arena: 2.783 tn x 48 €/tn = 133.584 €

Agua: 14.578 m<sup>3</sup> x 0,45 €/m<sup>3</sup> = 6.560 €

Personal: 4 x 59.000 €/año + 20 x 38.000 €/año = 1.190.000 €

Otros costes: 10% = 600.543 €

Costes totales = 6.799.971 €

### **Venta**

Electricidad: 73.925 MWh x 100,2 €/ MWh = 7.407.285 €

**RESULTADO ANUAL:** Venta – Costes = 607.314 €

De ese resultado hay que descontar la parte correspondiente a la amortización de la inversión inicial que se ha estimado en 35.790.800 €.

El coste de materiales es el siguiente: Biomasa=4.900.000€/año, arena=130.000€/año, agua=6.500€/año. Por tanto, el coste de materiales sale en torno a 5.000.000€/año.

El coste de transformación (ellos engloban aquí el coste de personal, mantenimiento de la planta, reparaciones, recambios, análisis, etc.)= 2.200.000€/año.

Amortización de la planta: 1.200.000€/año.

Las ventas se computan de la siguiente manera:

Venta de los MWh producidos=7.407.285€/año

Retribución por la inversión que se realiza pagada por el Ministerio: Es muy variable y depende del precio de la biomasa, del precio futuro de la energía, de la amortización,

etc. Un valor muy cambiante. Se supone que con estas retribuciones se intenta llegar a una rentabilidad del 7% anual, pero nunca se llega.

La conclusión es que estas plantas solo tienen sentido económicamente con las subvenciones del Estado.

### **3.2.4. Discusión comparativa: análisis técnico-económico frente a otros casos**

A la hora de comparar el caso de diseño (BioNansa) frente a otros casos, hemos de utilizar parámetros que representen la viabilidad y competitividad en proyectos de características similares.

Para este estudio, se ha utilizado el LCOE (Levelized Cost of Energy) que es una métrica para medir el costo promedio de la generación de electricidad durante la vida útil de un activo energético. (Gomstyn & Jonker, 2024). Dicha métrica se apoya en la siguiente fórmula:

$$LCOE = \frac{\text{Valor actual de la inversión total durante la vida útil de la planta (€)}}{\text{Energía total generada durante la vida de la planta (kWh)}} \quad (ec. 4)$$

*Fuente: (Patil, y otros, 2017)*

Este indicador es fundamental porque permite comparar con un único valor distintas tecnologías energéticas con diferentes inversiones iniciales, gastos operativos y vidas útiles. A diferencia de métricas como el ROI o el payback simple, el LCOE proporciona una perspectiva más global que integra los costes de capital, operación y mantenimiento, así como la energía realmente producida.

El valor actual de la inversión se calcula como la suma de la inversión inicial (CAPEX=18.214.087 €) y el gasto operativo o costo de manera iterativa. La energía generada en este periodo de tiempo también se ha de hallar de manera iterativa, para tener en cuenta el paso del tiempo en los costes. Por tanto, la fórmula adaptada queda de la siguiente manera:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (ec. 5)$$

*Fórmula adaptada del LCOE*

Donde t es el año de operación, empezando desde 1 (año de inicio) hasta el 30 (vida útil de la planta, n=30); y r es la tasa de descuento aplicada, que representa el coste de oportunidad del capital invertido. En términos simples, refleja adecuadamente tanto el valor temporal del dinero como los riesgos y el coste de oportunidad asociados al capital invertido en proyectos a largo plazo.

En este análisis, se ha utilizado una tasa estándar del 7%, adecuada para proyectos de infraestructura energética con cierto respaldo público. Esta cifra representa un valor estándar internacional para el análisis financiero de proyectos de energías renovables en países de la OCDE. (IRENA, 2021)

El resultado de la planta de diseño quedaría de la siguiente manera:

$$LCOE = \frac{18.214.087 + \sum_{t=1}^{30} \frac{1.385.659}{(1+0,07)^t}}{\sum_{t=1}^{30} \frac{14.785 \cdot 10^3}{(1+0,07)^t}} = 0,193€/kWh$$

De la misma manera, aplicando los datos conocidos de Biomasa de Cantabria actualizados al 2024 en la ec. 5, obtenemos que su LCOE es de 0,143€/kWh.

Por tanto, una vez obtenido el resultado, se procede a comparar estos resultados con los de otras plantas y otras tecnologías similares, resumidos en la gráfica de la Figura 10:

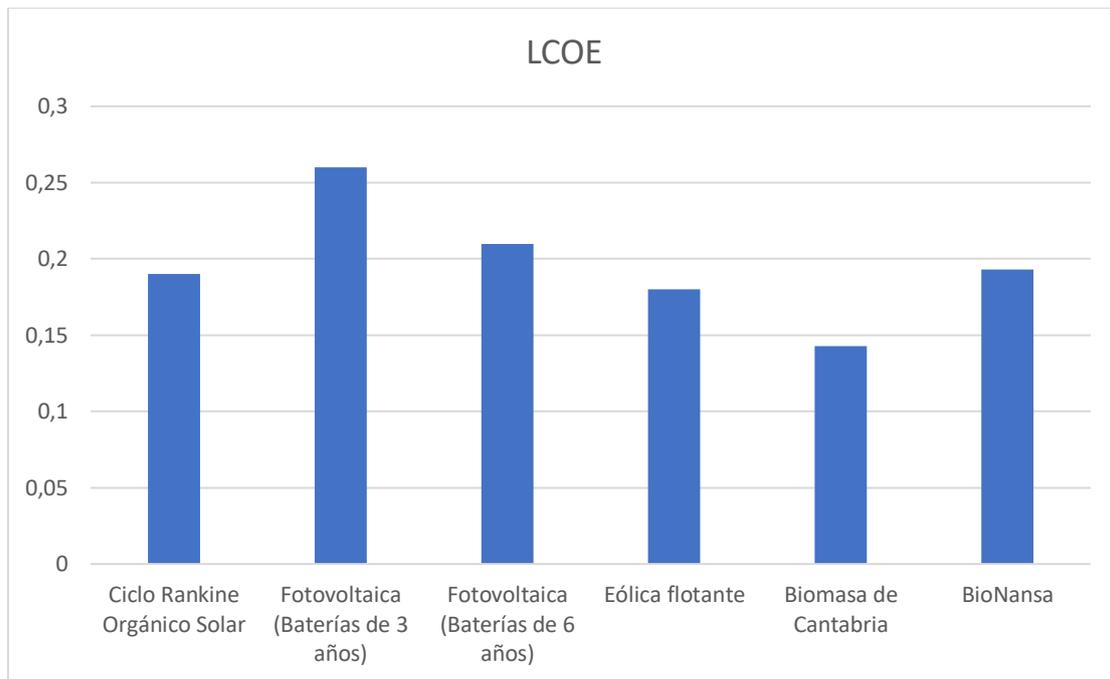


Figura 10: : Valores de LCOE según tecnología utilizada, (Patil, y otros, 2017); (MITECO, El MITECO saca a información pública la propuesta de Hoja de Ruta de la Eólica Marina y las Energías del Mar, 2021).

El análisis técnico-económico de la planta BioNansa, diseñada para operar en el Valle del Nansa (Cantabria), revela que su viabilidad económica depende fuertemente de ayudas públicas o ingresos adicionales, como la venta de calor residual. El coste nivelado de la energía (LCOE) calculado para este proyecto asciende a 192,9 €/MWh, mientras que el precio medio del mercado eléctrico (OMIE) en España durante 2024 fue de solo 63,04 €/MWh (OMIE, 2024). Esta diferencia evidencia que, en las condiciones actuales del mercado, la venta de electricidad no cubriría por sí sola los costes de generación del proyecto.

Aunque el proyecto BioNansa mejora algunos aspectos de diseño y eficiencia, su elevado coste inicial (18,2 millones €) y unos costes de explotación de 1,39 millones €/año

dificultan la competitividad en el mercado mayorista. Además, el hecho de que su única fuente de ingresos sean las ventas eléctricas refuerza esta limitación.

Como se puede observar, la rentabilidad que ofrece BioNansa es muy ajustada, y considerando que este tipo de plantas dependen enormemente de las ayudas públicas, una posible alternativa tecnológica sería la de adoptar un sistema de cogeneración basado en un ciclo orgánico Rankine (CHP-ORC). Como señala Braimakis et al. (2021), las plantas de ciclo Rankine con vapor de agua pierden eficiencia y viabilidad económica por debajo de 1MW, y en estos casos los sistemas ORC se presentan como una solución interesante. Además de la electricidad generada, se aprovecha el calor residual del proceso en otros usos térmicos o redes de calor locales, de manera que se aumenta el rendimiento global de la planta y fortaleciendo su competitividad.

#### **Explicación de los resultados:**

- Aunque se basa en una planta real de 10 MW, la reducción de tamaño no logra capturar completamente las economías de escala, generando un coste elevado por MW instalado.
- Producción ajustada a escala realista: 14.785 MWh/año representan un buen nivel de eficiencia para biomasa, con un factor de capacidad del 84,39%, pero sigue siendo insuficiente para diluir el CAPEX sin ayudas.
- Comparación con el mercado: el precio del mercado diario es muy inferior al LCOE estimado, lo que implica que el proyecto operaría a pérdidas si no recibe subvenciones o vende también energía térmica residual (CHP).

## 4. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo, se ha analizado la viabilidad económica de una planta de biomasa de 2MW tomando como referencia los datos proporcionados por la planta Biomasa de Cantabria (10MW). A través de la metodología de escalado, se han estimado los costes asociados a la construcción y operación de la planta, los cuales han sido comparados con los valores obtenidos mediante el método de las seis décimas.

### **Discusión sobre los costes**

El análisis económico preliminar ha revelado que los costes iniciales de inversión son considerablemente altos debido a los costes de obra civil, la compra de maquinaria y los costes asociados al personal necesario para la operación de la planta. Sin embargo, a medida que se realiza el escalado de la planta de 2MW a 10MW, se observa una reducción proporcional en los costes unitarios, lo que implica que las economías de escala tienen un impacto positivo en los costes totales.

La estimación de costes de maquinaria basada en el método de las seis décimas ha mostrado que la relación entre el coste de inversión de una planta de 10MW y una de 2MW no es lineal. En este sentido, los costes por MW aumentan a medida que se reduce la capacidad de la planta, lo que sugiere que, aunque una planta de menor capacidad puede ser más flexible y adecuada para entornos rurales como Cantabria, su viabilidad económica se ve afectada por los altos costes iniciales.

A pesar de los altos costes, el análisis nos dice que los beneficios sociales y ambientales derivados de la planta, como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y la gestión forestal sostenible, compensan en gran medida estos gastos. Además, el empleo generado en el entorno rural y la posible contribución a la economía circular refuerzan la viabilidad del proyecto, especialmente si se considera la colaboración de las administraciones públicas a través de subvenciones o facilidades de financiación.

Las plantas de biomasa, como la propuesta en este TFG, no solo contribuyen a la transición energética, sino que también tienen el potencial de ser una fuente de empleo rural y regeneración de los ecosistemas forestales.

El proyecto BioNansa puede ser viable desde el punto de vista técnico y ambiental, pero requiere mecanismos de apoyo económico tales como: (i) Subvenciones a la inversión inicial (fondos europeos o autonómicos); (ii) Ingresos complementarios por venta de calor (cogeneración); (iii) Bonificaciones fiscales por valorización de residuos y reducción de CO<sub>2</sub>.

Este resultado también ayuda a explicar por qué, pese al alto potencial forestal de Cantabria, solo existe una planta de biomasa activa en la región. Los costes de entrada y el bajo precio del mercado eléctrico suponen barreras estructurales al desarrollo de nuevos proyectos si no se articulan mecanismos de financiación pública adecuados.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Andaluza de la Energía, C. d. (24 de Abril de 2025). *Agencia Andaluza de la Energía*. Obtenido de [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-termica-con-renovables#:~:text=Las%20fuentes%20renovables%20que%20son%20susceptibles%20de%20ser,comercializaci%C3%B3n%20o%20a%20otras%20empresas%20productoras%](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-termica-con-renovables#:~:text=Las%20fuentes%20renovables%20que%20son%20susceptibles%20de%20ser,comercializaci%C3%B3n%20o%20a%20otras%20empresas%20productoras%20)
- Asociación de Desarrollo Rural Saja – Nansa. (2018). *ESTRATEGIA DE DESARROLLO LOCAL PARTICIPATIVO DE LA COMARCA SAJA NANSA*. Obtenido de <https://sajanansa.es/wp-content/uploads/2018/08/1.Estrategia-Desarrollo-Local-Participativo.pdf>
- Blasiak, W. (2013). *Modern technologies of biomass combustion and pre-treatment for more efficient electricity production: Review and case analysis*. *Climate Change Management*. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-642-37753-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37753-2_20)
- Braimakis, K., Charalampidis, A., & Karellas, S. (2021). Techno-economic assessment of a small-scale biomass ORC-CHP for district heating. *Energy Conversion and Management*, 247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114705>.
- Cavazzini, G., & Dal Toso, P. (2015). Techno-economic feasibility study of the integration of a commercial small-scale ORC in a real case study. *Energy Conversion and Management*, 99, 161-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.043>.
- Chilton, C. (Abril de 1950). Six Tenths Factor. *Chemical Engineering*, 112-114.
- CONSEJERÍA DE DESARROLLO RURAL, GANADERÍA, PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. (2022). *Resolución por la que se aprueba el Informe Ambiental Estratégico del Programa de Movilización de los Recursos Forestales de Cantabria para el periodo 2022-2025*. Santander: Dirección General de Biodiversidad, Medio Ambiente y Cambio Climático. Obtenido de <https://boc.cantabria.es/boces/verAnuncioAction.do?idAnuBlob=374688&utm>

- Gobierno de Cantabria. (10 de Noviembre de 2021). *Programa de Movilización de los Recursos Forestales de Cantabria 2022-2025*. Santander: Gobierno de Cantabria. Obtenido de [https://www.cantabria.es/detalle/-/journal\\_content/56\\_INSTANCE\\_DETALLE/16413/17902544](https://www.cantabria.es/detalle/-/journal_content/56_INSTANCE_DETALLE/16413/17902544)
- Gomstyn, A., & Jonker, A. (15 de Junio de 2024). *IBM*. Obtenido de What is the levelized cost of energy (LCOE)?: <https://www.ibm.com/think/topics/levelized-cost-of-energy>
- Holt, C. C. (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1), 5-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2003.09.015>.
- Iberdrola. (10 de Octubre de 2024). *iberdrola.es*. Obtenido de <https://www.iberdrola.es/blog/luz/cuantos-kwh-consume-una-casa-al-mes>
- INE. (2021). *Encuesta continua de hogares. Año 2020*. Instituto Nacional de Estadística. Madrid: Instituto Nacional de Estadística. Obtenido de [https://ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica\\_C&cid=1254736176952&menu=ultiDatos&idp=1254735572981](https://ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176952&menu=ultiDatos&idp=1254735572981)
- IRENA. (2021). *RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Obtenido de <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2009). *Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios*. Gobierno de España, Dpto. de Biomasa y Residuos del IDAE. Madrid: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Obtenido de <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-instalaciones-de-biomasa-termica-en-edificios>
- MITECO. (2005). *Resumen: Plan de energías renovables en España*. Gobierno de España. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- MITECO. (2020). *Impacto económico, de empleo, social y sobre la salud pública del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Obtenido de

[https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/informesocioeconomicocompleto\\_tcm30-508411.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/informesocioeconomicocompleto_tcm30-508411.pdf)

MITECO. (2020). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

MITECO. (7 de Julio de 2021). El MITECO saca a información pública la propuesta de Hoja de Ruta de la Eólica Marina y las Energías del Mar. Madrid, Madrid, España: MITECO. Obtenido de [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2021/07/el\\_miteco\\_saca\\_ainformacionpublicalapropuestadehojaderutadelaeol.html](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2021/07/el_miteco_saca_ainformacionpublicalapropuestadehojaderutadelaeol.html)

Moore, F. T. (Mayo de 1959). Economies of Scale: Some Statistical Evidence. *The Quarterly Journal of Economics*, 73(2), 232-245. doi:<https://doi.org/10.2307/1883722>

Motola, V., Hurtig, O., Buffi, M., Georgakaki, A., Letout, S., Mountraki, A., & Joanny Ordoñez, G. (2022). *Clean Energy Technology Observatory: Bioenergy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*. Comisión Europea. Luxemburgo: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/577104

OMIE. (2024). *Operador del Mercado Ibérico de Energía*. Obtenido de <https://www.omie.es/es/market-results/interannual/daily-market/daily-prices?scope=interannual&system=1>

Patil, V. R., Biradar, V. I., Shreyas, R., Garg, P., Orosz, M. S., & Thirumalai, N. (2017). Techno-economic comparison of solar organic Rankine cycle (ORC) and photovoltaic (PV) systems with energy storage. *Renewable Energy*, 113, 1250-1260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.107>.

Remer, D. S. (Abril de 1990). Estimate costs of scaled-up process plants. *Chemical Engineering*, 138. Obtenido de <https://www.proquest.com/trade-journals/estimate-costs-scaled-up-process-plants/docview/194484772/se-2?accountid=14497>

- Salimi, M., Hosseinpour, M., Mansouri, S., & N. Borhani, T. (2022). Environmental Aspects of the Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) Systems: A Review. *Processes*, 10(4). doi:<https://doi.org/10.3390/pr10040711>
- Sivabalan, K., Suhaimi, H., Hamdan, Y., & Jagadeesh, P. (2021). A review on the characteristic of biomass and classification of bioenergy through direct combustion and gasification as an alternative power supply. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1831/1/012033
- Telefónica. (14 de Septiembre de 2022). *Telefónica*. Obtenido de <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/que-son-las-energias-renovables-y-cuantos-tipos-hay/>
- Winters, P. R. (Abril de 1960). Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages. *Management Science*, 6(3), 324-342. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/2627346>

## 6. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Generación con fuentes renovables por CC.AA. Fuente: Red Eléctrica, marzo 2023.....	3
Figura 2: Localización geográfica e imagen aérea de Biomasa de Cantabria. Fuente: Biomasa de Cantabria. ....	7
Figura 3: Distribución de las distintas partes en Biomasa de Cantabria. Fuente: Biomasa de Cantabria .....	8
Figura 4: Diagrama de flujo del proceso productivo .....	11
Figura 5: Esquema de la caldera. Fuente: Biomasa de Cantabria .....	13
Figura 6: Entrada de arena a la caldera. Fuente: Elaboración propia, marzo 2025 .....	15
Figura 7: Silo de cenizas y recogida posterior. Fuente: Elaboración propia, marzo 2025 .....	15
Figura 8: Esquema de trabajadores de la empresa. Fuente: Biomasa de Cantabria .....	17
Figura 9: Relación capacidad/coste de las principales plantas de biomasa en España. Fuente: Elaboración propia .....	28
Figura 10: : Valores de LCOE según tecnología utilizada, (Patil, y otros, 2017); (MITECO, El MITECO saca a información pública la propuesta de Hoja de Ruta de la Eólica Marina y las Energías del Mar, 2021).....	42
Tabla 1: Consumo de biomasa en función de la humedad. Fuente: Manual de operación (Biomasa de Cantabria), febrero 2013.....	14
Tabla 2: Consumos de gas. Fuente: Manual de Operación (Biomasa de Cantabria) .....	16
Tabla 3: Valores de n según la industria. Fuente: (Remer, 1990) .....	26
Tabla 4: Coste de las principales plantas de biomasa en España. Fuente: Elaboración propia .....	27
Tabla 5: Costes, capacidades e índices conocidos de la fórmula de Holt-Winters .....	32