



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

---

**ESTUDIO Y DISEÑO DE LAS  
INSTALACIONES DE UNA  
PLANTA DE BIOMASA**

**Alumno: David García Gaitán**

**Tutor:** Manuel Valverde Ibáñez

**Depto.:** Ingeniería Eléctrica

**Septiembre, 2018**



## RESUMEN

*“LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE FORMA RENOVABLE ES UNA DE LAS MEJORES MANERAS DE, ENTRE OTRAS CUESTIONES, COMBATIR LA CONTAMINACIÓN, CREAR UN SISTEMA DESCENTRALIZADO ELÉCTRICO, CONVERTIR RESIDUOS TÓXICOS EN COMBUSTIBLES APROVECHABLES, UTILIZAR LOS PROPIOS RECURSOS DE UNA ZONA CONCRETA SIN NECESIDAD DE DEPENDER DE IMPORTACIONES, CREAR EMPLEO EN ZONAS RURALES..., EN DEFINITIVA AL HABLAR DE GENERACIÓN DE ENERGÍA UTILIZANDO ENERGÍAS RENOVABLES ESTAMOS HABLANDO DE APOSTAR POR EL FUTURO DEL PLANETA; TODO ESTO ES TENIDO EN CUENTA YA QUE EN ESTE PROYECTO SE TRABAJA CON LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO UN RESIDUO COMO ES EL ORUJILLO, OBTENIENDO 10 MW.*

*SE UTILIZA UN CICLO RANKINE, CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS Y EQUIPOS ADAPTADOS AL CICLO.*

*POR OTRO LADO, EN EL DOCUMENTO TAMBIÉN SE ANALIZA: EL MEJOR EMPLAZAMIENTO PARA LA INSTALACIÓN, IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y SOCIAL QUE TENDRÍA EN LA ZONA, ESTUDIO ECONÓMICO, TIPO DE TECNOLOGÍA MÁS CONVENIENTE Y ANÁLISIS DAFO.”*

## SUMMARY

*“THE GENERATION OF ELECTRIC POWER IN A RENEWABLE MANNER IS ONE OF THE BEST WAYS OF, AMONG OTHER MATTERS, TO COMBAT POLLUTION, CREATE A DECENTRALIZED ELECTRICAL SYSTEM, CONVERT TOXIC RESIDUES IN COMBUSTIBLES, USING THE OWN RESOURCES OF A CONCRETE AREA WITHOUT THE NEED TO DEPEND ON IMPORTS, CREATE EMPLOYMENT IN RURAL ZONES ..., DEFINITELY IN TALKING ABOUT ENERGY GENERATION USING RENEWABLE ENERGIES WE ARE TALKING ABOUT BETTING FOR THE FUTURE OF THE PLANET; ALL THIS IS TAKEN INTO ACCOUNT SINCE THIS PROJECT IS WORKING WITH THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY USING A WASTE AS THE ORUJILLO (OLIVE MARC), OBTAINING 10 MW.*

*A RANKINE CYCLE IS USED, WITH ITS RESPECTIVE CALCULATIONS AND EQUIPMENT ADAPTED TO THE CYCLE.*

*ON THE OTHER HAND, THE DOCUMENT ALSO ANALYZES: THE BEST POSITIONING FOR THE INSTALLATION, ENVIRONMENTAL AND SOCIAL IMPACT THAT WOULD HAVE IN THE AREA, ECONOMIC STUDY, MOST CONVENIENT TYPE OF TECHNOLOGY AND SWOT ANALYSIS.”*

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ciclo renovable de la biomasa .....	11
Ilustración 2 Curva demográfica de Montilla (1900 - 2016) .....	12
Ilustración 3 Principales aplicaciones de la biomasa.....	14
Ilustración 4 Producción de energía a partir de biomasa en Europa.....	15
Ilustración 5 Producción eléctrica a partir de biomasa en Europa.....	16
Ilustración 6 Evolución del consumo mundial de energía primaria.....	18
Ilustración 7 Empleo en energías renovables en el mundo (2012 – 2016).....	19
Ilustración 8 Empleo mundial, por sectores, dedicado a las energías renovables .....	20
Ilustración 9 Producción eléctrica con recursos renovables en España.....	20
Ilustración 10 Generación renovable sobre la generación total en España y miembros de ENTSO-E (%).....	21
Ilustración 11 Producción y consumo de Energía Primaria (KTEP).....	22
Ilustración 12 Consumo de Energía Primaria (KTEP).....	21
Ilustración 13 Producción Interior de Energía Primaria (KTEP).....	22
Ilustración 14 Energía del mar y la tierra. Sistema eléctrico nacional (GWh).....	22
Ilustración 15 Niveles de empleo estimado en 2020.....	24
Ilustración 16 Consumo de energía primaria en 2015.....	24
Ilustración 17 Estructura de generación eléctrica en 2015.....	25
Ilustración 18 Número de instalaciones de Biomasa en España .....	25
Ilustración 19 Potencia instalada de Biomasa (en kW) en España.....	26
Ilustración 20 Comparativa del consumo de energía primaria entre la UE, España y Andalucía.....	27
Ilustración 21 Comparativa de los sectores energéticos entre la Unión Europea, España y Andalucía.....	28
Ilustración 22 Mapa del potencial de biomasa en Andalucía.....	28
Ilustración 23 Potencia instalada de Biomasa (en kW) en Andalucía.....	29
Ilustración 24 Aplicaciones de las que dispone la biomasa.....	29
Ilustración 25 Proceso de extracción del aceite de oliva en tres fases.....	33
Ilustración 26 Porcentaje según la superficie de olivar de cada país.....	34
Ilustración 27 Distribución según la superficie de olivar (ha) de cada comunidad autónoma española.....	34
Ilustración 28 Porcentaje según las provincias españolas en referencia a la superficie de olivar.....	35
Ilustración 29 Representación de las dos provincias con mayor superficie de olivar.....	36
Ilustración 30 Localización del municipio cordobés de Montilla.....	36

Ilustración 31 Afluentes que transcurren por el término municipal de Montilla.....	37
Ilustración 32 Ubicación de la Planta de Biomasa con respecto al municipio más cercano (Montilla).....	37
Ilustración 33 Ubicación y referencia de la planta con respecto a ríos, carreteras y municipios próximos....	38
Ilustración 34 Trayecto entre la planta de biomasa y la Cooperativa “La Unión” .....	38
Ilustración 35 Acceso principal a la planta (CO-5209).....	39
Ilustración 36 Parcela de la planta (vista satélite) .....	39
Ilustración 37 Referencia catastral de la parcela.....	40
Ilustración 38 Referencia catastral del inmueble.....	40
Ilustración 39. Principales aplicaciones de la aceituna.....	41
Ilustración 40 Representación de los principales procesos en una planta de biomasa.....	44
Ilustraciones 41 y 42 Diagramas del ciclo de Carnot.....	46
Ilustración 43 Sobrecalentamiento en el ciclo Rankine.....	47
Ilustración 44 Disminución de la presión del condensador en el ciclo Rankine.....	48
Ilustración 45 Diagrama T - S empleado en nuestra planta de biomasa.....	48
Ilustración 46 Diagrama de los principales componentes de una central térmica.....	51
Ilustración 47 Ciclo Rankine.....	52
Ilustración 48 Comparativa de los principales componentes de la Gasificación y Combustión.....	53
Ilustración 49 Etapas de la combustión.....	55
Ilustración 50. Esquema de una planta de producción de electricidad con biomasa.....	55
Ilustración 51 Estator y rotor.....	58
Ilustración 52 Alternador recomendado.....	59
Ilustración 53 Turbina recomendada.....	59
Ilustración 54 Condensador.....	60
Ilustración 55 Componentes de un eyector.....	61
Ilustración 56. Condensador recomendado.....	61
Ilustración 57 Resumen de la distribución de los principales equipos de una central.....	62
Ilustración 58 Caldera recomendada.....	65
Ilustración 59 Evolución de precios medios (€/t) de biomasa para usos térmicos.....	74
Ilustración 60 Datos de comparación de la evolución de precios (c€/kWh).....	74
Ilustración 61 Ciclo Rankine resumen de la planta.....	76
Ilustración 62 Ciclo Rankine.....	81
Ilustración 63 Factor de potencia.....	81

Ilustración 64 Alternador recomendado.....	82
Ilustración 65 Características del alternador recomendado.....	83
Ilustración 66 Turbina recomendada.....	84
Ilustración 67 Turbina recomendada.....	84
Ilustración 68 Características de la turbina recomendada.....	84
Ilustración 69 Caldera recomendada.....	86
Ilustración 70 Diagrama T – S empleado en la planta de biomasa.....	86
Ilustración 71 Diagrama T – S real Rankine.....	87
Ilustración 72 Situación del punto 4 en el diagrama T – S empleado.....	89
Ilustración 73 Condensador empleado.....	93
Ilustración 74 Características del condensador utilizado.....	93
Ilustración 75 Características de la bomba de condensado empleada.....	94
Ilustración 76 Características de la bomba de condensado empleada.....	94
Ilustración 77 Campo de aplicación de las bombas de condensado KSB a 50 Hz.....	95
Ilustración 78 Características de la bomba de condensado 400 – 440 B.....	95
Ilustración 79 Características de la bomba de condensado 400 – 440 B.....	96
Ilustración 80 Torre de refrigeración recomendada.....	97
Ilustración 81 Principales características de la torre de refrigeración.....	97
Ilustración 82 Principales requisitos que debe cumplir la bomba de alimentación que buscamos.....	97
Ilustración 83 Principales características de la bomba de alimentación.....	98
Ilustración 84 Tablas de bomba de alimentación.....	99
Ilustración 85 Ficha técnica del alternador utilizado.....	100
Ilustración 86 Ficha técnica de la turbina utilizada.....	101
Ilustración 87 Ficha técnica de la caldera empleada.....	102
Ilustración 88 Ficha técnica del condensador empleado.....	103
Ilustración 89 Ficha técnica de la bomba de alimentación empleada.....	104
Ilustración 90 Ficha técnica de la bomba de condensado empleada.....	105
Ilustración 91 Ficha técnica de la torre de refrigeración empleada.....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles de empleo estimado en 2020.....	23
Tabla 2 Generación eléctrica a partir de Biomasa en Andalucía (Junio, 2017).....	30
Tabla 3 Municipios cordobeses con plantas de generación eléctrica a partir de biomasa.....	30
Tabla 4 Legislación reciente sobre biomasa.....	32
Tabla 5 Coordenadas geográficas y UTM de la planta de biomasa.....	38
Tabla 6 Principales características sobre la parcela de la planta de biomasa.....	41
Tabla 7 Principales equipos de una central térmica.....	51
Tabla 8 Instalaciones imprescindibles en una central térmica.....	51
Tabla 9 Equipos utilizados en el proceso de combustión.....	55
Tabla 10 Tipo de enfriamiento en el condensador.....	60
Tabla 11 Ventajas de la caldera Vitomax 200-HS.....	64
Tabla 12 Coeficientes entre empleo y MW.....	66
Tabla 13 Factores de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	68
Tabla 14 Emisiones evitas de CO <sub>2</sub> , en toneladas.....	68
Tabla 15 Valores límite de emisión (mg/Nm <sup>3</sup> ) para las nuevas instalaciones de combustión.....	70
Tabla 16 Valores límite de emisión (mg/Nm <sup>3</sup> ) para los motores y las turbinas de gas nuevo.....	71
Tabla 17 Análisis DAFO.....	75
Tabla 18 Principales características de la planta.....	76
Tabla 19 Valores estándar impuestos en la planta de biomasa.....	87
Tabla 20 Condiciones en cada punto del diagrama Rankine.....	87
Tabla 21 Valores del punto 3 a 500°C y 100 bar.....	88
Tabla 22 Tabla resumen de los principales puntos del ciclo Rankine.....	91
Tabla 23 Requisitos que debe cumplir el condensador requerido.....	93
Tabla 24 Propiedades del agua saturada (líquido y vapor).....	107
Tabla 25 Propiedades del agua saturada (líquido y vapor).....	108
Tabla 26 Propiedades del agua saturada (líquido y vapor).....	109
Tabla 27 Propiedades del vapor recalentado.....	109
Tabla 28 Propiedades del vapor recalentado.....	110

# ÍNDICE DEL DOCUMENTO

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
2. CAPÍTULO II. DESARROLLO DE LA PLANTA DE BIOMASA.....	10
2.1. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	10
2.1.1. ¿Qué es la biomasa?	
2.1.2. ¿Por qué biomasa?	
2.1.3. Tipos de biomasa	
2.1.4. Principales aplicaciones de la biomasa	
2.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL.....	17
2.2.1. Situación de la energía renovable en España	
2.2.2. Biomasa en España	
2.2.3. Biomasa en Andalucía	
2.2.4. Legislación reciente relacionada con biomasa	
2.3. ESTUDIO DE LA PLANTA DE BIOMASA.....	33
2.3.1. Localización	
2.3.2. Situación exacta de la planta	
2.3.3. Diagrama de los distintos sistemas	
2.3.4. Ciclo Carnot y mejoras	
2.3.5. Ciclo Rankine	
2.3.6. Objetivos y clasificación de una central térmica	
2.3.7. Componentes principales de una central térmica	
2.3.8. Grupo turbina-alternador	
2.3.8.1. Alternador recomendado	
2.3.8.2. Turbina recomendada	
2.3.9. Condensador	
2.3.9.1. Condensador recomendado	
2.3.10. Generador	
2.3.11. Caldera	
2.3.11.1. Tipo de caldera recomendada	
2.4. IMPACTO SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL.....	66
2.5. ESTUDIO ECONÓMICO.....	72
2.6. ANÁLISIS DAFO.....	75
2.7. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.....	76
2.7.1. Datos técnicos principales de la planta	
2.7.2. Ciclo Rankine resumen de la planta	
3. CAPÍTULO III. CONCLUSIONES.....	77
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
5. ANEXOS.....	81
5.1. ANEXO I: CÁLCULOS.....	81
5.2. ANEXO II: FICHAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS.....	100
5.3. ANEXO II: GRÁFICOS.....	107

## **OBJETIVOS**

Este Trabajo Fin de Grado pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- ✓ Analizar el marco normativo actual para las plantas de generación eléctrica con biomasa procedente del olivar.
- ✓ Determinar el tipo de tecnología y la ubicación de la planta biomasa más adecuada para el recurso existente en la zona.
- ✓ Analizar la viabilidad económica para las instalaciones de la planta de biomasa a través de los principales indicadores de rentabilidad.
- ✓ Calcular las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y establecer la repercusión que la instalación genera en la región.

## **1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

A diferencia de las últimas décadas, en los últimos años estamos viviendo una gran cantidad de cambios en cuanto a los recursos energéticos con los que se busca producir energía (principalmente eléctrica) impulsados por el cambio climático y la limitación de fuentes no renovables como es el caso de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural).

Estas fuentes de producción de energía eléctrica que la sociedad lleva explotando durante todo el siglo XX ahora ven cierto peligro gracias a la consciencia del planeta, impulsado desde las pequeñas acciones llevadas a cabo en nuestro día a día hasta las grandes plantas de generación de energía eléctrica a través de recursos renovables. Todos estos hechos se ven engrandecidos con políticas medioambientales como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero acordado en el Protocolo de Kioto (desde 1997), el Acuerdo de París sobre el cambio climático (Diciembre de 2015) o la reciente normativa de estrategia de la Unión Europea relativa a la calefacción y a la refrigeración (Febrero de 2016).

Las energías renovables deben de ser el motor encargado de cambiar el rumbo del planeta evitando emitir millones de toneladas de gases contaminantes a la atmósfera, así como permitir tener energías inagotables que lleguen a cualquier zona del planeta construyendo un mundo más igualitario, saludable y respetuoso con el medio ambiente.

En cuanto a la producción de energía eléctrica con biomasa podemos decir que es una de las mejores formas de poder conseguir un desarrollo en Andalucía generando un servicio que crea una gran cantidad de puestos de trabajo comparado con otras fuentes de energía no renovable en zonas rurales (se crean 14 puestos de trabajo con biomasa por cada puesto de trabajo con combustibles fósiles), evita riesgos de incendios en nuestros bosques y respeta al medio ambiente al no emitir emisiones de CO<sub>2</sub> y además se aprovecha un recurso autóctono local. Concretando más, y estudiando la situación de la Provincia de Córdoba debemos destacar la importancia de aprovechar recursos que hoy en día aún no llegan a aprovecharse en su totalidad como puede ser el orujillo, un derivado del orujo que debe de utilizarse como combustible en una planta de biomasa ya que si no se le da una utilidad se convierte en un residuo contaminante.

En este trabajo fin de grado se estudia la generación de energía eléctrica a partir de orujillo, en una zona que está sufriendo el éxodo de población a grandes núcleos y que busca sus propios recursos energéticos para obtener energía y generar empleo. Además, en dicho proyecto también se tiene en cuenta el cálculo del ciclo Rankine elegido para la instalación, la tecnología más interesante para el proceso y los principales equipos que necesita, la legislación más reciente relacionada con biomasa, así como el estudio de viabilidad y el impacto medioambiental y social.

## **2. CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE LA PLANTA DE BIOMASA**

### **2.1. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA**

#### 2.1.1. ¿Qué es la biomasa?

Según la RAE: “Materia orgánica en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía”.

Según APPA (Asociación de empresas de energías renovables): “La biomasa es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.”

#### 2.1.2. ¿Por qué biomasa?

Debido a la crisis energética provocada por los principales métodos de producir energía (carbón, gas y petróleo) en cuanto a contaminación, cambio climático y dependencia de recursos no renovables, es incuestionable no conseguir otras formas de producir energía. Para ello las energías renovables tienen un papel fundamental siendo la energía eólica, solar, hidráulica, geotérmica, mareomotriz y biomasa las que parten con mayor ventaja.

En el caso de la biomasa podemos apreciar diferentes ventajas sobre otras formas de producir energía, por un lado como acabamos de mencionar, es una fuente de energía renovable, por lo que podemos disponer de una gran cantidad de recursos disponibles siempre y cuando tengamos un equilibrio entre lo que se produce y entre lo que se utiliza teniendo en cuenta siempre el mantenimiento y desarrollo sostenible de los cultivos con los que se trabaje; por otro lado, en tener un balance neutro de CO<sub>2</sub> por lo que no contribuye al efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual, además la biomasa tiene un precio mínimo a la hora de obtener los recursos naturales con los que trabajamos ya que en muchos casos conseguimos obtener energía de un residuo. Hay que tener en cuenta la posibilidad de utilizar tierras que están abandonadas actualmente para utilizarlas como terreno con cultivos energéticos, y la gran posibilidad a revitalizar socioeconómicamente zonas rurales que actualmente sufren de una gran migración a los principales núcleos urbanos.

#### Ventajas de la utilización sostenible de la biomasa

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, si se utiliza de forma sostenible puede suponer las siguientes ventajas:

- Aspectos medioambientales
  - Disminución de las emisiones de azufre.
  - Disminución de las emisiones de partículas.
  - Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX.
  - Menos emisiones de CO<sub>2</sub>, desacelerando el efecto invernadero.

- Reducción de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles. Reducción de riesgos de incendios forestales (si se plantea respetando los equilibrios naturales).
- Aprovechamiento de residuos agrícolas (olivos, árboles frutales, etc.) o forestales.
- Posibilidad de utilización de tierras abandonadas o desertizadas con cultivos energéticos.

La Biomasa tiene balance neutro en CO<sub>2</sub>, en su combustión se libera sólo la cantidad de CO<sub>2</sub> que se había captado de la atmósfera por la fotosíntesis y el efecto de la luz, cambiándose por el oxígeno.

Por eso la biomasa es energía solar almacenada, la energía del sol es capturada por la biomasa; (por los árboles); y se crea la madera formándose así la pila más perfecta de acumulación de energía solar. Es energía solar acumulada en la madera, en un sólido que se conserva, que se transporta y con múltiples utilidades.

La fotosíntesis como convertidor es el mejor y más importante transformador de energía del planeta.

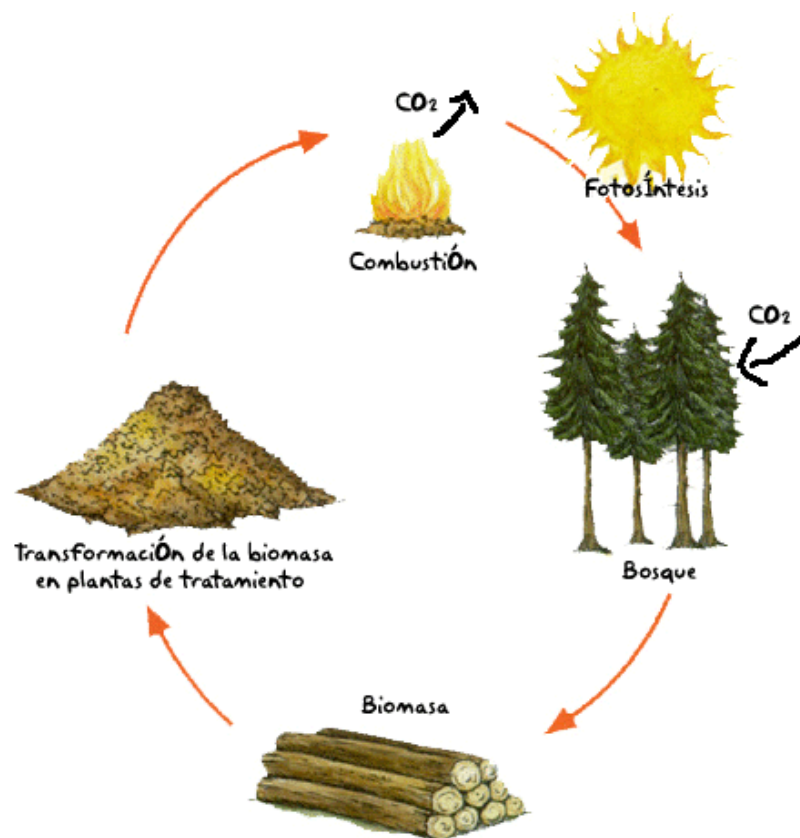


Ilustración 1. Ciclo renovable de la biomasa. Fuente: IMARTEC

○ Aspectos sociales

La implantación de una central de biomasa y la gestión y aprovechamiento del orujillo (residuo existente en la cooperativa “La Unión”, así como posible residuo de otras cooperativas cercanas) permiten la revitalización y desarrollo, generando puestos de trabajo estables que provocan una fuente de ingresos para la economía de la zona. Esta oferta de trabajo permite fijar núcleos de población activa en zonas rurales evitando así la migración a grandes núcleos y cambiar así la curva negativa demográfica de los últimos años de Montilla.

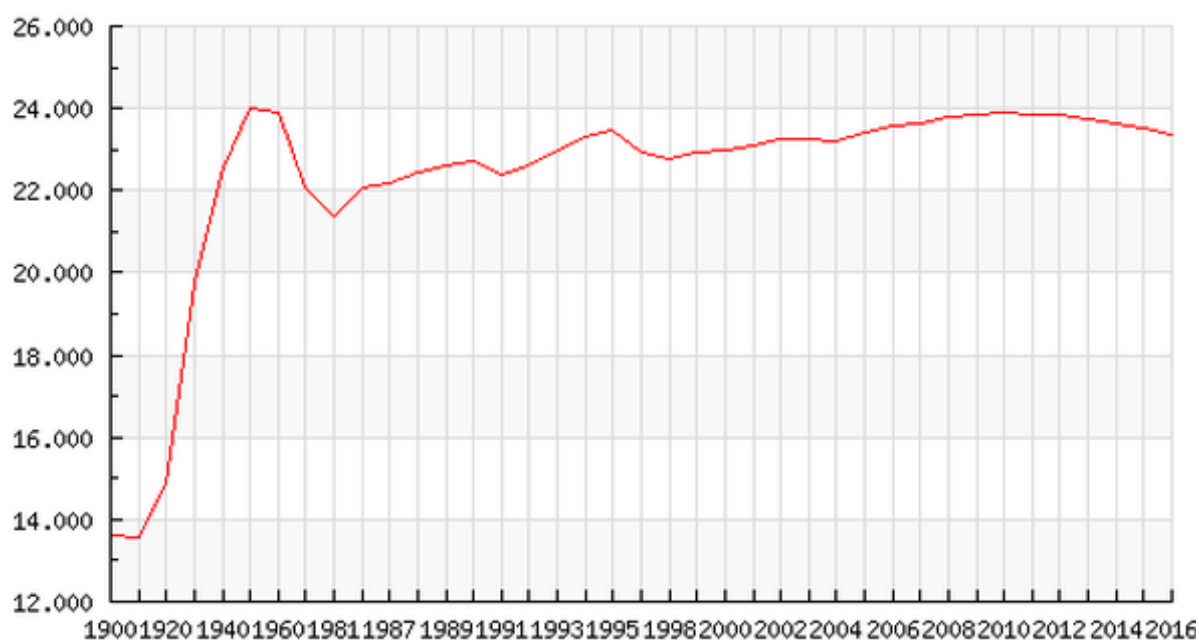


Ilustración 2. Curva demográfica de Montilla (1900 – 2016). Fuente: Foro-ciudad

Algunos de los beneficios socioeconómicos\*\* que aporta el uso de biomasa son:

- Oferta de empleo (directo e indirecto)
- Mano de obra durante la construcción de la planta
- Mano de obra de ingenieros en el diseño de la instalación y equipos a instalar
- Mano de obra para tareas de funcionamiento y mantenimiento una vez finalizada la planta
- Mano de obra en la obtención, tratamiento y transporte de la biomasa

○ Aspectos económicos

El aprovechamiento de la biomasa generada en España podría ser un factor determinante para la economía del país ya que el 70 % de la inversión se realiza con

*\*\*cálculos sobre el beneficio socioeconómico en el anexo I*

proveedores nacionales, por lo que se podría cambiar el modelo energético actual (contaminante y centralizado) a un modelo sostenible y sin importaciones de

combustibles, obteniendo de esta forma un producto nacional, mayor independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior, generando puestos de trabajo en España y evitando incendios (al utilizar residuos forestales).

Según ENCE si se aprovechase todo el potencial de biomasa en España destinándose a combustible para la generación eléctrica, supondría una mejoría en la balanza comercial de 1.350 millones de euros al año y se evitaría hasta 5 Mtep/año de importaciones energéticas:

- Ahorro en importaciones de energía, 1.150 M€/año
- Ahorro en derechos de emisiones de CO<sub>2</sub>, 200 M€/año

La biomasa es la fuente renovable más estable de todas, capaz de producir energía las 24 horas del día independientemente de las condiciones climatológicas.

### 2.1.3. Tipos de biomasa

La biomasa como materia orgánica originada en un proceso biológico tiene carácter de energía renovable porque su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Al romper los enlaces de los compuestos orgánicos, por combustión directa de biomasa o combustión de productos obtenidos de ella mediante transformaciones físicas o químicas para dar dióxido de carbono y agua como productos finales, se libera energía. La biomasa puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos procedentes de la biomasa que se usan con fines energéticos se denominan biocombustibles, especialmente aquellos sólidos y gases que se apliquen con fines térmicos y eléctricos.

La biomasa natural, abarca los bosques, árboles, matorrales y plantas de cultivo. Es por tanto aquella producida sin intervención humana. El problema que presenta este tipo de biomasa es la gestión y el transporte del recurso al lugar de uso, que puede provocar que la explotación de este tipo de biomasa sea inviable económicamente.

La biomasa residual es aquella generada en las actividades de agricultura y ganadería, en la industria forestal, la maderera y la agroalimentaria. Ejemplos de este tipo de biomasa pueden ser el serrín, las podas o aguas residuales urbanas. Existen dos tipos de biomasa residual, seca y húmeda.

- La biomasa residual seca, puede dividirse en tres grandes subgrupos: biomasa residual forestal (restos de las principales actividades silvícolas como son las podas o raleos), biomasa residual seca agrícola y biomasa residual seca de residuos de industrias agroalimentarias o de transformación de la madera.
- La biomasa residual húmeda que incluye a todos aquellos flujos residuales de origen orgánico resultantes de la actividad humana o animal, los cuales pueden darse en ciudades (agua residual urbana), industrias (residuos industriales biodegradables) e instalaciones agropecuarias (residuos ganaderos). También lo son los desechos sólidos urbanos (basura orgánica).

Los biocombustibles: Son los productos procedentes de la biomasa y destinados a la automoción. Este tipo de productos tienen una gran importancia debido a su elevado consumo de carburantes derivados del petróleo para el transporte.

- Los biocombustibles sólidos: Los biocombustibles sólidos más importantes, combustibles de tipo primario, son los constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen este tipo de residuos.
- Los biocombustibles líquidos: Se denominan biocombustibles líquidos o biocarburantes a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sustitución de los derivados del petróleo o como aditivos de estos para su uso en motores.
- Los biocombustibles gaseosos: El biogás es una fuente de energía obtenida a base de desechos orgánicos. Cuenta con numerosos beneficios y es una forma de energía limpia y renovable. Se obtiene a partir de la digestión anaeróbica de los materiales orgánicos. Este recurso energético es una mezcla de dióxido de carbono y metano. Es utilizado como combustible, presenta un valor calorífico de 23 MJ/Kg y posee un potencial de calentamiento 25 veces superior al del dióxido de carbono.

#### 2.1.4. Las principales aplicaciones de la biomasa:

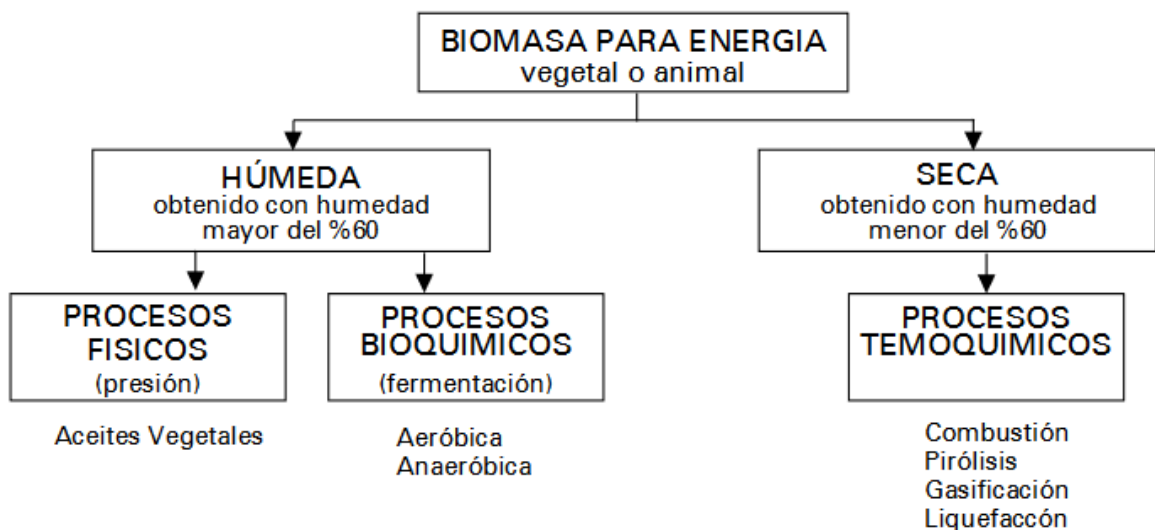
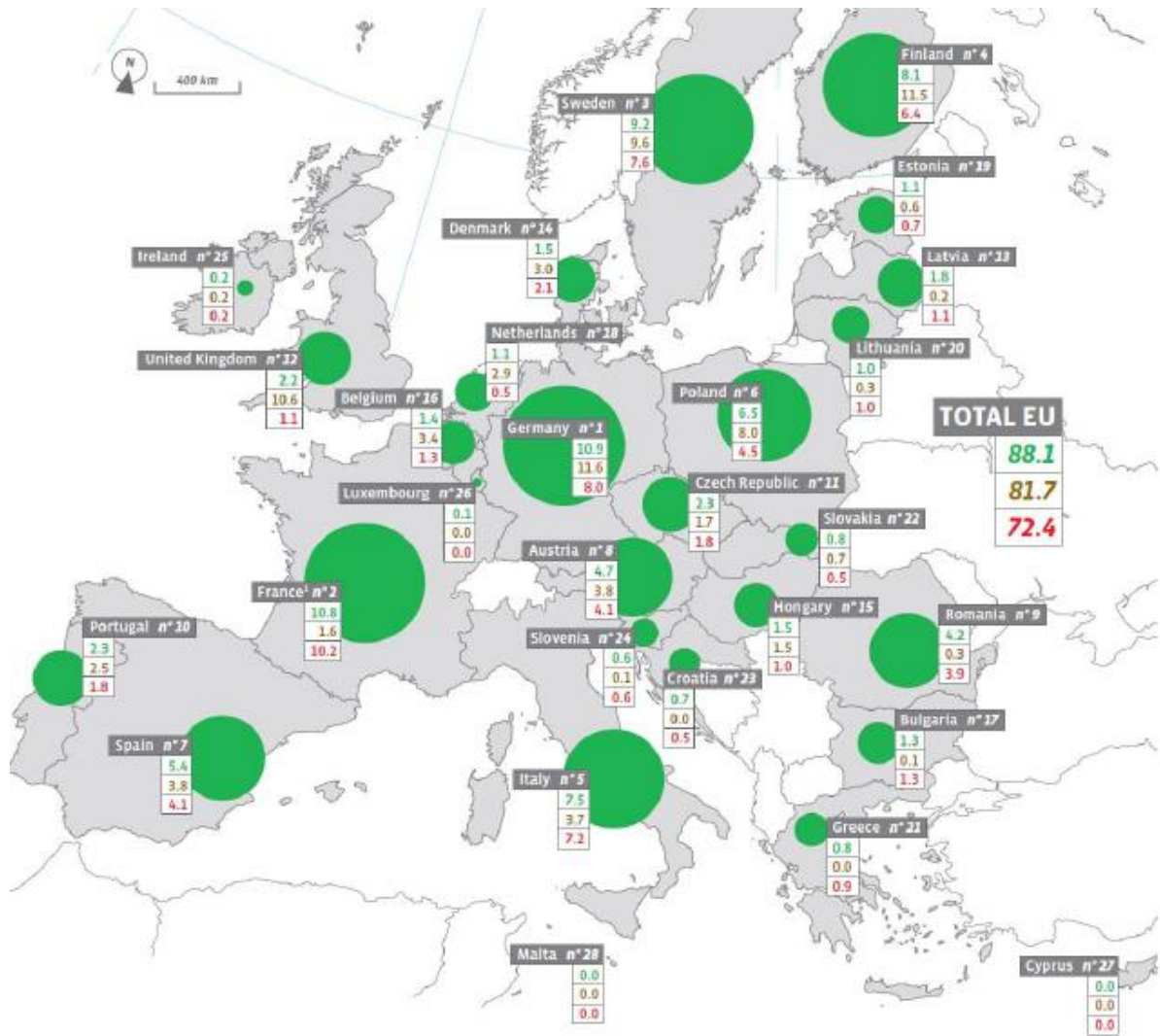


Ilustración 3. Principales aplicaciones de la biomasa. Fuente: EB Energía Biomasa



**Key**

- 9.2 Primary energy production of solid biomass in the European Union in 2013\* (Mtoe).
- 8.7 Heat consumption from solid biomass in the European Union in 2013\* (Mtoe).
- 1.5 Gross electricity production from solid biomass in the European Union in 2014\* (TWh).

\* Estimate. † Overseas departments not included. Source: EurObserv'ER 2014

Ilustración 4. Producción de energía a partir de biomasa en Europa. EurObserv'Er

- Producción térmica a través de la biomasa
  - Instalaciones industriales que producen calor a través de biomasa y donde se requiere energía térmica en sus procesos. Es el principal caso de uso de biomasa en España
  - Instalaciones industriales con necesidades de demandas de calor prolongadas para sus procesos.
  - Instalaciones del sector doméstico y de servicios con elevada centralización:
    - Edificios de entidad pública (colegios, hospitales, centros administrativos, etc.) con una ubicación que permita un fácil suministro del combustible.
    - Edificios de viviendas con sistemas de calefacción y agua caliente centralizados.



1. El 10 % de los combustibles usados en el transporte deben provenir de fuentes renovables.
2. obligar a los proveedores de combustibles a reducir la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero de sus combustibles en un 6 % para 2020.

## **2.2.SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL**

Debido a la crisis económica nacional e internacional de los últimos años y a la modificación en el nuevo PER (Plan de Energías Renovables) el mercado energético ha sufrido una gran variación.

En el actual PER (2011 – 2020) se establece un nuevo objetivo del 20 % en el consumo final bruto de energías renovables a alcanzar para 2020 tanto para la Unión Europea como para España y una cuota mínima del 10 % en el consumo de energía en el sector del transporte para 2020 en cada uno de los estados miembros.

Por su parte, la biomasa tras ser históricamente la principal fuente de energía, y aunque en el pasado siglo se viese reemplazada en parte por el petróleo, vuelve a coger gran importancia mundial, tanto en países del tercer mundo (teniendo actualmente el 80% de su consumo) como en los países desarrollados (en los que en muchos de ellos puede tener un porcentaje cercano al 20%).

*“...La Agencia Internacional de la Energía, en su publicación “World Energy Outlook 2008” se hacía eco del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) exponiendo que “algunos países pobres obtienen el 90% de su energía de la leña y otros biocombustibles” . Esta fuente de energía supone un tercio del consumo energético en África, Asia y Latinoamérica, siendo la principal fuente de energía en los hogares de 2.000 millones de personas. El problema de este uso de biomasa, en ocasiones de supervivencia, es su falta de desarrollo tecnológico y de eficiencia energética, situándose fuera de una planificación sostenible de su aprovechamiento, lo que conlleva la deforestación de grandes áreas con su consecuente grave impacto ambiental asociado.*

*De los 13,2 Gha de superficie mundial, más del 10% (1,5 Gha) se utiliza actualmente para cultivos y un 25% (3,54 Gha) para pastos de ganadería y otras producciones animales. Anualmente, alrededor de 7 u 8 Mha forestales se convierten en agrícolas.*

*Es evidente que, un desarrollo de las tecnologías y una planificación adecuada de los aprovechamientos de biomasa permitirían contrarrestar los efectos perniciosos de este mal uso generalizado y promovería un mercado maduro internacional, generando empleo, mejoras ambientales y el correspondiente desarrollo rural de zonas degradadas.*

*Las previsiones establecidas, entre otros, por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, establecen que antes de 2100 la cuota de participación de la biomasa en la producción mundial de energía debería estar entre el 25 y el 46%.*

*Según la publicación “2010 Survey of Energy Resources”, del World Energy Council, en el año 2008, la contribución de la biomasa (incluyendo usos tradicionales no eficientes) a nivel mundial alcanzaba los 1.194 Mtep de energía primaria, lo que suponía*

un 10% del total mundial, prácticamente el mismo porcentaje que en el año 2006 donde la biomasa sumaba 1.186 Mtep. Si descontamos la biomasa mediante usos tradicionales, la contribución de todas las energías renovables a nivel mundial baja significativamente, situándose alrededor del 7% del consumo de energía primaria mundial.

Del total de la contribución en 2008, el 75% provenía de leñas, carbón vegetal o restos forestales, el 10% de biomasa agrícola (residuos animales, vegetales y cultivos energéticos), un 12% correspondía a residuos de industrias forestales, licores negros o madera recuperada, y el biogás suponía una contribución del 3%.

La AIE dividía la contribución de la biomasa en 2006 según la siguiente división por aplicaciones:

Usos tradicionales (calefacción y cocina): 724 Mtep.

Usos modernos: 462 Mtep, divididos en:

- Biocarburantes: 24,4 Mtep.
- Calor utilizado directamente: 293 Mtep (188,6Mtep industriales y 104,4 Mtep en edificios).
- Electricidad y redes de calefacción: 80,7 Mtep (239 TWh).
- Pérdidas: 63,9 Mtep.

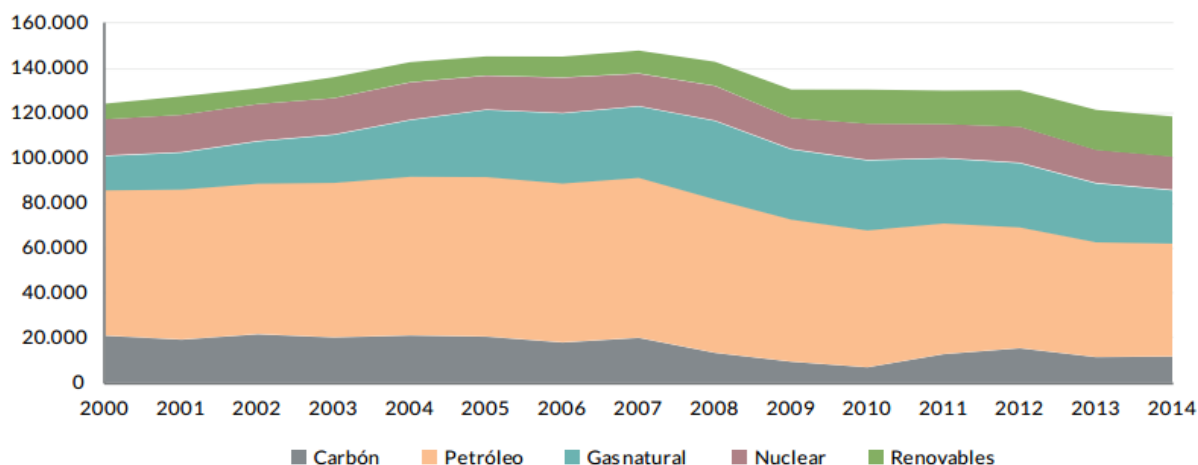


Ilustración 6. Evolución del consumo mundial de energía primaria.

Fuente: MINETUR

Mientras las empresas del petróleo, gas y minerías anuncian despidos, las firmas de la llamada energía verde, que agrupa desde la eólica hasta los paneles solares, no paran de contratar a gente: ya han creado unos ocho millones de empleos en el mundo. Es lo que se desprende de un reciente estudio de IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables)

La bajada de los precios del petróleo y la caída de la rentabilidad han obligado a dolorosos ajustes laborales en la energía fósil (basta con ver la hemeroteca de este diario). En el último año, se destruyeron más de 280.000 empleos en este sector, según la consultora Graves & Co. En cambio, las renovables permitieron la creación de 400.000 puestos de trabajo en todo el mundo en el 2015, un 5% más que el ejercicio anterior.

La industria fósil emplea todavía en el planeta a unos doce millones de personas, según fuentes sindicales. Pero en el plazo de un par de años, de mantenerse los actuales ritmos

de crecimiento, las renovables ya tendrán a más trabajadores en sus filas que las de la energía convencional. **EL SORPASSO SÓLO ES CUESTIÓN DE TIEMPO.**”

Fuente: Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020

Según IRENA, en el mundo ya **SE SUPERAN LOS 10 millones de empleos relacionados con las energías renovables**, Asimismo, sugiere que en 2030 se podría alcanzar la cifra de 24 millones de empleados.

Se sigue produciendo un crecimiento moderado en cuanto a las energías limpias

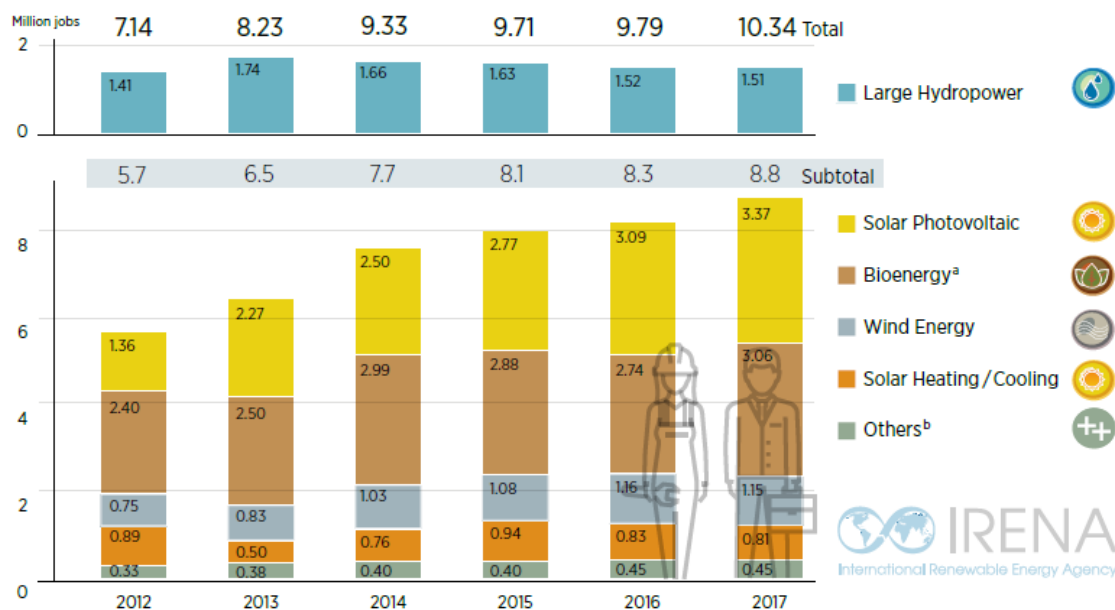


Ilustración 7. Empleo (en millones de personas) en energías renovables en el mundo (2012 – 2017).

Fuente: IRENA

Según IRENA: “Por sectores, es la industria fotovoltaica la que más empleo generó, con 3,1 millones de puestos de trabajo, un 12% más que en 2015. Este notable crecimiento se produjo principalmente en China, Estados Unidos e India, mientras que los empleos se redujeron por primera vez en Japón. Siguiendo la tendencia de 2015, el número de trabajadores en este sector siguió disminuyendo en la Unión Europea.

La energía eólica fue la responsable de dar trabajo a 1,2 millones de personas, lo que supone un aumento del 7%. Este incremento se produjo principalmente en Estados Unidos, Alemania, India y Brasil.

Los biocombustibles líquidos (1,7 millones de puestos de trabajo), la biomasa sólida (0,7 millones) y biogás (0,3 millones) son también grandes empleadores, con puestos de trabajo que se concentran en el suministro de materia prima. Brasil, China, Estados Unidos e India son los principales mercados de trabajo en bioenergía.”

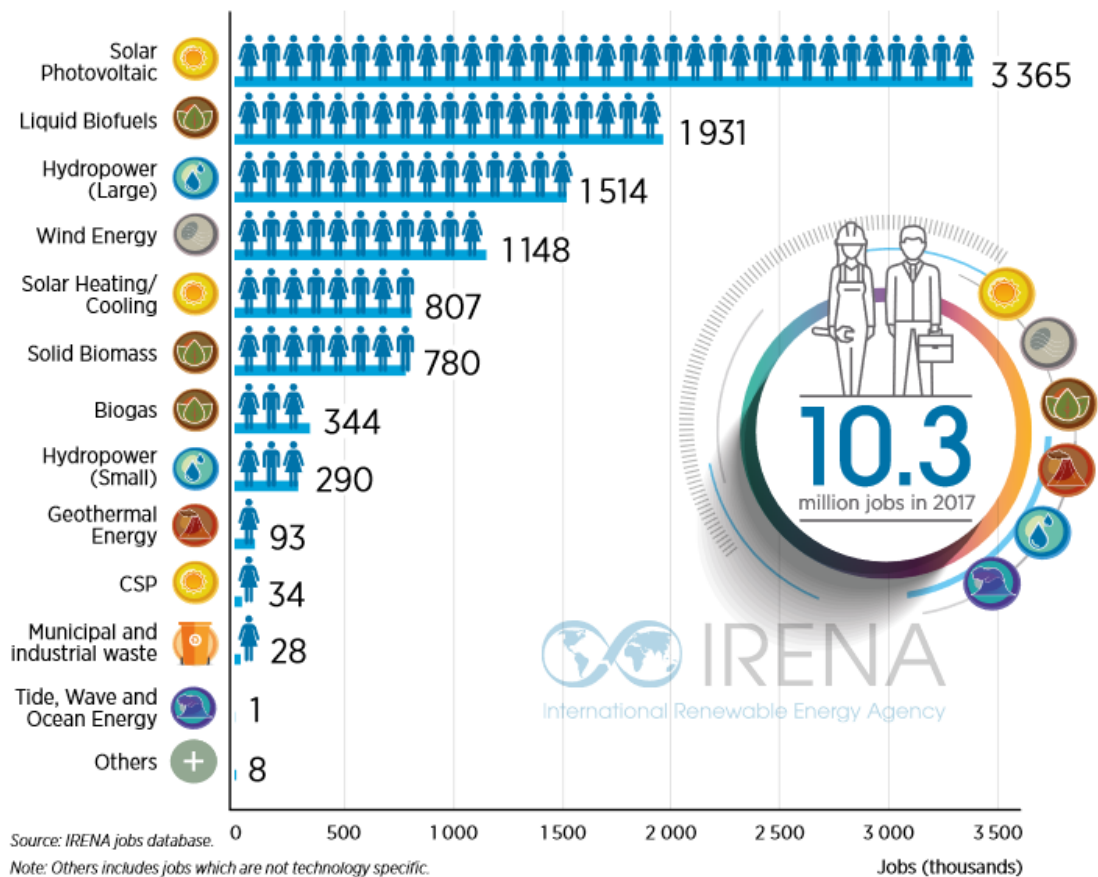


Ilustración 8. Empleo mundial, por sectores, dedicado a las energías renovables (en millones de personas). Fuente: IRENA

### 2.2.1. Situación de la energía renovable en España

La situación de España en cuanto a energías renovables ha tenido una leve mejoría en los últimos dos años (en los que el gobierno ha realizado varias subastas de energía renovable con la intención de llegar al objetivo marcado para el 2020) tras estar 5 años en una situación de parón por varios motivos (principalmente económicos y políticos).

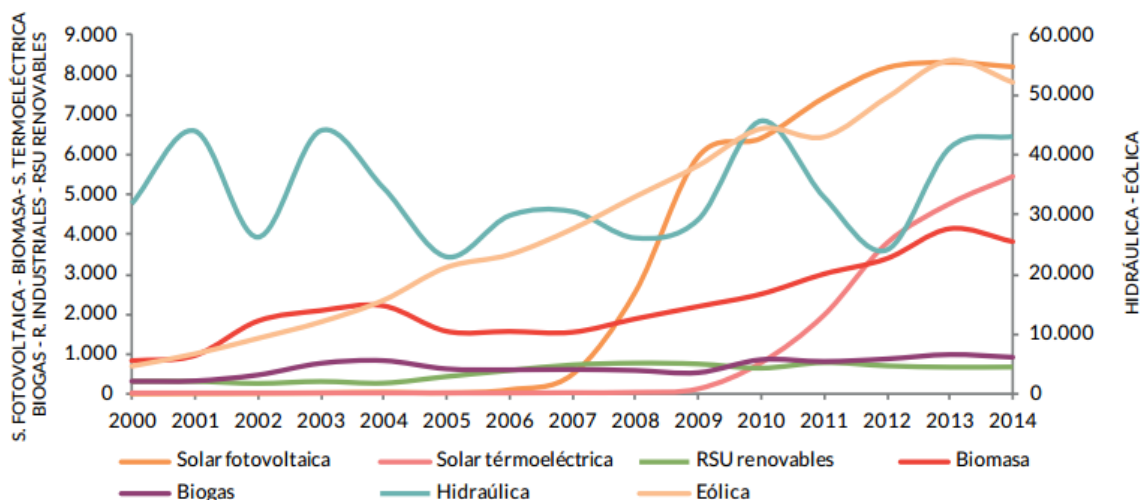
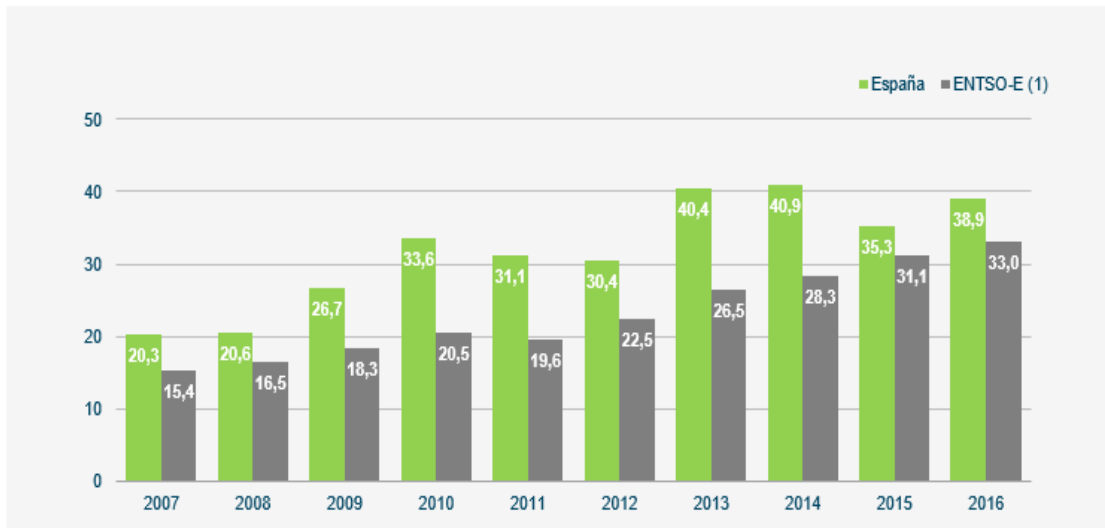


Ilustración 9. Producción eléctrica con recursos renovables en España. Fuente: IDAE



(1) Por indisponibilidad de datos para toda la serie de algunos países, el gráfico de evolución contiene información de: Alemania, Austria, Bélgica, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Francia, FYROM, Grecia, Holanda, Hungría, Italia, Luxemburgo, Polonia, Portugal, República Checa, Rumanía y Suiza. En España no se incluye la generación de bombeo.

Ilustración 10. Generación renovable sobre la generación total en España y en una selección de países miembros de ENTSO-E (%)

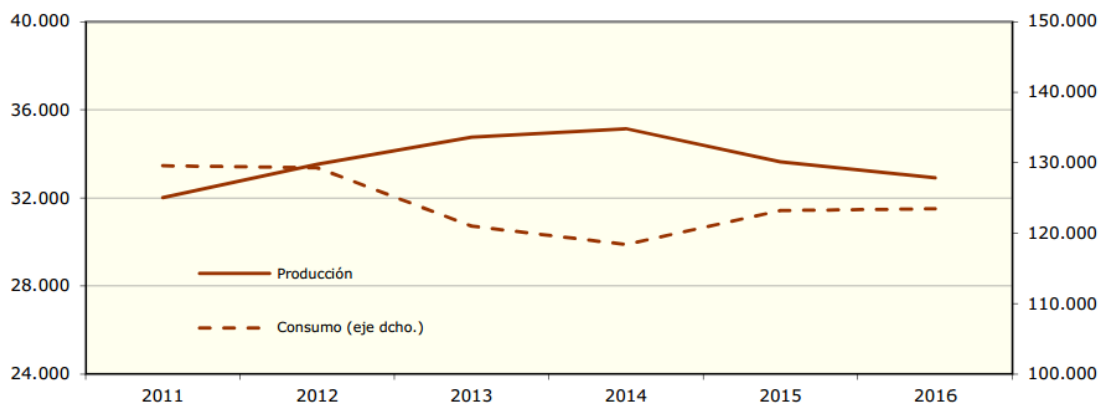


Ilustración 11. Producción y consumo de Energía Primaria (KTEP).  
Fuente: SEE

	2014	2015	Tasa de variación %
Carbón	11.639	14.426	23,9
Petróleo	50.447	52.434	3,9
Gas natural	23.662	24.590	3,9
Nuclear	14.934	14.927	-0,0
Hidráulica	3.369	2.397	-28,9
Eólica, Solar y Geotérmica	7.599	7.476	-1,6
Biomasa, biocarb. y resid. renovables	6.828	7.371	8,0
Residuos no renovables	204	260	27,5
Saldo imp-exp electricidad	-293	-13	-95,6
<b>TOTAL</b>	<b>118.389</b>	<b>123.868</b>	<b>4,6</b>

Ilustración 12. Consumo de Energía Primaria (KTEP).  
Fuente: SEE

	2014	2015	Tasa de variación %
Carbón	1.628	1.202	-26,1
Petroleo	311	236	-23,9
Gas Natural	21	54	160,2
Nuclear	14.934	14.927	-0,0
Hidráulica	3.369	2.397	-28,9
Eólica, solar y geotérmica	7.599	7.476	-2
Biomasa, biocarburantes y residuos	6.668	7.014	5,2
<b>TOTAL</b>	<b>34.529</b>	<b>33.306</b>	<b>-3,5</b>

Ilustración 13. Producción Interior de Energía Primaria (KTEP).

Fuente: SEE

Al observar el gráfico y las tablas de SEE correspondiente a la producción interior de energía primaria podemos destacar como disminuyó dicha producción en todos los sectores exceptuando el gas natural y la biomasa, biocarburantes y residuos

Concretando más y centrándonos en las energías provenientes del mar y de la tierra (biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables) podemos apreciar que tras el descenso de generación de energía en 2015 (en GWh) comienza a existir una recuperación en 2016 que es el último año del que disponemos de datos.

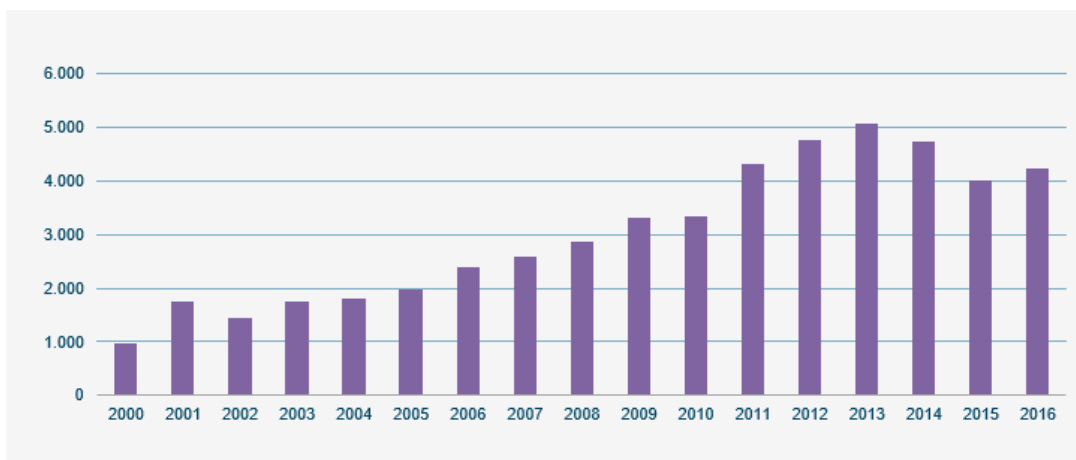


Ilustración 14. Energía del mar y la tierra (Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables). Sistema eléctrico nacional (GWh). Fuente: REE

### 2.2.2. Biomasa en España

En España, actualmente se estima que hay unos 70.000 puestos de trabajo de energía verde; con 29.500 trabajadores, la generación de energía con biomasa está a la cabeza. Le siguen la eólica, con 17.100, y la solar fotovoltaica, con 9.900, Por otra parte, un estudio de ISTAS-COO apuntaba a que se podrían crear unos **80.000 empleos si se impulsara el autoconsumo solar y la generación eléctrica distribuida** (a pesar de la injusta legislación española). También, un informe de la Agencia

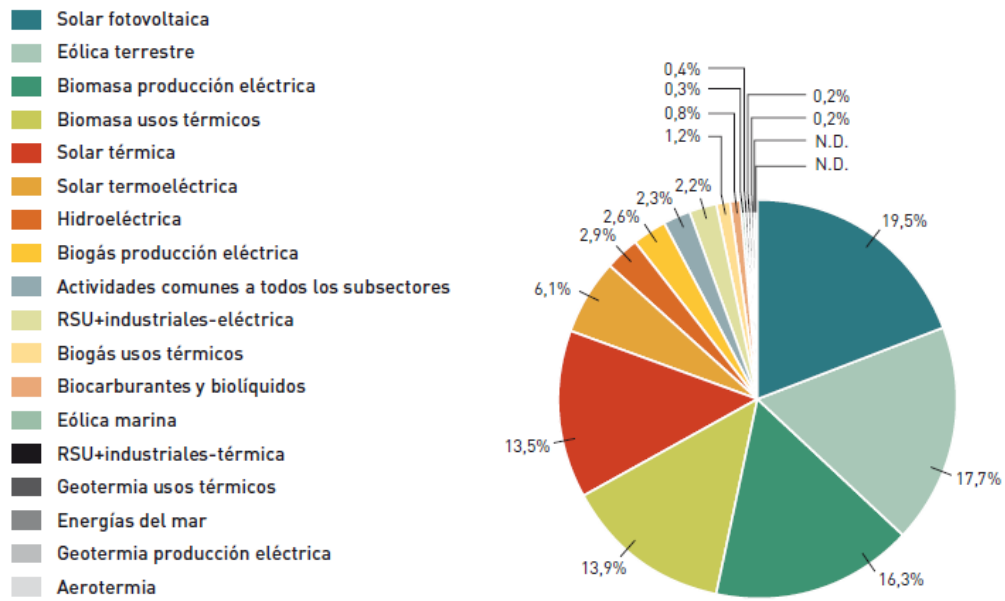
Internacional de la Energía (IRENA) sostiene que las energías renovables dan más trabajo que todos los combustibles fósiles juntos.

El coste de la energía solar está bajando y actualmente está por debajo de los 10 céntimos de euro/kWh en muchos lugares del mundo, lo que la hace competitiva frente al precio minorista y de ahí su éxito en todo el mundo, salvo en España por su bloqueo político.

Por su parte, las centrales de carbón en España no cumplen la ley, están contaminando más de lo permitido y provocan más de 1.500 muertes al año. El carbón supone en España el 10% de la potencia total instalada en el país, pero es responsable del 70% de las emisiones de dióxido de carbono de todo el sector productor de electricidad. Por citar un ejemplo, la térmica almeriense de **Carboneras** es una de las industrias más contaminantes de **España** y se estima que causa 177 muertes al año.

Subsectores Renovables	Niveles de empleo estimados por subsectores renovables en 2020, asociados a cada fase							
	Obtención del recurso		Construcción y desmantelamiento		Explotación		Total	Porcentaje
Solar fotovoltaica	X	X	35.006	15.753	5.699	2.564	59.022	19,5
Eólica terrestre	X	X	26.745	21.396	2.972	2.377	53.491	17,7
<b>Biomasa producción eléctrica</b>	<b>20.671</b>	<b>20.671</b>	<b>3.471</b>	<b>3.055</b>	<b>833</b>	<b>733</b>	<b>49.435</b>	<b>16,3</b>
Biomasa usos térmicos	17.715	17.715	1.087	957	2.417	2.127	42.017	13,9
Solar térmica	X	X	24.657	11.096	3.523	1.585	40.861	13,5
Solar termoeléctrica	X	X	7.269	4.362	4.320	2.592	18.543	6,1
Hidroeléctrica	X	X	5.863	2.638	120	54	8.675	2,9
Biogás producción eléctrica	X	X	3.819	3.914	108	111	7.952	2,6
Actividades comunes a todos los subsectores	X	X	3.836	2.446	426	272	6.980	2,3
Residuos	X	X	1.441	648	3.166	1.425	6.681	2,2
Biogás usos térmicos	X	X	1.700	1.742	48	49	3.539	1,2
Biocarburantes y biolíquidos	N.D.	N.D.	288	295	962	986	2.530	0,8
Eólica marina	X	X	573	458	64	51	1.146	0,4
Residuos +	X	X	186	84	410	184	864	0,3
Geotermia usos térmicos	X	X	385	150	45	18	598	0,2
Energías del mar	X	X	200	104	150	78	532	0,2
Geotermia producc. eléctrica	X	X	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0	0
Aerotermia	X	X	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0	0
<b>Total renovables</b>	<b>38.386</b>	<b>38.386</b>	<b>116.527</b>	<b>69.098</b>	<b>25.262</b>	<b>15.207</b>	<b>302.866</b>	<b>100,00</b>

Tabla 1. Niveles de empleo estimado en 2020. Fuente: IDAE/ISTAS



Fuente: IDAE/ISTAS

Ilustración 15. Niveles de empleo estimado en 2020. Fuente: IDAE

En cuanto al consumo de energía primaria podemos decir que también la biomasa es la energía con mayor representación seguida de la eólica e hidráulica.

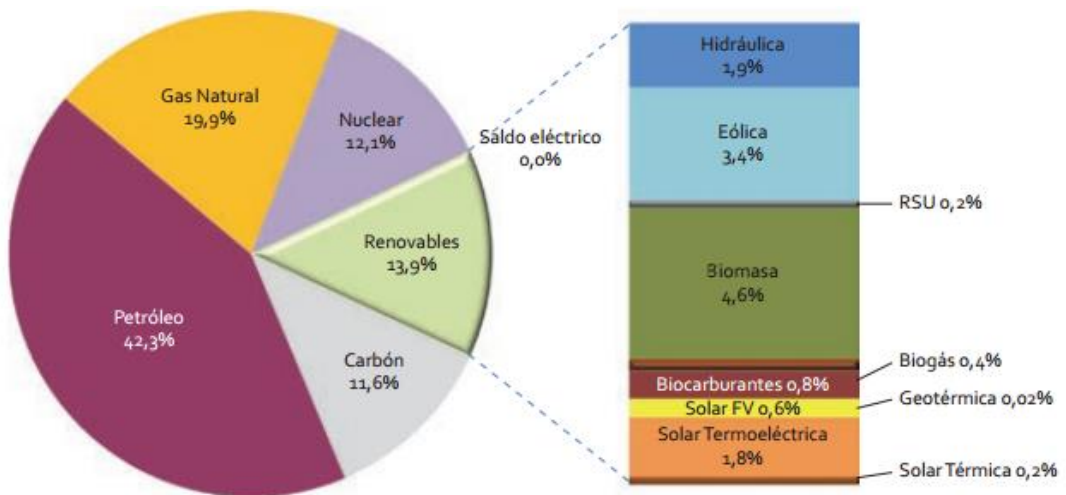


Ilustración 16. Consumo de energía primaria en 2015. Fuente: MINETUR, IDAE

En el siguiente gráfico podemos apreciar la estructura de generación eléctrica en 2015

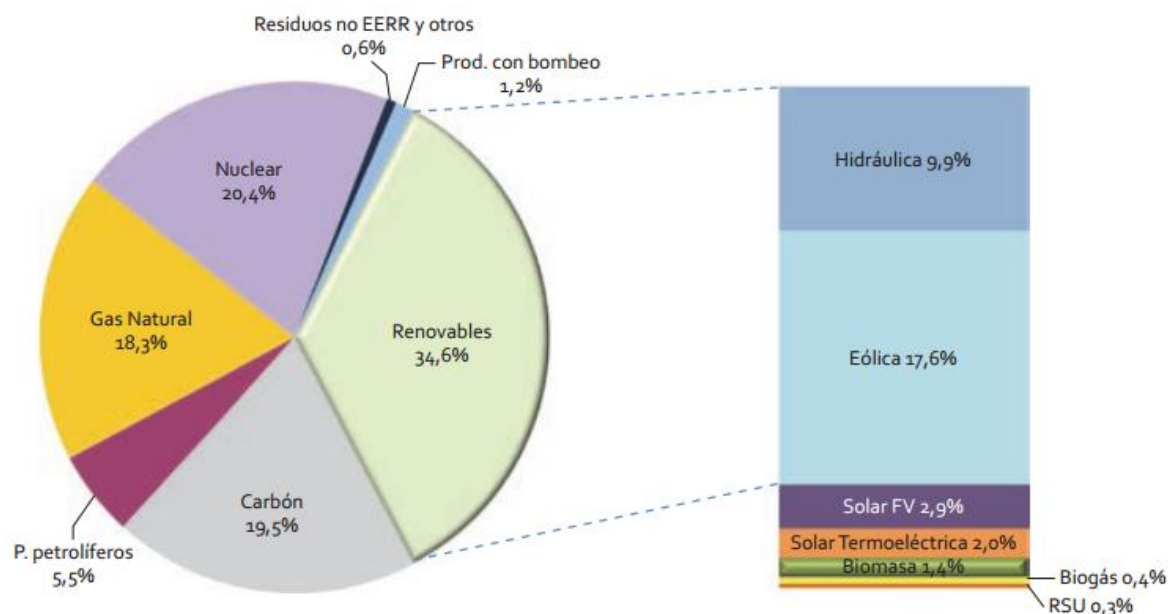


Ilustración 17. Estructura de generación eléctrica en 2015. Fuente: MINETUR, IDAE

Finalmente si estudiamos concretamente la situación de la biomasa en España podemos observar que ha existido un significativo incremento en el número de instalaciones y de potencia instalados.

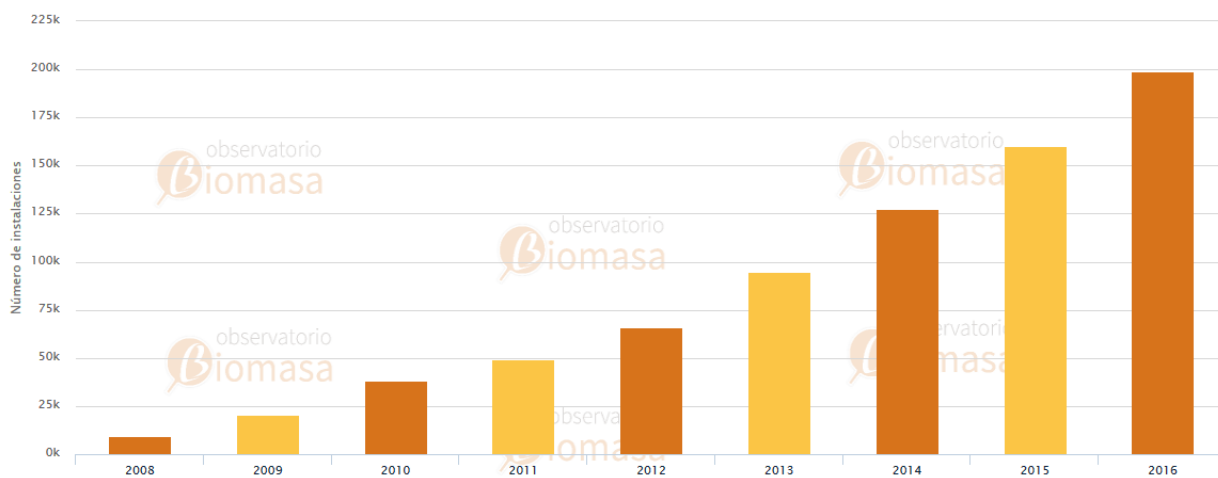


Ilustración 18. Número de instalaciones de Biomasa en España. Fuente: Observatorio Biomasa

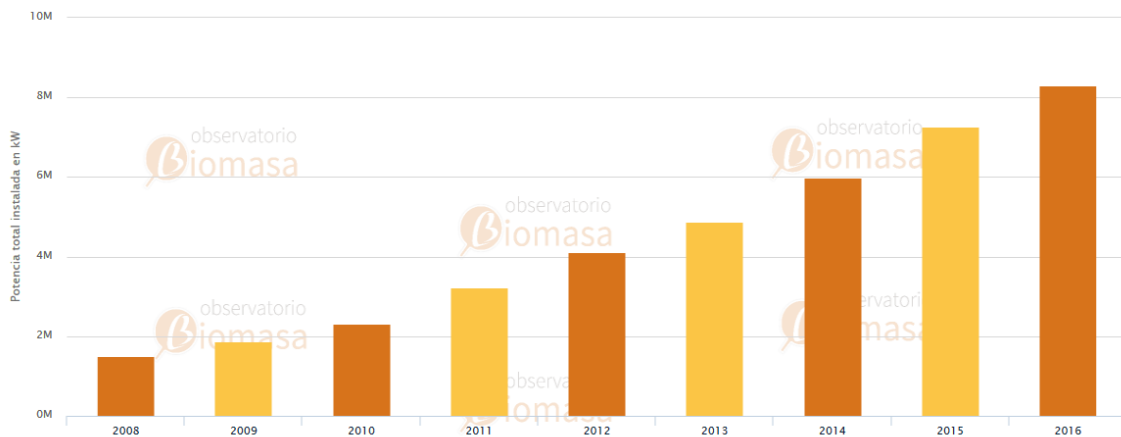


Ilustración 19. Potencia instalada de Biomasa (en kW) en España. Fuente: Observatorio Biomasa

El crecimiento que ha experimentado la biomasa al referirnos a potencia total instalada en España desde el año 2008 hasta el 2016 **supera el 500% pasando de 1.510.022 kW hasta más de 8.000.000 de kW.**

Una consecuencia clara del incremento en la potencia estimada de biomasa es la mejora en el número de instalaciones, ya que mientras que en 2014 el número de instalaciones de biomasa era ligeramente superior a las 125.000 instalaciones y la potencia de 6 M de kW, en apenas dos años, **en 2016, se ve incrementado hasta casi las 200.000 instalaciones y superando los 8 M de kW.**

Además si apreciamos los gráficos podemos observar un incremento elevado y constante de la biomasa, por lo que podemos ser optimistas en los próximos años.

*“...Respecto al sector industrial, dada la diversidad de situaciones y tipologías de los proyectos de biomasa, en la promoción de los mismos se deben ver implicados una gran variedad de agentes.*

*En los últimos años han comenzado a estar presentes como promotores, principalmente de proyectos de generación eléctrica entre 10 y 50 MW, entre otros, grandes o medianas empresas energéticas, o procedentes de otra actividad, pero sobre todo con experiencia previa en otras tecnologías renovables, así como industriales de sectores afines a la biomasa. Pero para que el sector de la biomasa se desarrolle en todas sus posibilidades, adicionalmente, deben implicarse suficientemente empresas de suministro de combustible, empresas de servicios energéticos, industriales de los diversos sectores, administraciones, particulares, etc.*

*Agrupando a los promotores, APPA, en su sección de biomasa, constituye la asociación que representa a este tipo de agentes, no solo a los promotores, sino a todos los agentes involucrados en el desarrollo de la biomasa (ingenierías, proveedores de equipos, entidades financieras y aseguradoras otras asociaciones/confederaciones, etc.).*

*AVEBIOM constituye la asociación específica de biomasa que agrupa una variedad de actividades e intereses dentro del sector.*

*En España existen suministradores de equipos principales específicos con presencia en todas las tipologías; desde grandes calderas acuotubulares hasta chimeneas y estufas eficientes para el uso de leñas o las estufas de pellets. La presencia internacional de estas empresas es alta, en ocasiones, debido al bajo nivel de demanda del mercado interior.*

*No obstante, sería deseable que el sector industrial español, en un entorno globalizado altamente competitivo y presente en España en muchas ocasiones a través de grandes empresas suministradoras de bienes de equipos, vea crecer su dimensión en número y en volumen de actividad de las mismas...”*

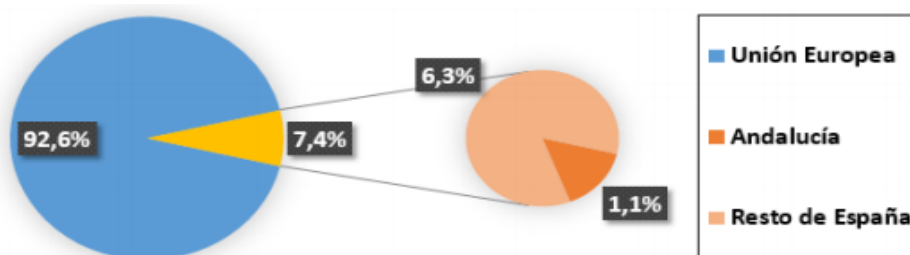
*Fuente: Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020*

### 2.2.3. Biomasa en Andalucía

Por su parte, Andalucía es la comunidad española por excelencia en la generación de energía a partir de biomasa. Gran parte de ello es debido a su amplia extensión de hectáreas dedicadas al olivar, origen de los principales biocombustibles utilizados en biomasa. Dicha biomasa se puede clasificar en orujo, orujillo, hueso de aceituna y poda del olivar. Por un lado, la producción y aprovechamiento de orujo, orujillo y de hueso de aceituna está consolidada al ir acompañada con la obtención del aceite de oliva y la aceituna. Por otro lado, al referirnos a la poda y hoja del olivar no están aún del todo explotadas ni controladas y aún existen quemas incontroladas de este tipo de biomasa.

Otros grupos de biomasa muy importantes en Andalucía son la forestal, los restos de la poda de los cultivos de algodón, girasol, frutales, invernaderos y arroz, así como la poda de parques y jardines urbanos; aunque aún existe un elevado porcentaje de biomasa que se puede y debe aprovechar de ellos en los próximos años.

Es evidente que el potencial biomásico de Andalucía es enorme, por lo que hemos extraído de la Agencia Andaluza de la Energía las siguientes gráficas para corroborarlo:




Unidad: Mtep			
Consumo de energía primaria	1.606,5	118,4	18,3
Consumo de energía final	1.160,6	83,0	12,3
Grado de autoabastecimiento	46,6%	28,4%	19,9%

Ilustración 20. Comparativa del consumo de energía primaria entre la Unión Europea, España y Andalucía.

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

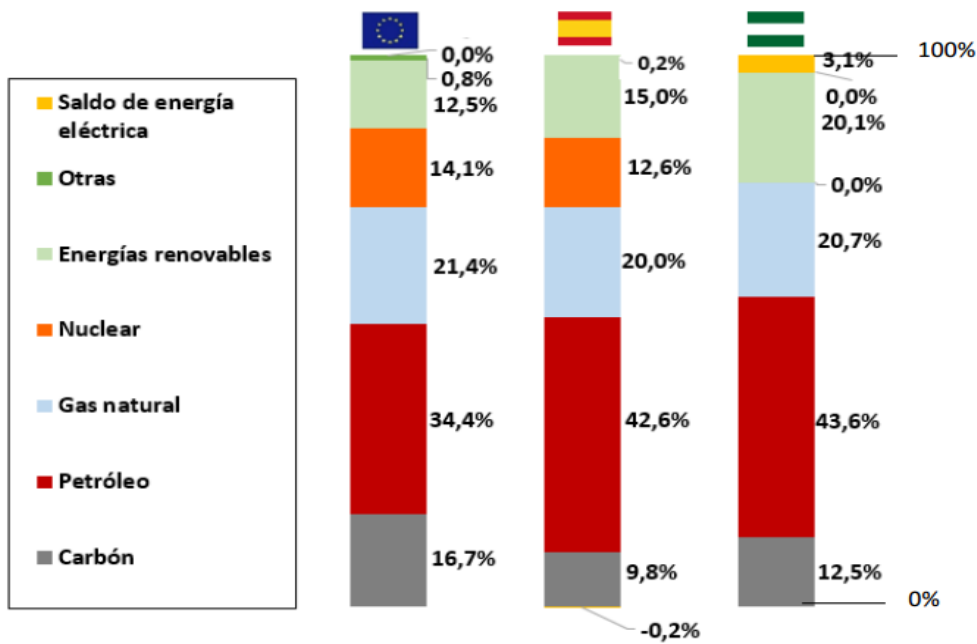


Ilustración 21. Comparativa de los sectores energéticos entre la Unión Europea, España y Andalucía.  
Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

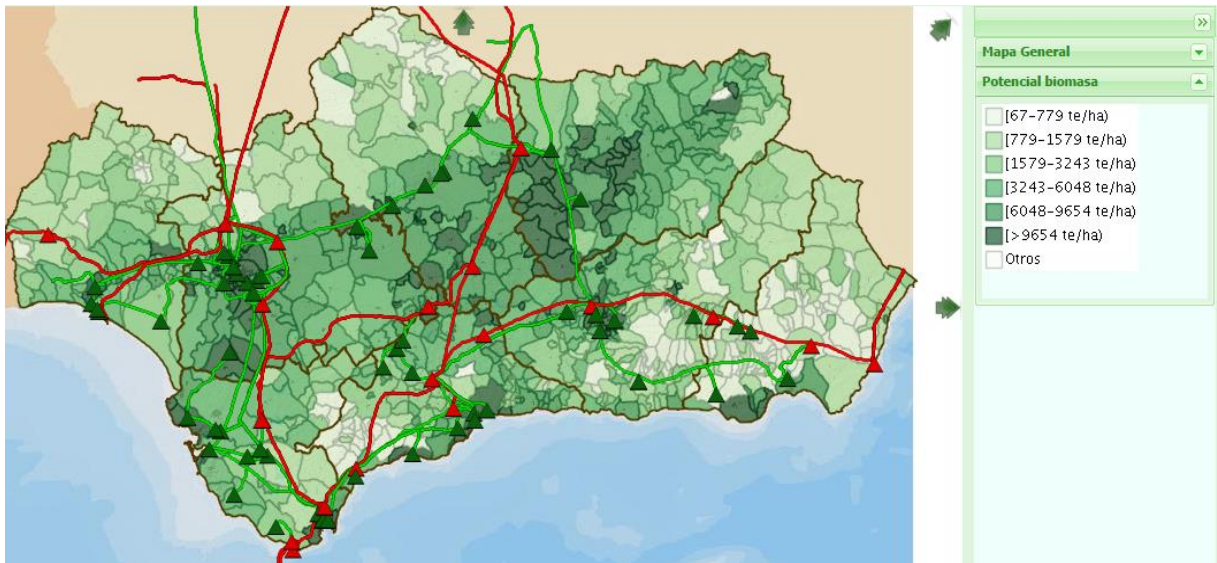


Ilustración 22. Mapa del potencial de biomasa en Andalucía. Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

Como hemos podido comprobar gracias a las estadísticas de la Agencia Andaluza de la Energía, en Andalucía existe un elevado potencial disponible, por lo que ahora procederemos a comprobar cuál es el potencial instalado y ya aprovechado.

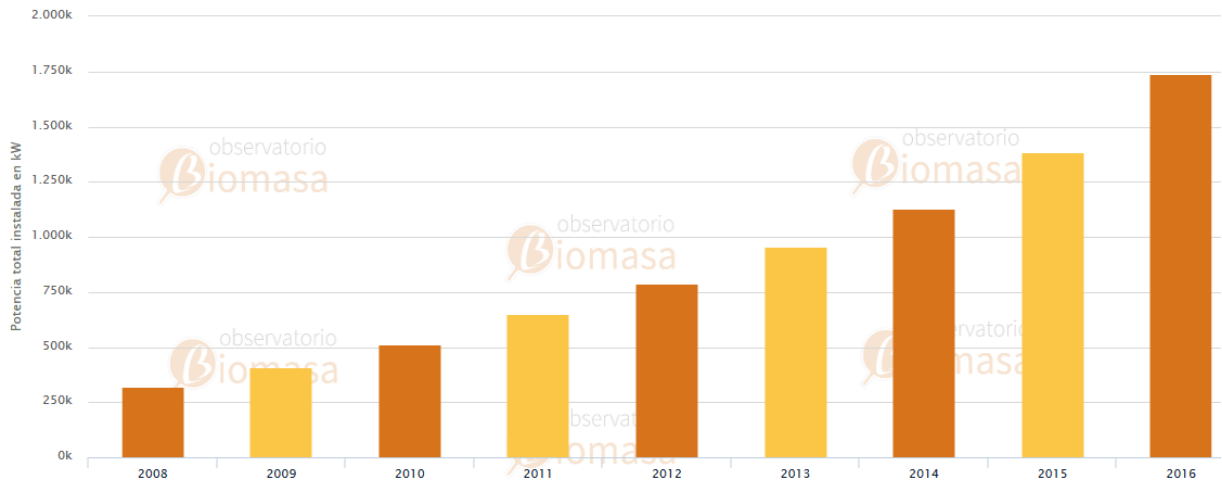


Ilustración 23. Potencia instalada de Biomasa (en kW) en Andalucía. Fuente: Observatorio Biomasa

Las previsiones establecidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático establecen que **antes de 2100 la cuota de participación de la biomasa en la producción mundial de energía debería estar entre el 25% y el 46%**

En nuestro proyecto trabajamos con la generación de electricidad a partir de biomasa, aunque el rango de aplicaciones de las que dispone la biomasa es ampliado (generación térmica, biocombustibles, generación eléctrica...) como podemos apreciar en el siguiente gráfico:

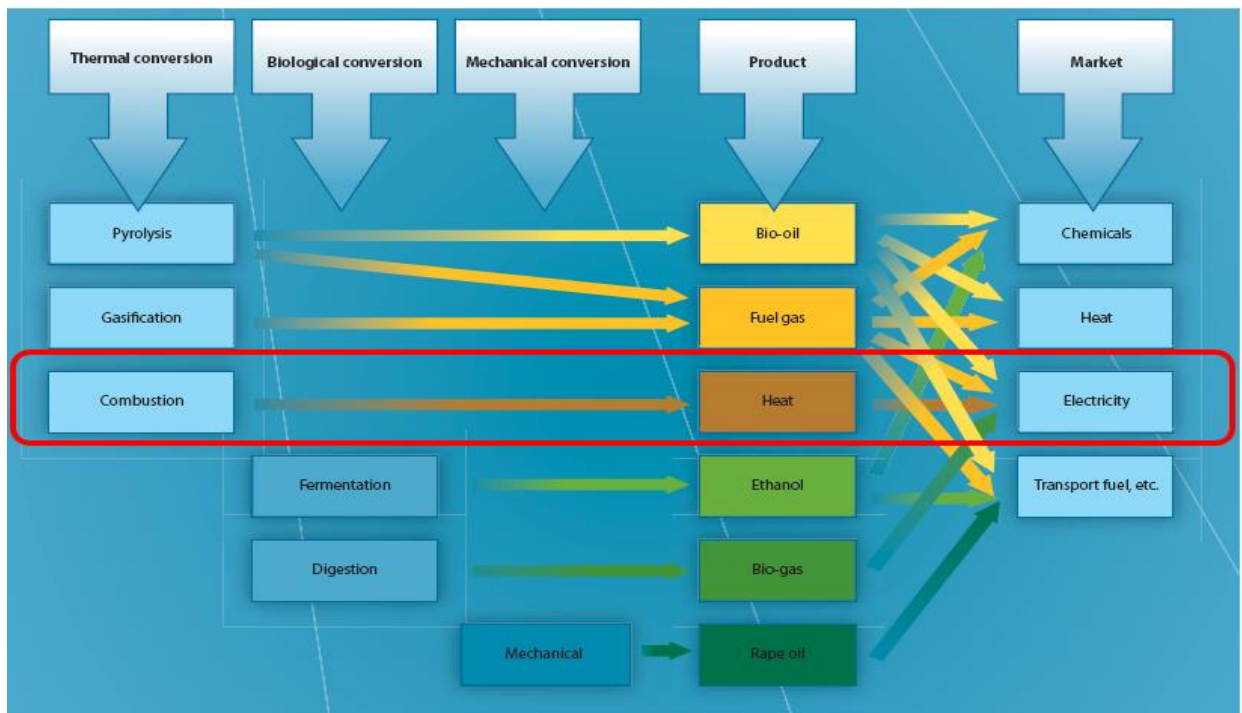


Ilustración 24. Aplicaciones de las que dispone la biomasa. Fuente: GreenEnergy for Europe

Actualmente las principales instalaciones de biomasa para la generación eléctrica en Andalucía son las siguientes:

CENTRAL BIOMASA / COGENERACIÓN CON BIOMASA	MUNICIPIO	PROVINCIA	POTENCIA (MW)
Albaida Recursos Naturales 1	Níjar	Almería	1,70
Agroenergética Baena	Baena	Córdoba	25,00
Bioenergética Egabrense	Cabra	Córdoba	8,00
Severaes	Cañete de las Torres	Córdoba	0,10
Bioenergía Santamaría	Lucena	Córdoba	14,30
Agroenergética de Algodonales	Palenciana	Córdoba	5,37
El Tejar Autogeneración	Palenciana	Córdoba	5,65
Vetejar	Palenciana	Córdoba	12,90
Biomasa Puente Genil	Puente Genil	Córdoba	9,82
Ence I	San Juan del Puerto	Huelva	40,95
Ence II	San Juan del Puerto	Huelva	27,50
Tradema	Linares	Jaén	2,00
Bioenergética de Linares	Linares	Jaén	15,00
La Loma	Villanueva del Arzobispo	Jaén	16,00
Aldebarán Energía del Guadalquivir	Andújar	Jaén	6,00
Fuente de Piedra	Fuente de Piedra	Málaga	8,04
Extragol	Villanueva de Algaidas	Málaga	9,15
<b>TOTAL MW</b>			<b>257,48</b>

Tabla 2. Generación eléctrica a partir de Biomasa en Andalucía (Junio, 2017).

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

PROVINCIA	MUNICIPIO	GENERACIÓN ELÉCTRICA
Córdoba	Baena	25 MW
Córdoba	Cabra	8 MW
Córdoba	Cañete de las Torres	100 kW
Córdoba	Lucena	14,3 MW
Córdoba	Palenciana	12,900 MW + 5,65 MW + 5,37 MW
Córdoba	Puente Genil	9,820 MW
<b>TOTAL</b>		<b>81,14 MW</b>

Tabla 3. Municipios cordobeses con plantas de generación eléctrica a partir de biomasa.

Fuente: Agencia andaluza de la energía

## Sector industrial

### Usos eléctricos

*La producción de electricidad con biomasa precisa de sistemas más complejos que otros combustibles sólidos, dado el bajo poder calorífico de la biomasa, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido en volátiles. Para ello se necesitan centrales térmicas específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran un combustible convencional, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento. Todo ello, unido a la dificultad de aprovisionamiento de la biomasa,*

*explica todas las barreras que este sector ha tenido que solventar en los últimos años y que han retrasado su crecimiento, siendo el peso actual de la biomasa eléctrica inferior al que debería ser respecto de sus aplicaciones térmicas, más sencillas de promover. Después de este periodo de desarrollo, el sector de la biomasa eléctrica ha alcanzado un alto grado de madurez y está preparado para impulsar su crecimiento en los próximos años. Por otro lado, la gran demanda de combustible de este tipo de plantas obliga a asegurar un abastecimiento continuo, que tiene la dualidad de encarecer su precio por la distancia a la que se debe buscar el suministro pero también puede reducirlo al adquirir grandes cantidades, por ello las soluciones encontradas para producción eléctrica han sido muy variadas según las circunstancias que rodean al suministro, desde grandes centrales (superiores a los 30 MW) en papeleras hasta pequeños sistemas de cogeneración (en torno a 1 MW) asociados a plantas de pellets.*

*En las aplicaciones eléctricas más tradicionales para biomasa, con esquemas de caldera-turbina de vapor, deben solventarse las barreras derivadas de unos bajos rendimientos en comparación con otras tecnologías, unidos a altos niveles de inversión para pequeños rangos de potencia, rangos en los que se concentran las posibilidades de desarrollar proyectos habida cuenta del problema de la disponibilidad de biomasa, salvo en las grandes industrias vinculadas al sector del papel o ciertas industrias agroalimentarias.*

*Por otro lado, entre otros motivos, la escasa demanda ha provocado la desmotivación de la industria española de bienes de equipo en llevar a cabo desarrollos en este sector. En algunos casos, la política corporativa ha dado lugar a que ciertos grandes fabricantes de equipos en España no empleen a día de hoy tecnologías propias, utilizando patentes de otros países. Este hecho es similar a lo que ocurre en otros sectores de producción de bienes de equipo.*

*Históricamente, las tecnologías tradicionales de generación o cogeneración para biomasa con turbinas de vapor solo habían permitido la implantación de proyectos como las instalaciones de pasta de papel, dado que las inversiones eran elevadas y se necesitaban grandes consumos de energía térmica.*

*Recientemente se han llevado a cabo centrales para generación eléctrica a condensación y solo en algunos casos aislados se han realizado instalaciones más pequeñas de cogeneración (en torno a 1 MW de potencia) con altas inversiones y consumos térmicos insuficientes que impedían alcanzar un rendimiento eléctrico equivalente adecuado.*

*Fuente: Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020*

#### 2.2.4. Legislación reciente relacionada con biomasa

AÑO	REAL DECRETO
2017	Sentencia que estima en parte el recurso interpuesto contra 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
2017	Orden ETU/315/2017, de 6 de abril, por la que se regula el procedimiento de asignación del régimen retributivo específico en la convocatoria para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables
2017	Circular 1/2017, de 8 de febrero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, que regula la solicitud de información y el procedimiento de liquidación, facturación y pago del régimen retributivo específico de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
2017	Orden ETU/130/2017, de 17 de febrero, por la que se actualizan los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos, a efectos de su aplicación al semiperiodo regulatorio que tiene su inicio el 1 de enero de 2017.
2016	Resolución de 9 de febrero de 2016, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se modifica la de 18 de diciembre de 2015, por la que establecen los criterios para participar en los servicios de ajuste del sistema y se aprueban determinados procedimientos de pruebas y procedimientos de operación para su adaptación al 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.
2016	Orden IET/2735/2015, de 17 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso de energía eléctrica para 2016 y se aprueban determinadas instalaciones tipo y parámetros retributivos de instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
2016	Resolución de 15 de julio de 2015, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se inscriben en el registro de régimen retributivo específico en estado de preasignación las instalaciones incluidas en el cupo previsto en la disposición adicional cuarta del 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; y se declaran no inscritas o inadmitidas el resto de instalaciones que solicitaron su inclusión en dicho cupo.
2015	Orden IET/1344/2015, de 2 de julio, por la que se aprueban las instalaciones tipo y sus correspondientes parámetros retributivos, aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
2015	Corrección de errores de la Orden IET/1045/2014, de 16 de junio, por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

Tabla 4. Legislación reciente sobre biomasa. Fuente: BOE

## 2.3. ESTUDIO DE LA PLANTA DE BIOMASA

A continuación estudiaremos las diferentes características principales de la planta.

### 2.3.1. LOCALIZACION

Para poder elegir una determinada ubicación de la planta debemos tener en cuenta varios factores:

- Aprovechamiento suficiente de recursos disponibles
- Seguridad de abastecimiento de agua
- Provocar el mínimo impacto ambiental en la zona (núcleos urbanos, fauna y flora)
- Facilidad en el acceso

Ya que hemos elegido como combustible para la planta de biomasa el **ORUJILLO** comenzamos a investigar las zonas con mayor cantidad de recursos disponibles (mediante los programas de gvSIG y BioRaise)

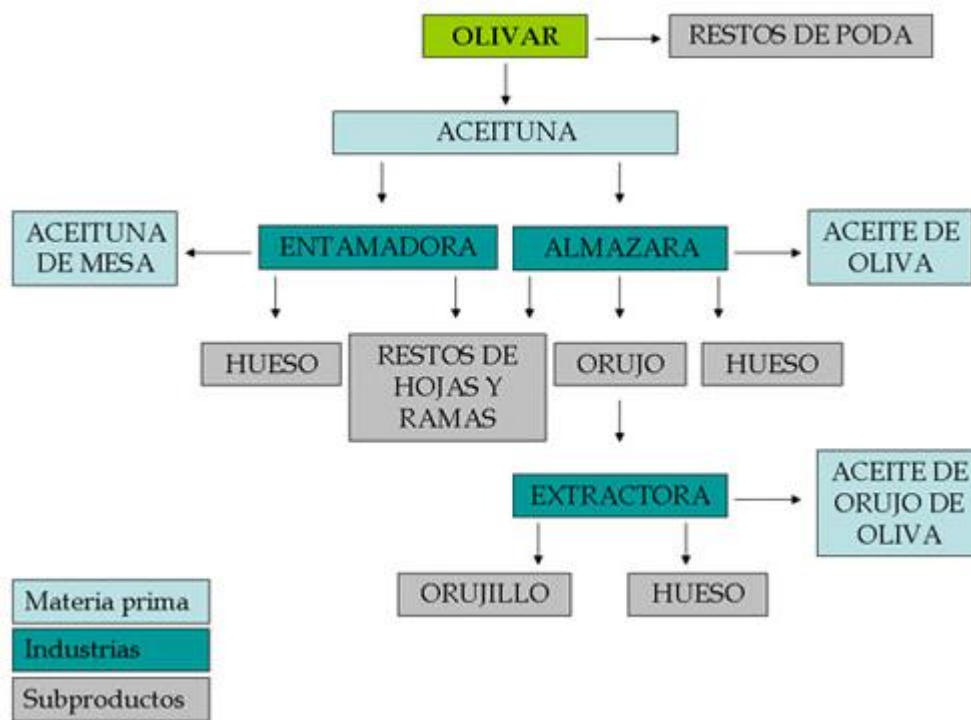


Ilustración 25. Proceso de extracción del aceite de oliva en tres fases. Fuente: Autor: José Antonio La Cal Herrera "Instalación de gasificación de restos de poda de olivar integrada en una almazara"

En primer lugar, podemos apreciar que **España es el país que dispone de una mayor superficie de olivar:**

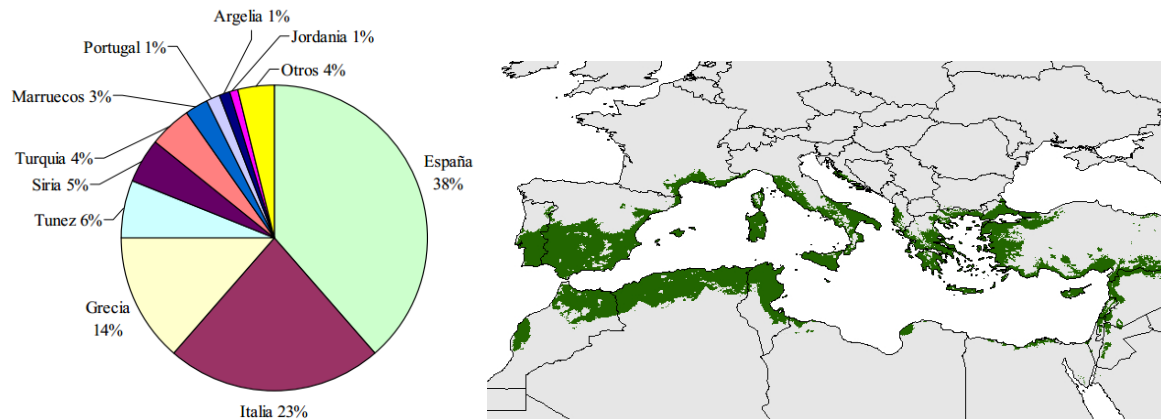


Ilustración 26. Porcentaje según la superficie de olivar de cada país. Fuente: J.Oteros.

En segundo lugar, y para concretar más, investigamos en qué orden están las comunidades autónomas de España (al referirnos a los recursos disponibles provenientes del olivar) mediante los programas de gvSig y BioRaise.

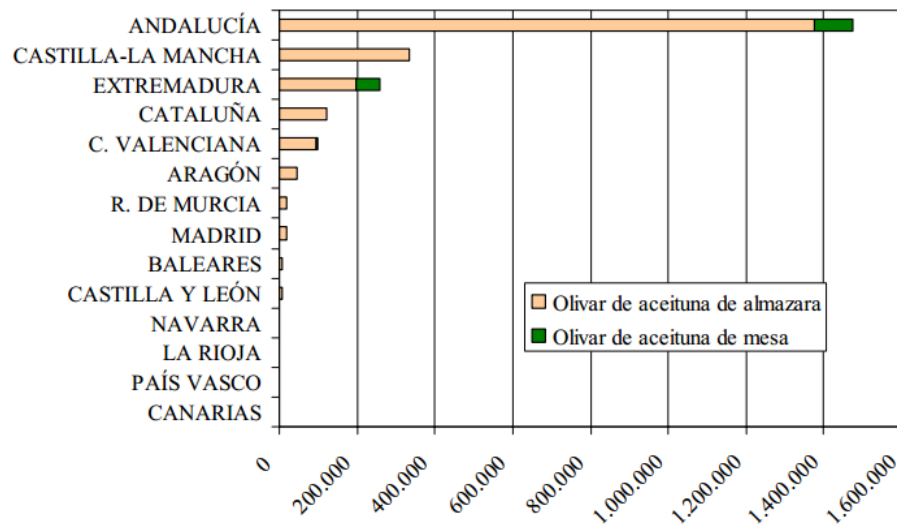


Ilustración 27. Distribución según la superficie de olivar (ha) de cada comunidad autónoma española.

Como acabamos de apreciar en el gráfico, **Andalucía es la comunidad por excelencia en la que predomina el olivar** y, por tanto, de donde podremos extraer los recursos de biomasa que queremos utilizar en nuestra planta de biomasa para generar electricidad. También podemos desglosar en cuanto a provincias españolas que **Jaén y Córdoba** son las provincias con mayor número de hectáreas dedicadas al olivar empezamos también a investigar sobre otras cuestiones.

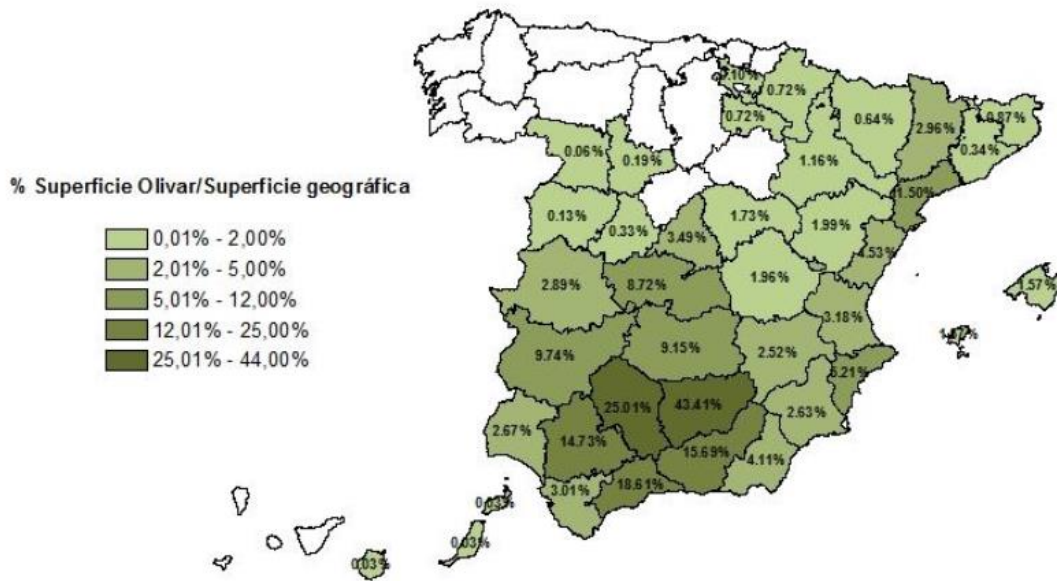


Ilustración 28. Porcentaje según las provincias españolas en referencia a la superficie de olivar.  
Fuente: Mapama

### 2.3.2. SITUACIÓN EXACTA DE LA PLANTA

Tras comprobar que las provincias con mayor densidad de olivar son Jaén y Córdoba procedemos a buscar un emplazamiento que reúna además de los condicionantes antes nombrados otros como son:

- Orujeras que estén provocando una alta contaminación
- Posibilidad de espacio junto a ellas
- Zonas que no dispongan de una planta de biomasa cercana
- Seguridad en el abastecimiento de agua
- Provocar mínimo impacto social y medioambiental posible

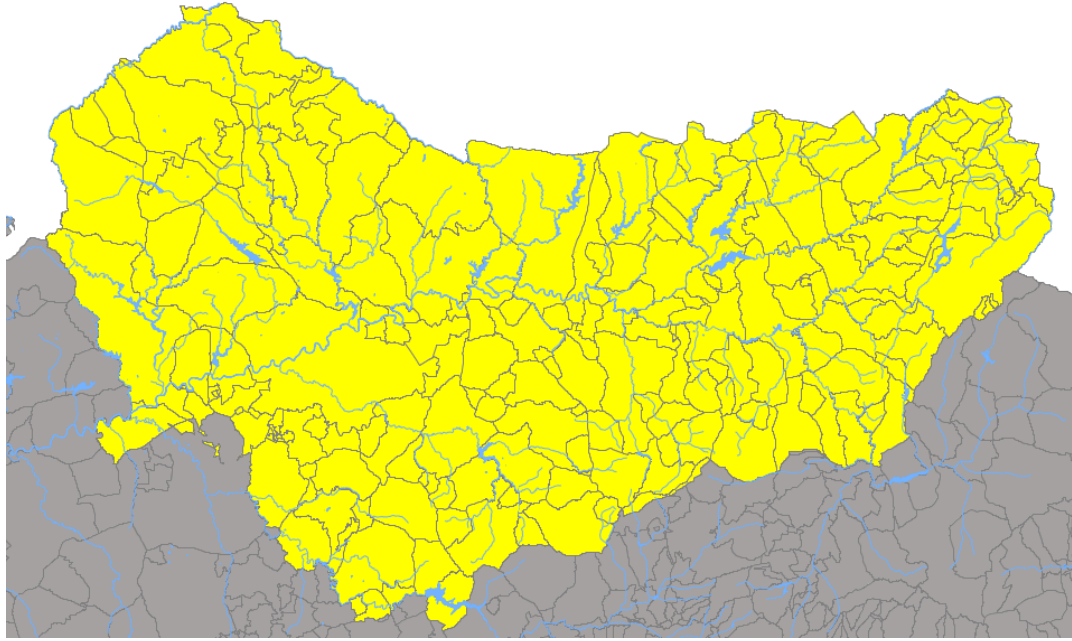


Ilustración 29. Representación de las dos provincias españolas (Jaén y Córdoba) con mayor superficie de hectáreas dedicadas al olivar. Fuente: Elaboración propia (gvSIG)

Finalmente y tras utilizar el programa BioRaise elegimos el **MUNICIPIO DE MONTILLA COMO UBICACIÓN FINAL DE LA PLANTA.**

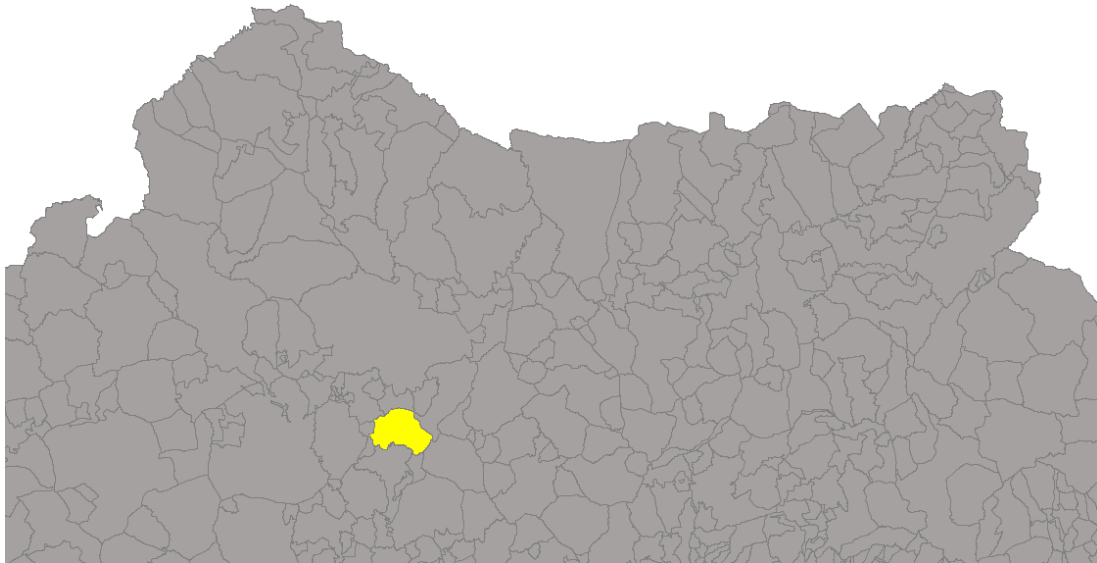


Ilustración 30. Localización del municipio cordobés de Montilla. Fuente: Elaboración propia (gvSIG)

Por lo que profundizamos en cada una de las cuestiones que hemos planteado anteriormente:

○ **Seguridad de abastecimiento de agua**

En el término municipal de Montilla existen diferentes ríos y afluentes que pasan por él, por lo que debemos buscar uno de ellos que tenga un caudal constante para que podamos tener seguridad en cuanto al abastecimiento de agua para la planta de biomasa.

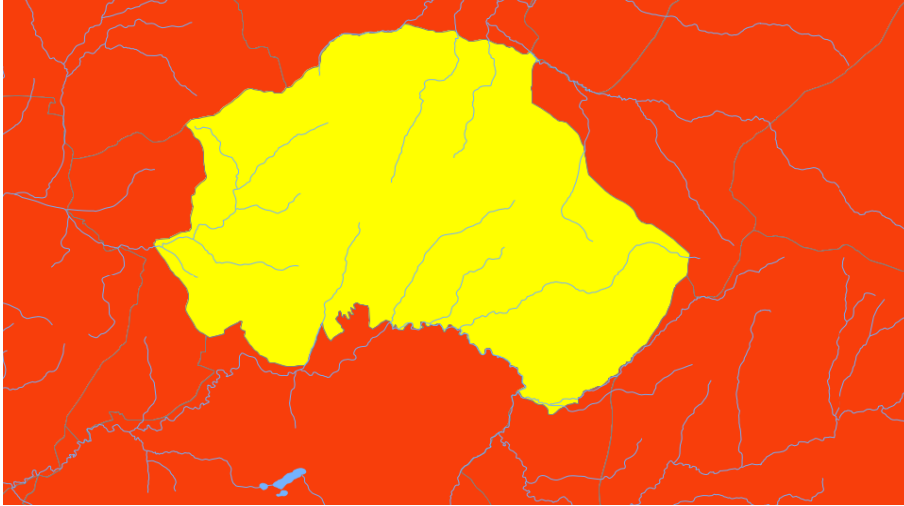


Ilustración 31. Afluentes que transcurren por el término municipal de Montilla.  
Fuente: Elaboración propia (gvSIG)

○ **Provocar el mínimo impacto ambiental en la zona (núcleos urbanos, fauna y flora)**

Desde la localización de la planta de Biomasa hasta Montilla (núcleo urbano más cercano) existe una distancia de 2,5 km, siendo una distancia óptima para conseguir tener un impacto mínimo a núcleos urbanos (consiguiendo evitar así problemas de ruido y olores) además de permitirle a la cooperativa “La Unión” deshacerse de un residuo contaminante para ellos (el orujillo) que actualmente permanece en el interior del casco urbano de la localidad y que para nuestra planta es nuestra fuente de energía.

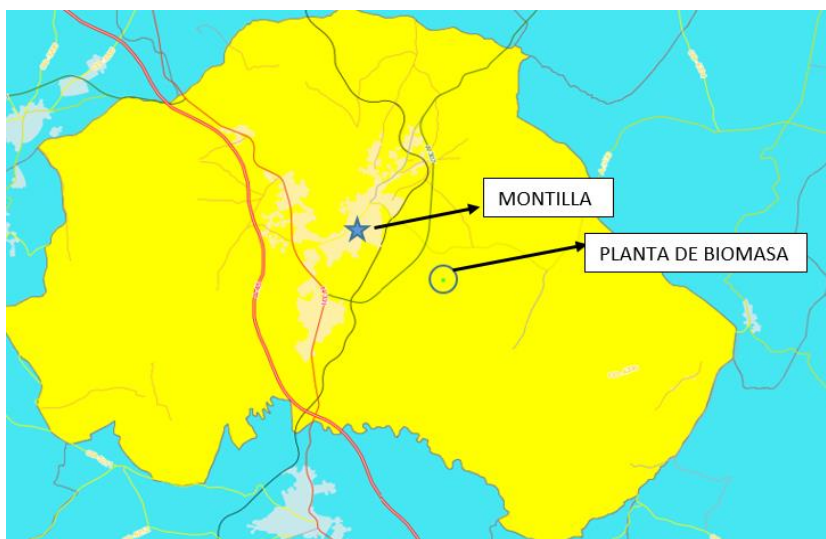


Ilustración 32. Ubicación de la Planta de Biomasa con respecto al municipio más cercano (Montilla).  
Fuente: Elaboración propia (gvSIG)

A continuación se detallan las coordenadas de la planta de biomasa (tanto de forma geográfica como UTM):

GEOGRÁFICAS		UTM	
<b>Longitud</b>	4°36'49.3''W	X	357492.052
<b>Latitud</b>	37°34'20.7''N	Y	4159667.827

<b>Huso</b>	30
-------------	----

Tabla 5. Coordenadas geográficas y UTM de la planta de biomasa.  
Fuente: Elaboración propia

En las siguientes ilustraciones también podemos apreciar la localización de la planta de biomasa, la situación con respecto al núcleo urbano más próximo y su proximidad al Arroyo de Guta, el tipo de suelo de la actual parcela, así como la proximidad a la autovía A-307 y a las carreteras A-3130 y CO-5209 que la comunican con la Cooperativa “La Unión” (a 3,9 km):

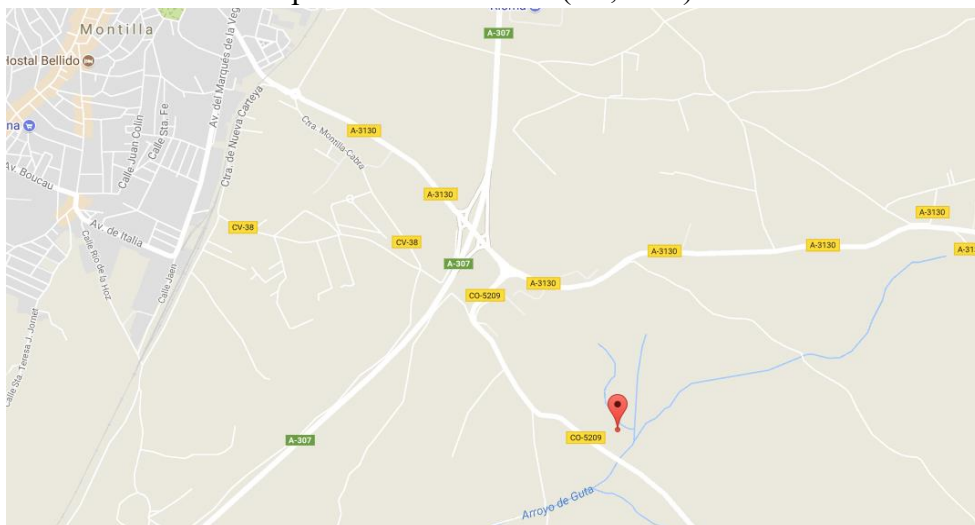


Ilustración 33. Ubicación y referencia de la planta con respecto a ríos, carreteras y municipios próximos.  
Fuente: Elaboración propia (Google Maps)

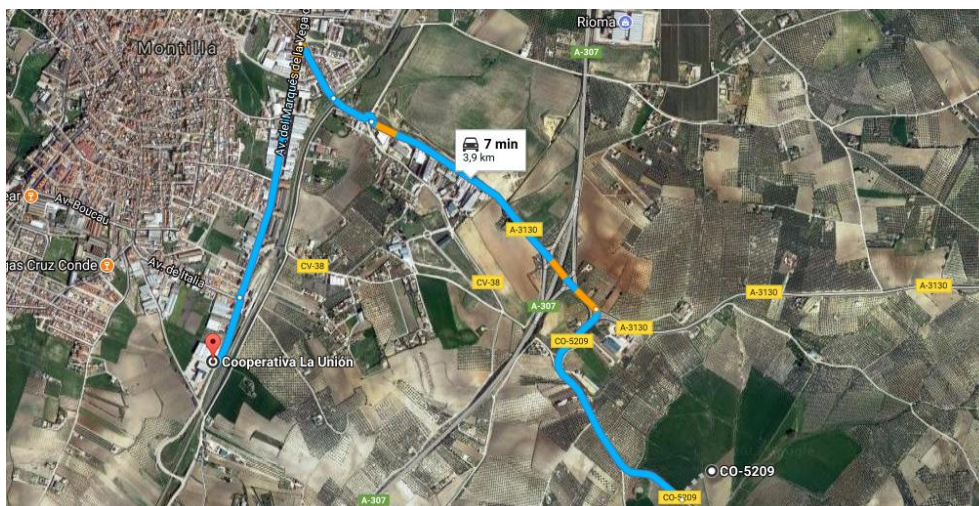


Ilustración 34. Trayecto entre la planta de biomasa y la Cooperativa “La Unión”.  
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 35. Acceso principal a la planta (CO-5209).  
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 36. Parcela de la planta (vista satélite). Fuente: Elaboración propia

Como podemos apreciar en la siguiente ilustración la parcela elegida está dividida a su vez en tres partes, en este proyecto se trabaja con la división “a” de 146.405 m<sup>2</sup>, teniendo la opción de aumentar este espacio en más de 80.000 m<sup>2</sup> si en un futuro se necesitase más espacio.

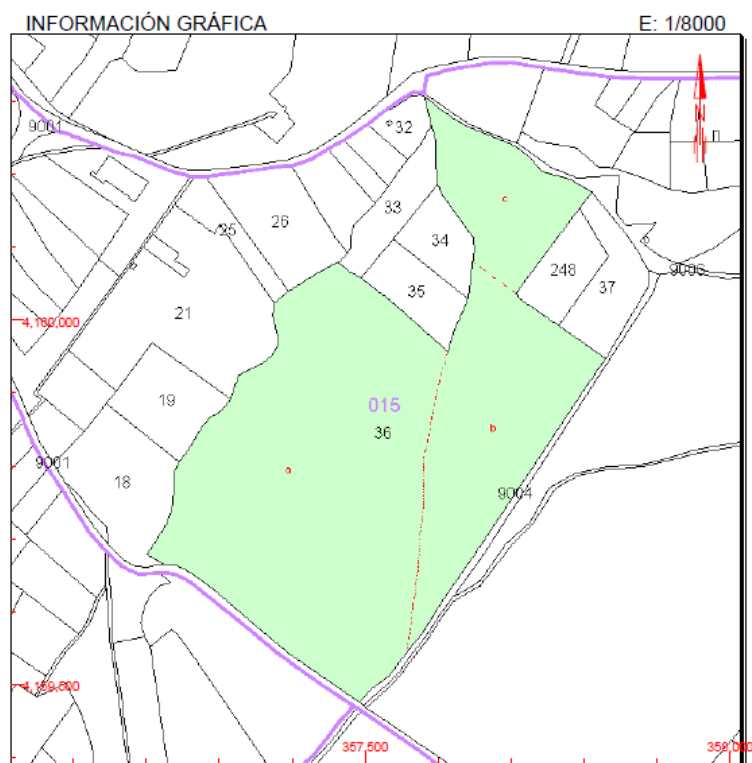


Ilustración 37. Referencia catastral de la parcela. Fuente: Sede Catastro

**REFERENCIA CATASTRAL DEL INMUEBLE**  
**14042A015000360000EO**

**DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE**

<b>LOCALIZACIÓN</b>	
Polígono 15 Parcela 36	
GUTA. MONTILLA [CÓRDOBA]	
<b>USO PRINCIPAL</b>	<b>AÑO CONSTRUCCIÓN</b>
Agrario	--
<b>COEFICIENTE DE PARTICIPACIÓN</b>	<b>SUPERFICIE CONSTRUIDA [m<sup>2</sup>]</b>
100,000000	--

**PARCELA CATASTRAL**

<b>SITUACIÓN</b>		
Polígono 15 Parcela 36		
GUTA. MONTILLA [CÓRDOBA]		
<b>SUPERFICIE CONSTRUIDA [m<sup>2</sup>]</b>	<b>SUPERFICIE GRÁFICA PARCELA [m<sup>2</sup>]</b>	<b>TIPO DE FINCA</b>
--	234.929	--

**CULTIVO**

Subparcela	CC	Cultivo	IP	Superficie m <sup>2</sup>
a	C-	Labor o Labradío secoano	01	146.405
b	C-	Labor o Labradío secoano	02	60.296
c	O-	Olivos secoano	02	28.228

Ilustración 38. Referencia catastral del inmueble. Fuente: Sede Catastro

CARACTERÍSTICAS DE LA PARCELA		
Decimales (Latitud, Longitud)	37.573033	-4.61378000000002
DMM (Grados, Minutos)	37° 34.38198000000014' N	4° 36.826800000001185' W
DMS (Grados, Minutos, Segundos)	37° 34' 22.9188000000085"N	4° 36' 49.60800000007119" W
UTM (Este, Norte, Huso, Hemisferio) (Huso 30)	357492.0309342333 m	4159667.816403363 m
MGRS/NATO (Zona, Precisión en m <sup>2</sup> , Este, Norte) 30S , UG ,	57492	59667.8
Altitud (sobre el nivel del mar)	312.265777588 (metros) 1024.231750488 (pies/feet)	
Superficie total:	146.405 m <sup>2</sup> 14,6505 ha	

Tabla 6. Principales características sobre la parcela de la planta de biomasa.  
Fuente: Elaboración propia

○ **Aprovisionamiento suficiente de recursos disponibles**

La planta de biomasa expuesta en dicho proyecto está diseñada para generar electricidad a través de la combustión de orujillo en una caldera de generación de vapor, aunque para poder obtener orujillo debemos pasar por varias fases previamente:

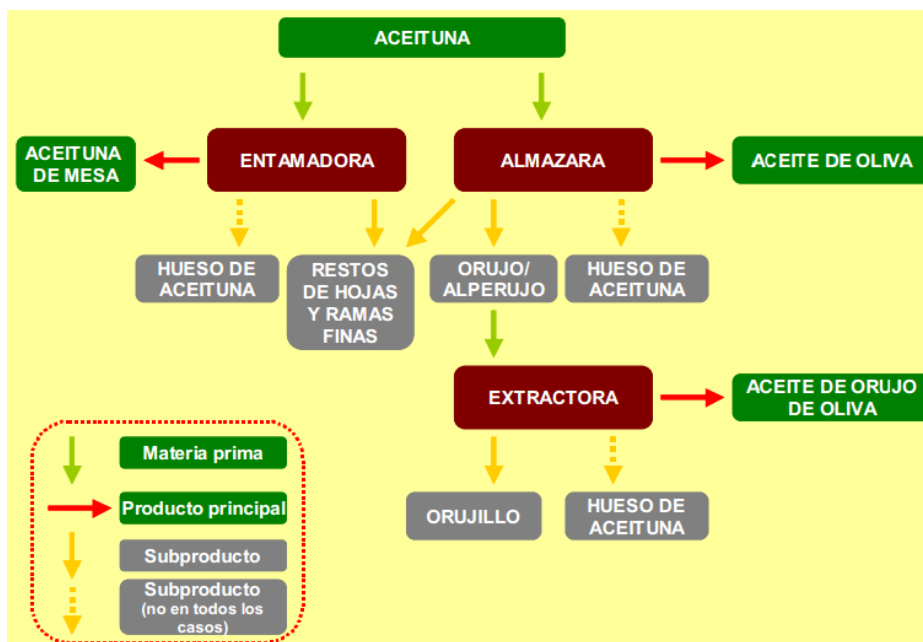


Ilustración 39. Principales aplicaciones de la aceituna (entre ellas el orujillo). Fuente: Junta de Andalucía

**Según la siguiente clasificación elaborada por el IDAE de los tipos de biomasa podemos destacar que el orujo pertenece al grupo b.8.1**

***Combustibles de cogeneración con biomasa y/o biogás***

*La producción de electricidad mediante cogeneración se encuadra en el epígrafe a.1.3 de las tarifas, es decir, se distingue claramente de la sola producción eléctrica con biomasa (grupos b.6 y b.8), que se ve más adelante, o biogás (grupo b7), que se incluye en el documento de esta serie correspondiente a biogás.*

*La retribución por la electricidad entregada por una cogeneración de biomasa varía en función de la potencia eléctrica de la planta (menor o mayor de 2 MW) y del combustible utilizado. Atendiendo al combustible utilizado, las cogeneraciones se clasifican en:*

- *b.6.1 Cultivos energéticos de origen agrícola o forestal, producidos para fines energéticos mediante actividades de cultivo, cosecha y/o procesado de materias primas recolectadas.*

*Se consideran cultivos energéticos agrícolas a la biomasa de origen agrícola, herbáceo o leñoso, acorde con la definición anterior. Se consideran cultivos energéticos forestales a la biomasa procedente del aprovechamiento principal de masas forestales y acorde con la definición de cultivo energético dada en este apartado.*

- *b.6.2 Residuos generados en la limpieza y mantenimiento de jardines y residuos de la actividad agrícola originada en las actividades de producción, cosecha y procesado de materias primas, es decir, residuos herbáceos como la paja de cercal y residuos hortícolas, residuos de frutos secos (cáscaras), residuos de arroz, algodón, girasol, legumbres y residuos procedentes de podas (olivar, viñedo, frutales).*

- *b.6.3 Residuos de aprovechamientos selvícolas de masas forestales, y la biomasa generada en las labores de mantenimiento de espacios verdes (que no esté incluida en b.6.2), restos de desbroce, piñas,...*

- *b.7.2 Biogás procedente de digestores empleando residuos ganaderos, agrícolas y las respectivas industrias en las que se use la digestión anaerobia individualmente y en co-digestión, es decir, purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc., bien individualmente o mezclados.*

- *b.7.3 Estiércoles mediante combustión y biocombustibles líquidos y sub-productos derivados de su proceso productivo.*

- ***b.8.1 Residuos de la industria del sector agrícola. Aquí se incluyen:***
  - ***orujo, alperujos, procedentes de la producción de aceite de oliva y de la producción de aceitunas;***
  - *residuos de la extracción de aceites de semillas (girasol, colza, soja);*
  - *residuos de las industrias vinícolas y de alcoholeras;*
  - *residuos de conserveras como tomate y otras hortalizas, pescado;*

- *residuos de la fabricación de cervezas y maltas;*
  - *cáscaras de frutos secos;*
  - *residuos de la industria de producción de arroz;*
  - *residuos procedentes del procesado de algas; – otros residuos agroindustriales.*
- *b.8.2 Residuos de las industrias forestales de primera y segunda transformación. Como primera transformación se considera el aserrado, producción de chapa, tableros de contrachapado, de fibras, de partículas, listones y pasta de papel. Segunda transformación se refiere a industria del mueble, puertas y carpinterías. Los residuos de estas industrias son cortezas, serrines, recortes, astillas, virutas, polvo de lijado, restos de tablero, etc., así como los que proceden de la recuperación de materiales lignocelulósicos (envases, palets, muebles, madera de derribo, etc.).*
  - *b.8.3 Licor negro de industria papelera.*

*Fuente: IDAE*

### 2.3.3. DIAGRAMA DE LOS DISTINTOS SISTEMAS

Impondremos varios valores estándar de diseño:

Temperatura a la salida de la caldera = 500 °C

Presión de la caldera = 100 bar

Una vez que hemos determinado el valor de los principales parámetros a tener en cuenta en la planta procedemos a estudiar los diferentes sistemas pertenecientes a la planta de biomasa:

- Sistema de tratamiento de biomasa
- Sistema de tratamiento de agua
- Sistema de Refrigeración
- Ciclo Rankine

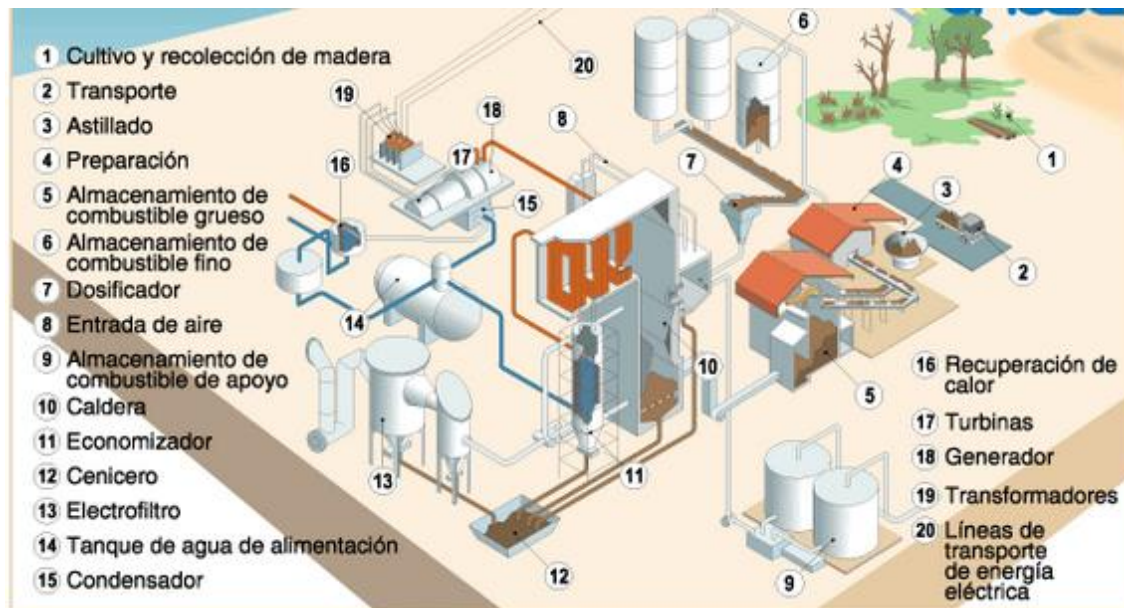


Ilustración 40. Representación de los principales procesos en una planta de biomasa.  
Fuente: UNESA

○ Sistema de tratamiento de biomasa

En este proyecto estamos trabajando con el orujillo disponible que existe en las extractoras cercanas al emplazamiento de nuestra planta de biomasa (Montilla), pero debemos mencionar que el orujillo previamente ha sido secado y densificado por lo que el alperujo proveniente del olivar (con un 65 % aproximadamente de humedad) ha evolucionado a orujo (secado en tromel) y finalmente a orujillo (mediante una extractora) llegando así a tener un 12 % de humedad.

Nuestro trabajo de fin de grado trata con el orujillo al 12 % con el que accederá a la caldera ya que es un porcentaje de humedad aceptable para ello, siendo esta opción más interesante que el proceso de secado con el que necesitamos una elevada inversión en equipos calefactores y en su utilización.

○ Sistema de tratamiento de agua

Este sistema es el encargado de tratar las aguas de captación y de vertido necesarias en la planta de biomasa.

Los procesos realizados son los siguientes:

Pretratamiento químico del agua > Ultrafiltración (Torre de Refrigeración, Agua de servicio, Potabilización) > Ósmosis inversa > Desmineralización

○ Sistema de Refrigeración

Existen dos circuitos de refrigeración:

- de alta temperatura
- de baja temperatura

En el de alta el circuito de refrigeración pasa por tres intercambiadores en paralelo, el primero sirve para aprovechar el calor de refrigeración en el calentamiento del alperujo, el segundo es utilizado para el precalentamiento de los condensados del condensador.

En este circuito de alta temperatura se baja la temperatura de 80 °C (aproximadamente) de los motogeneradores hasta los 55°C con una temperatura exterior de 40°C.

En el circuito de refrigeración baja (circuito cerrado) se dispone de una torre de refrigeración que enfría el agua que consigue condensar el vapor proveniente de la turbina.

- Ciclo RANKINE

El orujo ya tratado y reconvertido en orujillo es introducido en la caldera (con un 12% de humedad), donde su combustión proporciona la energía térmica requerida para generar vapor sobrecalentado. Este vapor sobrecalentado es introducido en la turbina de vapor, donde se expansiona accionando el eje de la propia turbina que va acoplado a un generador eléctrico. En una etapa de la turbina se realiza una extracción para que se le aporte calor al precalentador y al desgasificador (considerados un mismo equipo).

Todo esto ocurre en el ciclo Rankine, aunque para poder llegar a entender el ciclo Rankine primero hay que entender el ciclo Carnot:

#### 2.3.4. CICLO CARNOT Y MEJORAS

Un ciclo cerrado puede considerarse como un sistema cerrado compuesto de diferentes sistemas abiertos, tales que la entrada de uno coincide con la salida del otro. EL CICLO DE CARNOT ES EL QUE TIENE MAYOR RENDIMIENTO. POR ESTE MOTIVO SERÍA EL CICLO QUE NOS INTERESARÍA COMO CICLO DE FUNCIONAMIENTO PARA UNA CENTRAL DE VAPOR.

La representación de un ciclo de Carnot de flujo permanente, que se realiza en el interior de la campana de ANDREWS es la que aparece en los gráficos que se indican:

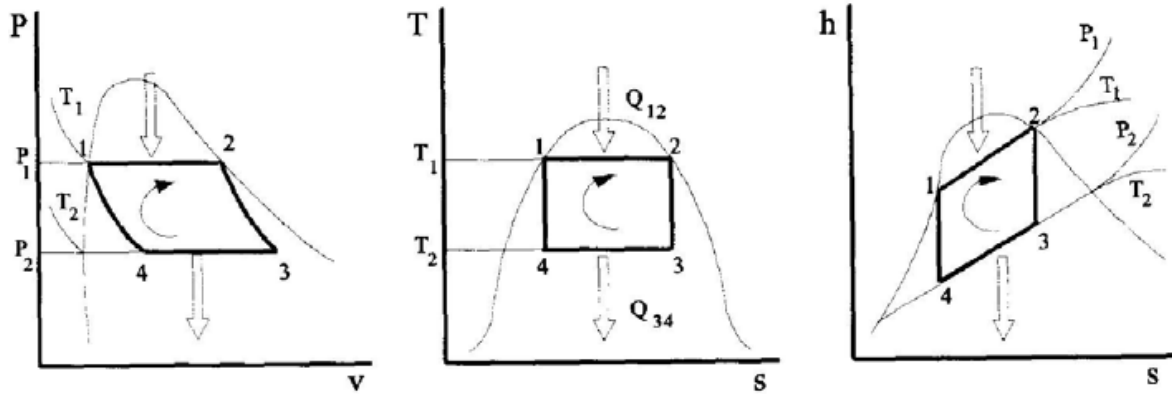


Ilustración 41. Diagramas del ciclo de Carnot. Fuente: Termodinámica básica para ingenieros químicos; Antonio de Lucas Martínez

Al modificar este el ciclo de Carnot para adaptarlo a la instalación de una Central Térmica y subsanar las limitaciones que aparecen obtendremos el CICLO DE RANKINE.

Como resultado a estas modificaciones se obtiene el ciclo de Rankine 1-2-3-5-6 de la figura.

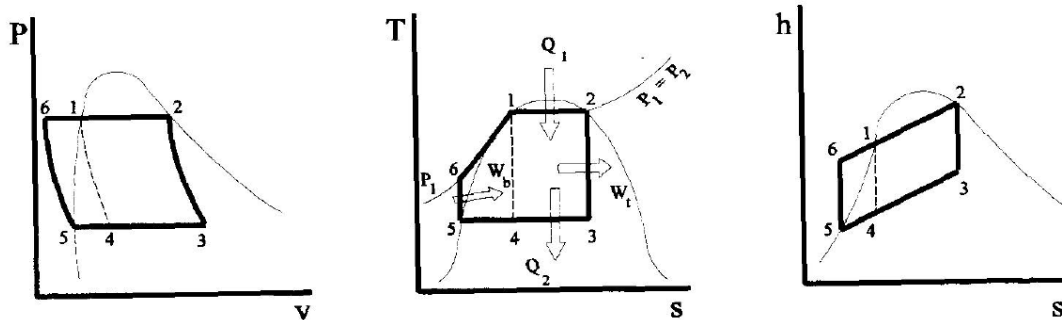


Ilustración 42. Diagramas del ciclo de Rankine. Fuente: Termodinámica básica para ingenieros químicos; Antonio de Lucas Martínez

#### Análisis Energético del Ciclo Ideal:

- Los cuatro procesos que conforman el ciclo de Rankine son procesos de flujo permanente.
- Se consideran despreciables las variaciones de energía cinética y potencial.
- Con estas premisas, la ecuación de la Energía es:

$$Q - W_t = h_2 - h_1$$

- Las transformaciones que tienen lugar en la caldera y en el condensador se realizan a presión constante ( $dp = 0$ )

**En el ciclo ideal la expansión en la turbina (transformación 3-4) es isentrópica. Y, en el ciclo ideal, la compresión en la bomba (transformación 5-6) es isentrópica.**

Por tanto el Análisis Energético del Ciclo Ideal es:

*Caldera (Transformación 6-2):*

$$W_{6-2} = 0 \quad Q_{\text{absorbido}} = Q_1 = h_2 - h_6$$

*Turbina (Transformación 2-3):*

$$Q_{2-3} = 0 \quad W_{\text{turbina}} = W_{2-3} = h_2 - h_3$$

*Condensador (Transformación 3-5):*

$$W_{3-5} = 0 \quad Q_{\text{cedido}} = Q_2 = h_5 - h_3$$

*Bomba (Transformación 5-6):*

$$Q_{5-6} = 0 \quad W_{\text{bomba}} = W_{5-6} = h_5 - h_6$$

En la transformación 5-6 se cumple que  $v_5 - v_6 = \text{Cte.}$

Y, teniendo en cuenta que:  $dq = T ds = dh - v dp$ , se tiene:

$$Q - W_{5-6} = h_2 - h_1 \quad \longrightarrow \quad h_2 - h_1 - v dp - W_{5-6} = h_2 - h_1$$

### 2.3.5. CICLO RANKINE

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se incrementa elevando la temperatura promedio a la cual se añade calor al fluido de trabajo y/o disminuyendo la temperatura promedio a la cual se rechaza el calor hacia el medio de enfriamiento (como un lago o un río).

El nuevo Ciclo de Rankine que recoge estas mejoras es el representado en los siguientes gráficos:

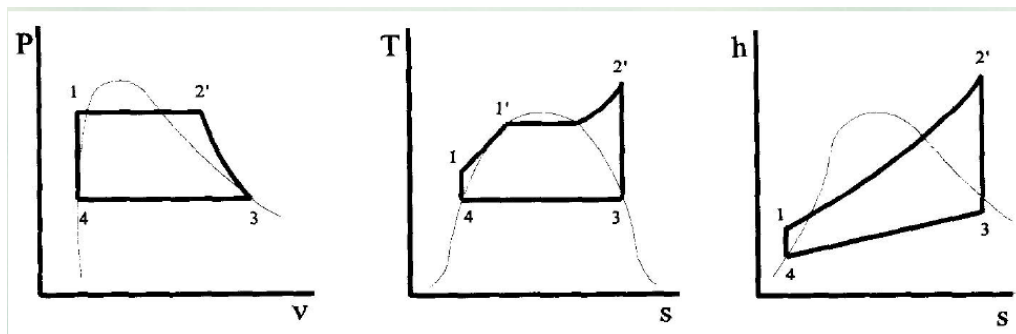


Ilustración 43. Sobrecalentamiento en el ciclo Rankine. Fuente: Termodinámica básica para ingenieros químicos; Antonio de Lucas Martínez

La temperatura promedio durante el rechazo de calor se reduce bajando la presión de salida de la turbina. En consecuencia, la presión del condensador está bastante por debajo de la presión atmosférica, es decir, corresponde a la presión de vacío. La temperatura promedio durante la adición de calor se incrementa elevando la presión de la caldera o sobrecalentando el fluido a altas temperaturas. Sin embargo, hay un límite para el grado de sobrecalentamiento, puesto que no se permite que la

temperatura del fluido exceda un valor metalúrgicamente seguro. Con este recalentamiento se consigue que a la salida de la turbina el título aumente, o sea, que disminuya el contenido de líquido, lo que resulta beneficioso para el buen funcionamiento de la turbina.

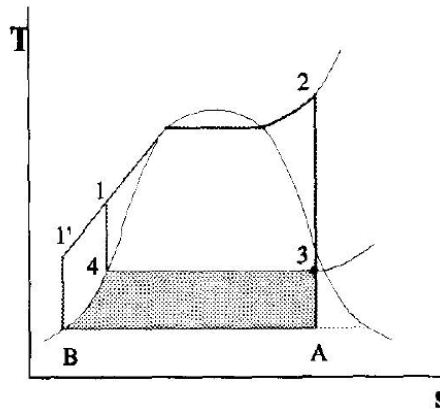


Ilustración 44. Disminución de la presión del condensador en el ciclo Rankine.  
Fuente: Termodinámica; Autor: Çengel

Esta disminución de la presión del condensador está limitada, pues no puede ser inferior a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del medio de enfriamiento.

La reducción de la presión en el condensador tiene efectos negativos: Al estar trabajando a presiones inferiores a la atmosférica se produce entrada de aire al condensador (eyectores) y disminuye el título a la salida de la turbina, con el consiguiente riesgo para el buen funcionamiento de la turbina, por lo que debemos tenerlo en cuenta en nuestra instalación.

Tras todas estas mejoras que adaptan el ciclo ideal de Carnot al ciclo real de Rankine, podemos comenzar a tratar sobre cada una de las características técnicas que van a necesitar los principales equipos para lograr obtener al final del ciclo una potencia de 10 MW.

El diagrama recomendado para esta central eléctrica a partir de orujillo se muestra a continuación:

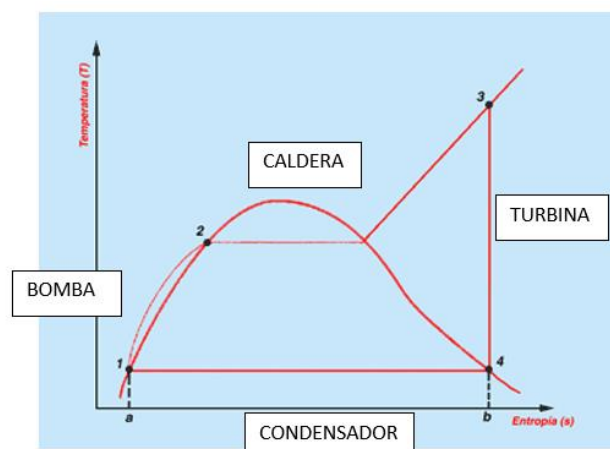


Ilustración 45. Diagrama utilizado en nuestra instalación (Ciclo Rankine). Fuente: Fuente: Enciclopedia Encarta 2005

### 2.3.6. OBJETIVOS Y CLASIFICACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA

El principal objetivo de una central térmica es obtener vapor de agua húmedo, saturado y seco, y este vapor a su vez, puede emplearse para dos funciones:

- Hacer funcionar las máquinas de vapor y las turbinas de vapor
- Como fuente de calor en los procesos industriales

Las centrales térmicas están compuestas por grandes instalaciones que permiten obtener energía eléctrica mediante la realización de un ciclo termodinámico con el que convierten calor en trabajo.

Dicha energía se consigue a través de una serie de elementos dispuestos de tal forma que permiten recoger la energía calorífica generada en un foco caliente, transformarla parcialmente en energía mecánica (trabajo), y finalmente convertirla posteriormente en energía eléctrica, mediante un generador.

#### CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES TÉRMICAS SEGÚN EL CICLO TERMODINÁMICO EMPLEADO.

- Según el Combustible utilizado en el Foco Caliente, es:
  - ✓ Combustibles sólidos (carbones o biomasa)
  - ✓ Combustibles líquidos (derivados del petróleo o residuos orgánicos)
  - ✓ Combustibles gaseosos (gas natural o derivados del petróleo)
- Según el Ciclo Termodinámico aplicado, están:
  - ✓ Ciclo de vapor: En estas centrales, se utiliza agua en un ciclo cerrado. El agua, desde el pozo de condensado y mediante el uso de una o más bombas la elevan a la caldera o generador. Una vez en la caldera, el agua es calentada hasta producir su vaporización. A la salida de la caldera el vapor pasa a la turbina donde se expande, produciendo trabajo. A su salida de la Turbina, el vapor pasa al condensador cediendo calor al agua de refrigeración, que circula por él, hasta condensarse totalmente. En este punto se alcanza, de nuevo, el pozo de condensados y se repite el ciclo.  
El agua se calienta en grandes calderas para producir vapor, usando como combustible el carbón, gas, biomasa, Energía solar, fisión nuclear, etc. La turbina se mueve debido a la presión del vapor de agua, y su energía cinética es transformada en electricidad por un generador. Estas centrales son consideradas las centrales más económicas y rentables, por lo que su utilización está muy extendida.
  - ✓ Ciclo Diesel: Estas centrales se basan en la utilización de motores diésel de combustión interna acoplados directamente al generador eléctrico.

Tienen las siguientes características:

- Tienen la ventaja de que arrancan por sí solas, con tiempos de arranque cortos.
- Las potencias instaladas son inferiores a las de las instalaciones de vapor.
- Estas Centrales se instalan como centrales de emergencia.
- Su ventaja radica en los menores gastos de instalación
- El gasto de combustible por kW-h producido es mayor que en las centrales de vapor.

- ✓ **Ciclo de gas:** En estas instalaciones, el elemento intermediario de la transformación de energía es un gas. Se instala en zonas donde se dispone de gas en condiciones favorables, o allí donde existan yacimientos de gas natural.

El ciclo Brayton describe el comportamiento ideal de un motor de turbina de gas, como los utilizados en las aeronaves. Estos motores son demasiado robustos y presentan dificultades para su utilización.

Actualmente, el gas se emplea como combustible en una caldera especial, dispuesta junto con el grupo turbina-generator.

- ✓ **Ciclo binario:** Este sistema emplea energía de dos fluidos.

El ciclo superior o de cabeza emplea como fluido el mercurio; éste se calienta y vaporiza en su caldera, expansionándose a continuación en la turbina, donde se obtiene trabajo.

A la salida de la turbina el vapor pasa a un condensador, donde al condensarse cede su calor al segundo fluido (agua), vaporizándolo. El vapor de este segundo fluido (vapor de agua) es recalentado y enviado a su turbina

A su salida, es condensado e impulsado de nuevo al condensador-vaporizador que actúa de caldera, completándose así el ciclo del fluido inferior.

Independientemente de cuál sea el combustible que utilicen (fuel-oil, carbón, biomasa o gas), el esquema de funcionamiento de todas las centrales termoeléctricas es prácticamente el mismo. Las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de los quemadores de la misma, que varían según sea el tipo de combustible empleado.

**En una instalación clásica de vapor existen tres flujos fundamentales: el de vapor de agua, el de los gases de combustión y el de agua de refrigeración y cuatro dispositivos básicos: la caldera, la turbina, las bombas de agua de alimentación y los condensadores. En nuestro proyecto trabajamos con una CENTRAL ELÉCTRICA CON BIOMASA MEDIANTE COMBUSTIÓN, por lo que nuestro ciclo es el ciclo de vapor.**

Por lo que a continuación vamos a describir de forma general los equipos que componen este tipo de central:

### 2.3.7. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA CENTRAL

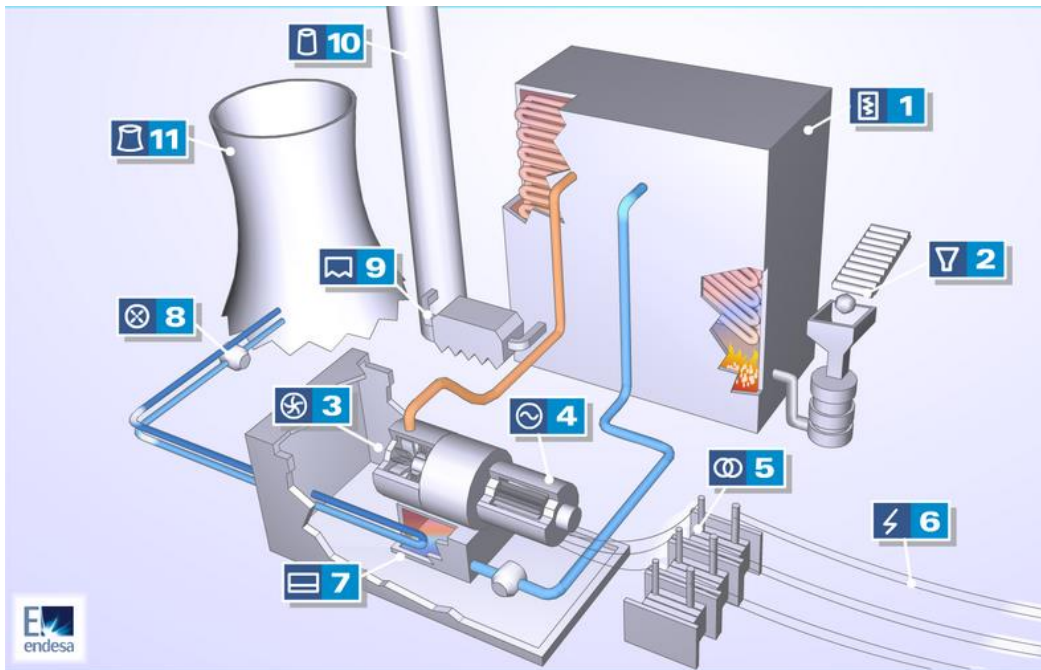


Ilustración 46. Diagrama de los principales componentes de una central térmica. Fuente: Endesa

1. Caldera
2. Parque de almacenamiento de combustible descarga y alimentación
3. Turbina de vapor
4. Alternador
5. Transformador
6. Red de transporte
7. Condensador
8. Bomba Circulación agua de refrigeración
9. Equipo de reducción de emisiones
10. Chimenea
11. Torre de refrigeración enfría el agua del circuito de refrigeración

Tabla 7 Principales equipos de una central térmica

#### Otros componentes

Departamento eléctrico
Cuadros de maniobra y medidas
Subestación transformadora elevadora
Edificio de servicios auxiliares
Parque de transformadores de servicios auxiliares
Aparata de media y baja tensión.
Sistema de tratamiento de agua
Sistema de tratamiento de aceite
Sistema de protección contra incendios

Tabla 8. Instalaciones imprescindibles en una central térmica

El almacenamiento de la biomasa suele realizarse al aire libre. No obstante, habrá que mantener controles de temperatura en todo momento ya que pueden alcanzarse altas temperaturas en la biomasa almacenada. El incremento de la temperatura podría originar una autocombustión espontánea. Para mantener controlada la temperatura se realizarán procesos de volteo cuando la temperatura empiece a subir por encima de los 100 °C.

El proceso de carga de la biomasa a la caldera de la planta se realiza mediante procesos automatizados. Para ello se utilizan cintas transportadoras que recogen el residuo de sus depósitos de almacenamiento hasta su depósito en el silo. Este se encarga de dosificar la alimentación de combustible al hogar de la caldera. Para ello dispone de compuertas de control de carga y protección antiretorno de llama.

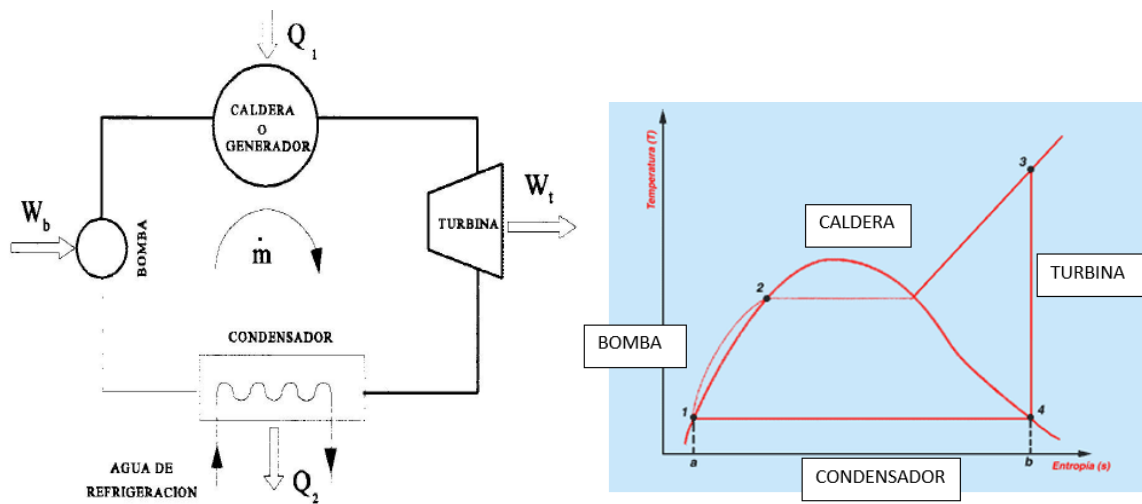


Ilustración 47. Ciclo Rankine. Fuente: Enciclopedia Encarta 2005

Como hemos mencionado anteriormente, este es el diagrama básico con el que vamos a trabajar. Ya que el objetivo es obtener 10 MW (como se describe en el Anexo 5.1.), impondremos el cálculo y la elección de equipos de forma inversa al ciclo (es decir, debemos seleccionar primero un grupo turbina-alternador que consigan dar este resultado y así podremos elegir posteriormente la caldera y el potencial de biomasa necesario). Para poder comenzar con los cálculos, primero debemos conocer qué tipo de tecnología es la que más nos interesa:

- ✓ **PIROLISIS:** Consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica (en este caso biomasa) bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante.

Los productos finales de la pirolisis son gases, condensables o pireleñosos y volátiles; líquidos o alquitranes y residuo carbonoso en forma sólida. Estos productos finales no tienen por qué ser todos desechados y podemos darle una posterior utilidad. Así, podemos usar los líquidos obtenidos como biocombustible sustituyendo al diésel en algunas aplicaciones, como aditivos de productos procedentes del petróleo o como espumantes en el proceso de producción de hormigón poroso. Los residuos sólidos en forma de carbones

tienen un uso directo en la industria metalúrgica y los gases obtenidos serán utilizados en un ciclo de gas que es el encargado de la producción de electricidad.

- ✓ **COMBUSTIÓN:** La combustión, a diferencia de la pirolisis, consiste en la descomposición termoquímica de la biomasa cuando es sometida a altas temperaturas pero en una atmósfera rica en oxígeno. Como resultado de la combustión se produce una oxidación completa de los elementos constituyentes de la biomasa dando como resultado CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, cenizas y una liberación de energía calorífica. Este último producto puede ser utilizado para diversos fines entre los que se encuentra el que nos ocupa, la generación de electricidad mediante la vaporización de agua que se hace pasar por una turbina.
- ✓ **GASIFICACIÓN:** Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termodinámicas, que se producen en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados. En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros formando una mezcla de gases denominada gas de síntesis o “syngas”.

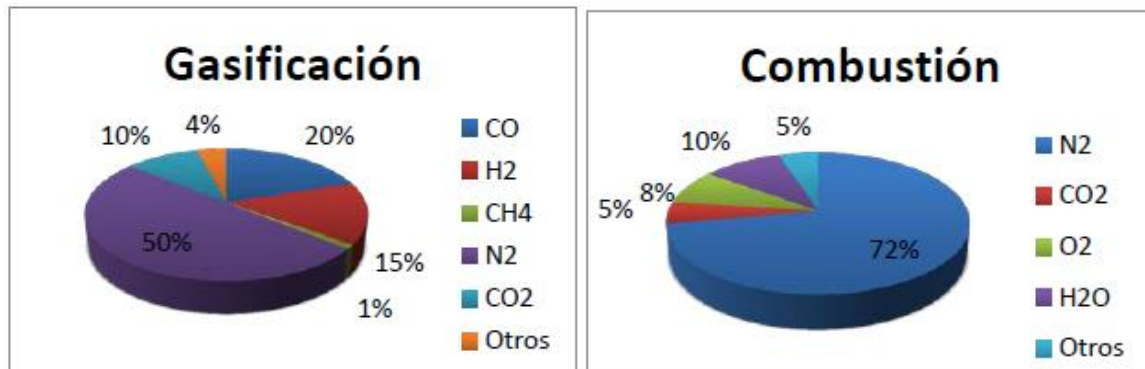


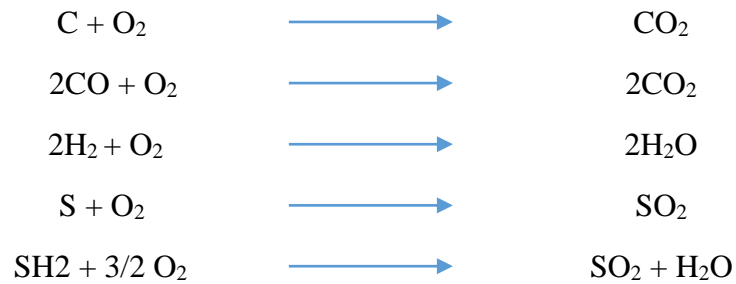
Ilustración 48. Comparativa de los principales componentes de la Gasificación y Combustión

En nuestro proyecto hemos elegido el uso de la **COMBUSTIÓN** como la tecnología que más nos interesa para el aprovechamiento energético de la biomasa. Aunque la gasificación da rendimientos mayores que la combustión, la combustión es más barata y más sencilla de operar como indica Ruiz Bermejo en su tesis en 2013: “...En general, los expertos coinciden en que, en plantas entre 2 y 5 MWe, la gasificación es más fiable, y por ello es también la tecnología más utilizada. Sin embargo, estiman que para plantas por encima de 10 MW, es más interesante la combustión. Entre 5 y 10 MW, se debe estudiar cada caso...”, y puesto que la biomasa utilizada es homogénea en composición y tamaño, mejora el rendimiento de la combustión, aumentando el rendimiento global de la central.

La combustión de la biomasa es un proceso químico complejo por el que SE PRODUCE UNA OXIDACIÓN COMPLETA DE UN COMBUSTIBLE, EN ESTE CASO LA BIOMASA.

Se trata de una reacción química en la cual intervienen un elemento combustible y un comburente. En este caso, el combustible es la biomasa y el comburente el oxígeno contenido en el aire.

A continuación podemos apreciar las diferentes reacciones que se forman:



La mayor parte de las reacciones son fuertemente exotérmicas por lo que desprenden calor, siendo éste potencialmente utilizable.

En una combustión ideal, el oxígeno que se aporta a través del aire suministrado es suficiente para realizar la combustión completa del combustible, liberando sólo dióxido de carbono y vapor de agua. Es lo que se denomina condiciones estequiométricas.

Sin embargo, en condiciones reales, esta cantidad teórica de aire necesario es insuficiente para llevar a combustión completa la biomasa debido, entre otros motivos, a la mezcla no correcta entre el combustible y el oxígeno del aire. **POR ESTE MOTIVO, SE DEBE APORTAR MÁS AIRE DEL TEÓRICAMENTE NECESARIO.** Este aporte es lo que se conoce como exceso de aire, y se expresa con valores superiores a la unidad. Valores en el entorno de la unidad no aseguran una combustión completa, por lo que, entre otros problemas asociados, se produciría la presencia de monóxido de carbono en los gases generados. **La relación aire/combustión adecuada en los procesos reales debe estar en el rango 1,2 a 1,5.**

Las reacciones de combustión tienen lugar en una zona limitada de la caldera denominada hogar, o cámara de combustión, donde se realiza la alimentación del combustible y su mezcla con el aire que actúa como comburente.

Dichas etapas son:

- Secado: Es la primera etapa y se produce al entrar la biomasa en la cámara de combustión. Su rango de temperaturas va desde la del ambiente hasta los 100°C.
- Volatilización: Es la fase donde se inicia la combustión de la biomasa, produciéndose reacción de ruptura de las moléculas grandes dando lugar a otras más pequeñas. Este proceso comienza a realizarse con temperaturas superiores a los 200°C y llega hasta los valores próximos a los 500°C.
- Combustión: Es la parte final del proceso de combustión y donde se completa dicho proceso. A partir de los 500°C, los gases se empiezan a formar y se completa la combustión de aquellos elementos de la biomasa que tienen una temperatura de ignición más elevada. En esta etapa se alcanzan valores entre los 900 y los 1200°C, dependiendo del tipo de tecnología empleada. Para que la combustión en la caldera sea óptima debe existir un flujo continuo de aire. Para ello debe disponerse de un número adecuado de ventiladores centrífugos más uno de mayor tamaño de tiro inducido, que facilitarán una enorme flexibilidad de funcionamiento y de control sobre las temperaturas de los gases de la zona.

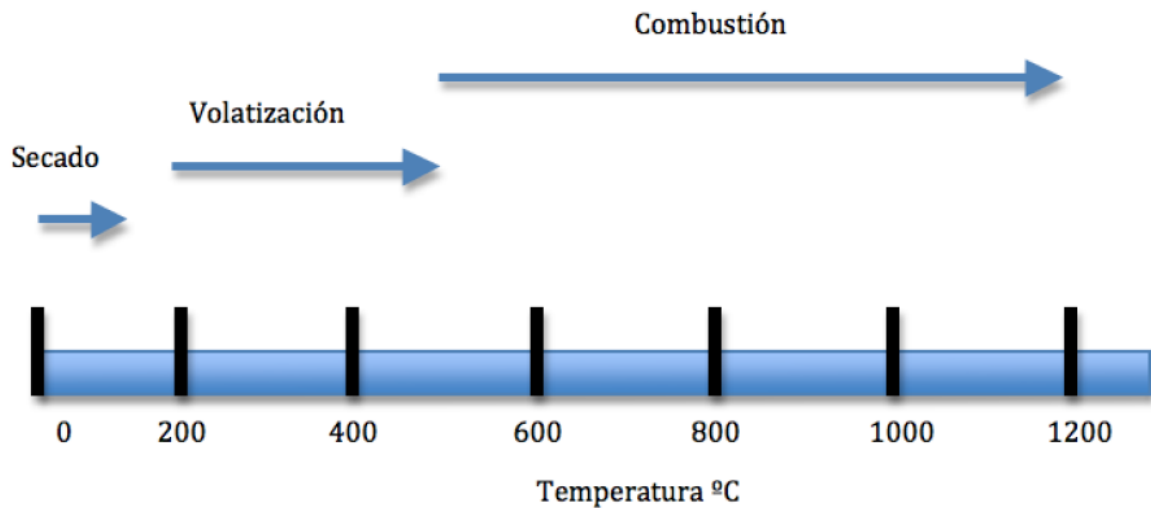


Ilustración 49. Etapas de la combustión.

La biomasa se quema a elevadas temperaturas en el hogar de la caldera, produciendo un vapor que se inyecta en la turbina. En un circuito de agua – vapor, el flujo antes de llegar a la caldera pasa primero por un economizador donde el agua es precalentada mediante un intercambiador de calor en los gases de combustión que salen de la propia caldera, optimizando el proceso. Estos gases de combustión también evitan la formación de inquemados al someterse a un proceso de recirculación por la caldera. El proceso de recirculación sirve para maximizar el poder energético y reducir las emisiones atmosféricas.

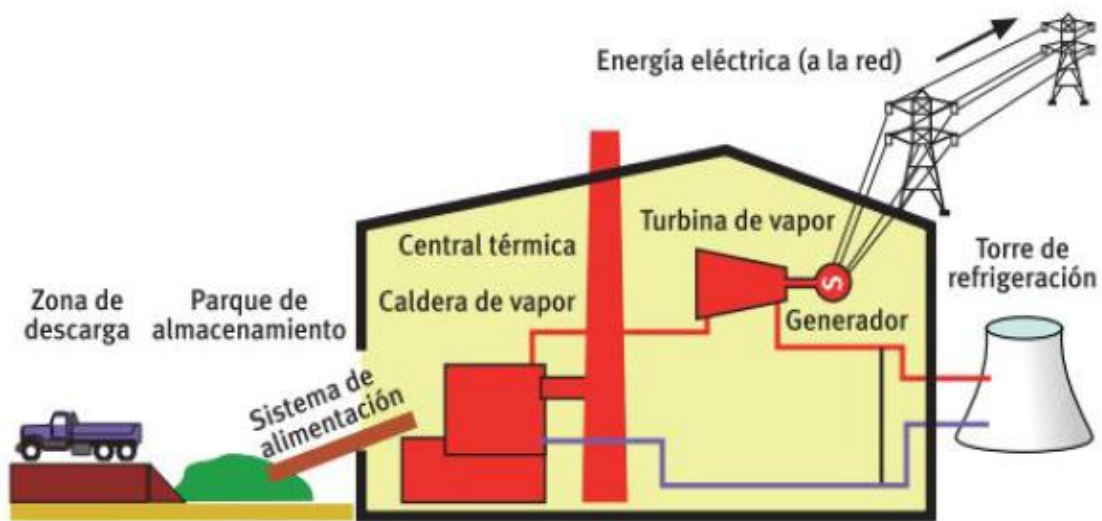


Ilustración 50. Esquema de una planta de producción de electricidad con biomasa. Fuente: IDAE

Turbina de vapor
Combustión en lecho fluido
Combustión en parrilla
Calderas de fondo seco y fondo húmedo
Motores diésel
Turbina de gas o vapor

Tabla 9. Equipos utilizados en el proceso de combustión

### 2.3.8. GRUPO TURBINA-ALTERNADOR

El vapor generado en la caldera se destina a mover una turbina que a su vez acciona un alternador generador de energía eléctrica. La conexión entre el sistema formado por la caldera de biomasa y el turbo grupo se lleva a cabo mediante dos redes de fluido: red de vapor y red de agua de alimentación.

**La turbina y el alternador son los equipos esenciales de la central**, cuando el vapor llega a las máquinas, actúa sobre los álabes de las turbinas. Cuando el vapor ha cedido su energía, es restituida nuevamente al circuito agua-vapor mediante el condensador. Unido al eje de la turbina y el alternador gira un generador de corriente empleado para excitar los polos del rotor del alternador. De esta manera, en los terminales del estator aparece una corriente alterna de media tensión y alta intensidad.

La potencia eléctrica producida por el alternador, manteniendo constantes las condiciones del vapor a la salida de la caldera (presión y temperatura), condiciones del vapor de extracción (presión, caudal y temperatura) y la presión de trabajo del condensador, depende únicamente del caudal de vapor producido.

Mediante un transformador esta corriente altera sus propiedades y pasa a ser alta tensión y baja intensidad, encontrándose ya disponible para ser transportada mediante líneas de alta tensión hacia los centros de distribución y consumo.

#### ○ TURBINA

La turbina de vapor es un motor térmico cíclico rotativo, de combustión externa, que movido por el vapor produce energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético.

Las turbinas pueden considerarse como la parte **MÁS IMPORTANTE DE LA CENTRAL YA QUE SON LAS ENCARGADAS DE MOVER EL GENERADOR PARA PRODUCIR LA ELECTRICIDAD.**

Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más importante es el Ciclo RANKINE, que genera el vapor en una caldera, de la cual sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que, típicamente, es aprovechada por un generador para producir electricidad.

Las turbinas están diseñadas para soportar una temperatura de unos 600° C y una presión de unos 350 bares.

La condensación del vapor de salida de las turbinas se realiza en una serie de haces de tubos aleteados, lo que incrementa su área de transmisión, mediante los cuales el vapor de salida que circula por su interior, transfiere el calor de condensación al aire que es conducido a través de ellos por medio de los ventiladores.

Hay que advertir, por otro lado, que el vapor, antes de entrar en la turbina, ha de ser cuidadosamente deshumidificado. En caso contrario, las pequeñísimas gotas de agua en suspensión que transportaría serían lanzadas a gran velocidad contra los álabes, actuando como si fueran proyectiles y erosionando las paletas hasta dejarlas inservibles.

## ❖ CLASIFICACIONES DE TURBINAS

Existen las turbinas de vapor en una gran variedad de tamaños, desde unidades de 1 hp (0.75 Kw) usadas para accionar bombas, compresores y otro equipo accionado por flecha, hasta turbinas de 2,000,000 hp (1,500,000 Kw) utilizadas para generar electricidad. Hay diversas clasificaciones para las turbinas de vapor modernas, y por ser turbo máquinas son susceptibles a los mismos criterios de clasificación de éstas.

### ✓ **Clasificación, según su grado de reacción:**

- **Turbinas de Acción:** La diferencia fundamental es que en las turbinas de acción no hay cambio de presión en la rueda móvil, obteniéndose el intercambio de energía por el cambio de velocidad absoluta del fluido. El cambio o salto entálpico o expansión es realizada en los álabes directores o las toberas de inyección si se trata de la primera etapa de un conjunto de turbinas, estos elementos están sujetos al estator. En el paso del vapor por el rotor la presión se mantendrá constante y habrá una reducción de la velocidad.
- **Turbinas de Reacción:** Son aquellas en las que el fluido de trabajo sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete. La expansión, es decir, el salto entálpico del vapor puede realizarse tanto en el rotor como en el estator, cuando este salto ocurre únicamente en el rotor la turbina se conoce como de reacción pura.

### ✓ Se las puede clasificar según el salto térmico o presión del vapor a la salida de la turbina en:

- **Turbinas de condensación:** Cuando el vapor de descarga se encuentra a una presión ligeramente superior a la atmosférica. Son las de mayor tamaño, utilizadas en centrales térmicas para generar electricidad. La presión de descarga puede ser inferior a la atmosférica debido a la condensación del vapor de salida.
  - **Turbinas de descarga atmosférica:** son generalmente de baja potencia, antieconómicas si utilizan agua tratada. No utilizan condensador de salida.
  - **Turbinas de contrapresión:** Cuando el vapor de descarga se encuentra a una presión superior a la atmosférica. Se utilizan como expansoras para reducir la presión del vapor generando al mismo tiempo energía. Descargan el vapor a una presión aún elevada, para ser utilizado en procesos industriales.
- ✓ Por la **dirección del flujo de vapor en el interior de la turbina** (al referirnos al movimiento de la corriente de vapor dentro del cuerpo de la turbina).
- **Radiales.** La circulación de vapor se establece en un plano perpendicular al eje de la turbina.
  - **Axiales.** La circulación de vapor transcurre paralelamente al eje de la turbina.

## ❖ ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA TURBINA DE VAPOR:

- ✓ **Rotor.** Es el elemento móvil del sistema. La energía desprendida por el vapor en la turbina se convierte en energía mecánica en este elemento. Dado que la turbina está dividida en un cierto número de escalonamientos, el rotor está

compuesto por una serie de coronas de alabes, uno por cada escalonamiento de la turbina. Los alabes se encuentran unidos solidariamente al eje de la turbina moviéndose con él.

- ✓ **Estator.** El estator está constituido por la propia carcasa de la turbina. Al igual que el rotor, el estator está formado por una serie de coronas de alabes, correspondiendo cada una a una etapa o escalonamiento de la turbina.
- ✓ **Toberas.** El vapor es alimentado a la turbina a través de estos elementos. Su labor es conseguir una correcta distribución del vapor entrante/saliente al/desde el interior de la turbina.

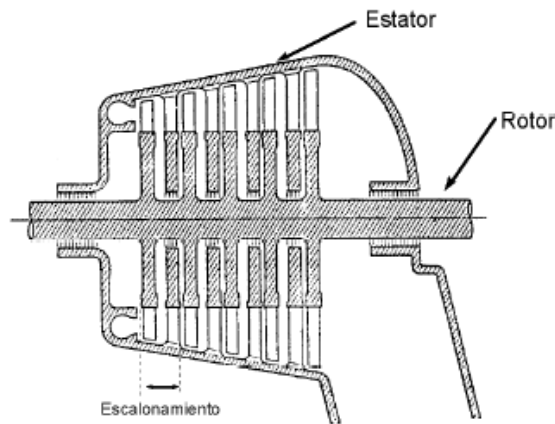


Ilustración 51. Estator y rotor. Fuente: MAVAINSA

Para elegir una turbina debemos tener en cuenta:

- El número de etapas que va a constituir el proceso de generación eléctrica. Debido a la diferencia de presión entre la entrada y la salida, en muchas ocasiones es necesario producir la expansión del vapor en varias etapas para mejorar el rendimiento (multietapa).
- La turbina, como ya hemos visto, está constituida por una serie de partes fijas y móviles intercaladas que cumplen diversas funciones; por un lado, las partes móviles, están constituidas por una serie de álabes dispuestos alrededor de un eje o rotor, los cuales son accionados por el vapor que entra a alta temperatura y presión; por otro lado, las partes fijas reciben el nombre de distribuidores y toberas y cumplen la función de distribuir de forma correcta el vapor entrante y saliente.
- También se debe tener en cuenta el vapor de salida de la turbina. Las turbinas que funcionan a contrapresión consiguen una mayor presión de salida (con aprovechamiento térmico posterior) mientras que las turbinas de condensación consiguen un mayor aprovechamiento energético.

#### 2.3.8.1.ALTERNADOR RECOMENDADO

Según los cálculos realizados en el Anexo 5.1. se recomienda el alternador representado por las siguientes conclusiones:



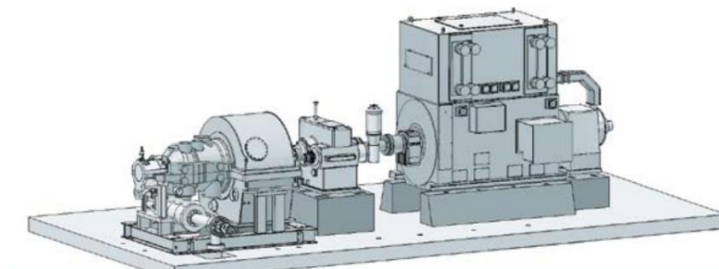
Velocidad del alternador: 1500 ó 1 800 rpm  
 Alcance de potencia: 4000 – 50 000 kVA  
 Tensión del alternador: hasta 15000 V  
 Velocidad de turbina necesaria a incorporar:  
 5000 – 15 000 rpm

Ilustración 52. Alternador recomendado. Fuente: AEG

- ✓ La velocidad buscada en el alternador (1500 rpm) entra en el rango de velocidades.
- ✓ La potencia alcanzada a la salida del alternador (13,52 MVA) entra en el rango de potencias que puede conseguir dicho equipo (4 MVA – 50 MVA).
- ✓ La tensión de 15 kV del alternador (dentro del rango que limita al equipo) es transformada para poder incorporarse a la red eléctrica.
- ✓ La velocidad de giro de la turbina a acoplar al alternador es de hasta 12.000 rpm.

### 2.3.8.2. TURBINA RECOMENDADA

Según los cálculos realizados en el Anexo 5.1. se recomienda la turbina representada a continuación:



#### SST-150

##### Hasta 20 MW

La SST-150 es una turbina de carcasa simple, que acciona el generador hasta 1.500 ó 1.800 rpm y tiene un diseño en paquete sobre bastidor (skid). Para generar energía, aporta elevada eficiencia junto con una configuración muy compacta.

##### Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 20 MW
- Presión de entrada de hasta 103 bar
- Temperatura de vapor de entrada de hasta 505 °C
- Velocidad de giro de hasta 13.300 rpm
- Toma de hasta 25 bar
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 10 bar o condensación de hasta 0,25 bar
- Área de escape 0,28 – 1,6 m<sup>2</sup>

Ilustración 53. Turbina recomendada. Fuente: Siemens

### 2.3.9. CONDENSADOR

Como su nombre indica, sus principales objetivos son, por un lado, condensar el vapor proveniente de la turbina de vapor (condiciones próximas a las de saturación) y, por otro, evacuar el calor de condensación al exterior (utilizando aire, agua o ambos).

TIPO DE ENFRIAMIENTO	CARACTERÍSTICAS
AIRE	Circula flujo de aire
AGUA	Utilizan una torre de enfriamiento que enfría el agua, y ésta cede calor al ambiente.
AIRE/AGUA	El agua y aire son enfriados con evaporación del agua que circula a contracorriente del flujo del aire

Tabla 10. Tipo de enfriamiento en el condensador.

Fuente: Máquinas y equipos térmicos. ISBN: 978-84-283-3869-1

Para una central térmica de vapor en la que existe un gran caudal que debe ser refrigerado **EL TIPO DE ENFRIAMIENTO MÁS CONVENIENTE ES CON AGUA.**

- **ENFRIAMIENTO CON AGUA:**

En el condensador el vapor procedente de la turbina cede el calor al agua de refrigeración, produciéndose así su condensación total. El condensado se deposita en el fondo del recipiente (pozo de condensado) de donde es extraído por la bomba para el nuevo ciclo.

Como podemos apreciar en la siguiente ilustración, el agua circula por el interior de los tubos del circuito mientras que el vapor procedente de la turbina circula alrededor de los tubos, provocándose así un intercambio de calor y consiguiendo condensar gran parte del vapor.

Por otro lado, el agua caliente vuelve de nuevo a la torre de refrigeración donde será enfriada de nuevo continuando así su ciclo cerrado.

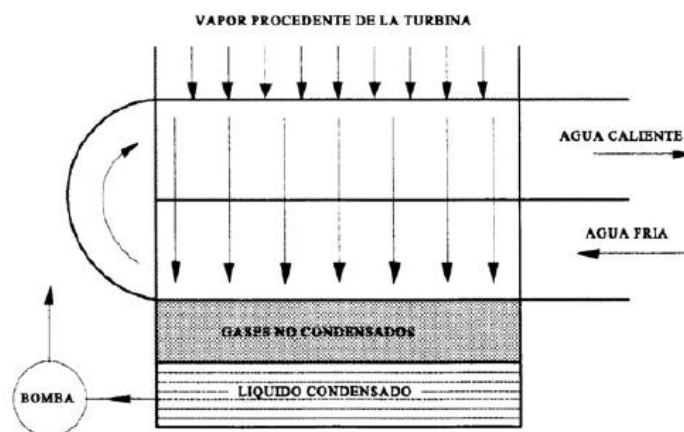


Ilustración 54. Condensador

Se deben tener en cuenta las siguientes precauciones:

- Se debe mantener limpios los tubos del condensador y la superficie de relleno de la torre de manera de mantener un flujo laminar del agua.
- Se debe de evitar el crecimiento de algas en el agua.

- La presión de condensación se controla mediante el caudal de agua circulado por el condensador
- Eyectores: Su uso es para eliminar los gases del condensador, y así mantener la presión en él menor que la atmosférica. Esto hace que la salida de gases no sea natural sino forzada.

El eyector es un conjunto formado por una tobera, una cámara de mezcla y un difusor. De la conducción que va de la caldera a la turbina se extrae una pequeña cantidad de vapor que se lleva a la tobera del eyector, aquí se acelera enormemente y cuando llega a la cámara de mezcla su presión es muy pequeña.

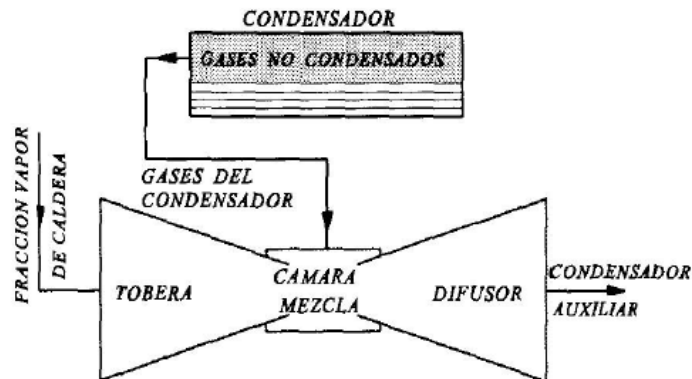


Ilustración 55. Componentes de un eyector. Fuente: Termodinámica; Autor: Çengel

### 2.3.9.1. CONDENSADOR RECOMENDADO:

Según los cálculos realizados en el “5.1. Anexo I. Cálculos” se recomienda el siguiente condensador representado por las siguientes conclusiones:

型号 Model	冷却面积 Cooling Area (m <sup>2</sup> )	型式 Type	外型尺寸 Overall dimensions (mm)	进汽口尺寸 Steam inlet size (mm)	进/出水口尺寸 Water inlet and outlet size (mm)	冷却水量 Cooling Water Flow (t/h)
NC14	140	单道双流程 Single-Pass Two-Flow	4160x2850x1550	800	250	450-650
NC16	160		3910x2680x1485	700	250	600-800
NC28	280		5000x3395x1670	1100	300	800-1100
NC42	420	双道双流程 Two-Pass Two-Flow	4965x3510x2555	1220	400	1200-1800
NC56	560		5090x3850x2805	1100	400	1600-2400
NC100	1000		6125x4305x3660	2000x1350	600	2400-3500
NC125	1250		7291x4315x3844	2000x1350	700	2500-3600
NC125-1	1250		7277x4410x2903	3640x1140	600	2500-3600
NC160	1600		8305x4721x3312	3640x1140	600	2600-4000
NC200	2000		8305x4721x3312	3640x1140	700	4300-6400
NC220	2200		9020x5195x3710	4040x2000	700	4300-6400
NC350	3500		9330x5740x4235	6000x1650	800	7000-10500

Ilustración 56. Condensador recomendado. Fuente: <https://spanish.alibaba.com/>

- ✓ El condensador recomendado (NC 42) es capaz de dar un flujo de enfriamiento de agua (entre 1.200 t/h a 1.800 t/h) acorde a nuestras necesidades (1.516,14 t/h).

### 2.3.10. GENERADOR

La energía eléctrica generada se vierte a la red pública mediante una subestación transformadora, donde se eleva la tensión, desde la generación de 15000V (15 kV) hasta la de la red eléctrica a 132 kV.

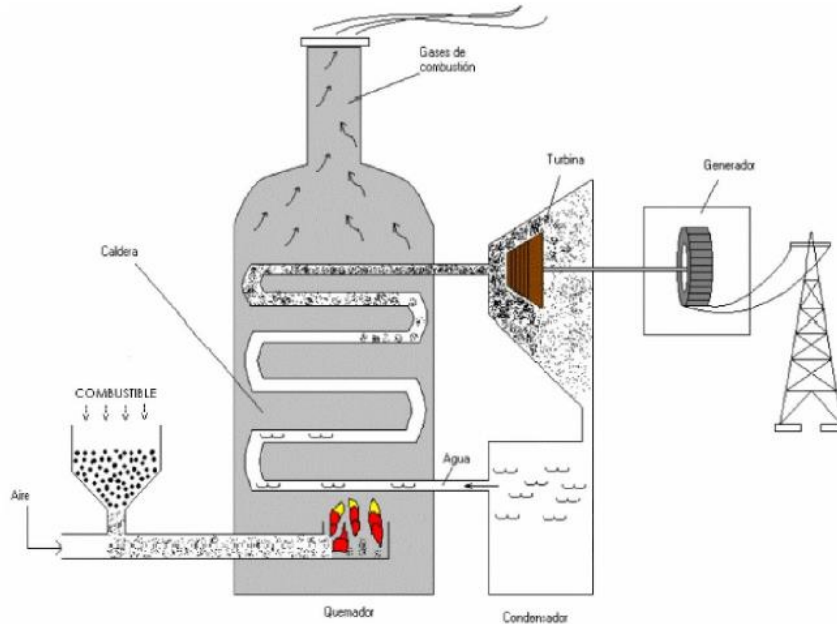


Ilustración 57. Resumen de la distribución de los principales equipos de una central. Fuente: Fenercom

### 2.3.11. CALDERA

En este apartado vamos a explicar qué características tiene la caldera elegida y porqué hemos decidido instalar la caldera seleccionada en lugar de otra. Para comenzar debemos indicar que existen diferentes tecnologías para el aprovechamiento de la energía de biomasa:

La caldera, en la industria, es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. La evaporación se produce mediante transferencia de calor por radiación y convección sobre las paredes membranas de la caldera. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado.

Según la ITC-MIE-AP01, “caldera es todo aparato de presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor”.

Dependiendo de una serie de requisitos se pueden realizar diferentes clasificaciones de las calderas existentes en el mercado:

Según el elemento portador

- Calderas de agua caliente
- Calderas de agua sobrecalentada
- Calderas de vapor

Según la distribución del fluido y gases

- Calderas pirotubulares
- Calderas acuotubulares

Según su tecnología de combustión

- Calderas de parrilla
- Calderas de combustibles pulverizados
- Calderas de lecho fluido

Una caldera diseñada para orujillo funciona prácticamente igual que una caldera de combustibles fósiles. A diferencia de otros tipos de biomasa el orujillo es homogéneo así que no existe problemas en términos de tamaño y humedad por lo que la única diferencia es que no quema combustibles fósiles y, por lo tanto, se consigue un importante ahorro económico en la compra de combustible y una gran disminución de emisiones de carbono y azufre.

#### 2.3.11.1. TIPO DE CALDERA RECOMENDADA

*“La Vitomax 200-HS es un generador de vapor de alta presión a gasóleo/gas según la Categoría IV de la Directiva de Equipos a Presión*

*97/23/CE con una presión de servicio admisible de 6 a 25 bar.*

*Ya durante el desarrollo de la caldera, se estableció una estrecha colaboración con fabricantes de quemadores con presencia internacional. El resultado son dos modelos de caldera dentro de una misma serie con unos valores de emisiones mínimos y una elevada flexibilidad:*

- *Vitomax 200-HS, modelo M237*

*Producción de vapor: de 0,7 a 3,8 t/h*

*Presión de servicio hasta 25 bar*

*Gracias a la disposición lateral del cañón del quemador, fue posible desarrollar una caldera muy compacta sin por ello renunciar a las consabidas ventajas constructivas.*

- *Vitomax 200-HS, modelo M235*

*Producción de vapor: de 4 a 25 t/h*

*Presión de servicio hasta 25 bar*

*Una caldera de tipo clásico. El cañón del quemador está centrado, ligeramente desplazado hacia abajo; el segundo y el tercer paso de humos se encuentran ubicados en la parte superior, en una posición simétrica.”*

<b><i>Ventajas de la Vitomax 200-HS</i></b>	
<i>Con un sólido embalaje de protección para el transporte y el montaje de serie.</i>	<i>Homologación según la Directiva Europea de equipos a presión 97/23/CE o según la normativa específica de cada país.</i>
<i>No se ve afectada por las fluctuaciones de carga.</i>	<i>Consumo de energía reducido.</i>
<i>Elevada calidad del vapor gracias a su amplia cámara de vaporización y su gran superficie de vaporización, así como al secador de vapor integrado.</i>	<i>Caldera de tres pasos de humos para una combustión poco contaminante con unas reducidas emisiones de óxidos de nitrógeno.</i>
<i>Escasas pérdidas por radiación gracias a un aislamiento térmico de 120 mm compuesto por dos materiales y a la refrigeración por agua tanto de la totalidad de las superficies exteriores de la caldera como del acoplamiento del quemador.</i>	<i>Reducida pérdida de carga en pasos de humos gracias a una superficie de transmisión por convección con tubos de humos de grandes dimensiones.</i>
<i>Carro del quemador extraíble disponible como accesorio para calderas de hasta 3,8 t/h, lo cual facilita las labores de mantenimiento y simplifica el ajuste del quemador.</i>	<i>Cubierta transitable para la parte superior de la caldera incluida en el volumen de suministro, lo cual facilita el montaje y el mantenimiento y protege de daños el aislamiento térmico.</i>
<i>Bancada autoportante de gran estabilidad que hace innecesarias bancadas de obra civil.</i>	<i>El amplio surtido de accesorios perfectamente armonizados simplifica la integración de sistemas.</i>
<i>Elevada fiabilidad y larga vida útil.</i>	

*Tabla 11. Ventajas de la caldera Vitomax 200-HS. Fuente: VIESSMANN*

Fuente: VIESSMANN



*Ilustración 58. Caldera recomendada. Fuente: Vitomax 200-HS Modelo M237*

- ✓ El flujo de biomasa en t/h es de 2,68, entrando en el rango establecido para la capacidad a introducir en la caldera.
- ✓ Se utiliza orujillo como combustible (combustible de biomasa).
- ✓ Se utiliza una presión de 25 bar (la máxima presión que soporta la caldera es de 26 bar).

## 2.4. IMPACTO SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL

### 2.4.1. IMPACTO SOCIAL

Conforme la sociedad avanza y en pleno debate sobre el impacto humano provocado en el planeta en la generación de energía cada vez la humanidad es más consciente de la importancia del desarrollo sostenible y respetuoso con el medioambiente y con la propia sociedad, por lo que es de vital importancia tener en cuenta los diferentes impactos que se puedan crear de forma social y medioambiental:

Impacto social: Realizaremos una estimación de empleos directos generados gracias a la producción eléctrica de 10 MW (calculada en el Anexo I: Cálculos) por la planta de biomasa, por lo que detallamos el siguiente cálculo:

Plantas de biomasa		
MW	Empleo directo	Ratio (Empleo/MW)
1	3,1	56

Tabla 12. Coeficientes entre empleo y MW

Empleo anual DIRECTO generado en la planta de biomasa=

$$=3,1 \times 10 = 31 \text{ empleos}$$

Empleo anual INDIRECTO generado en las zonas rurales próximas a la planta=

$$=10 \text{ MW} \times 56 = 560 \text{ empleos}$$

**TOTAL: 560 + 31 = 591 empleos**

Los empleos generados son de gran diversidad de diferentes perfiles (albañiles, agricultores, técnicos de obra y de mantenimiento, ingenieros energéticos o industriales...) enriqueciendo esta zona rural.

### 2.4.2. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Como se indica en el artículo sobre el vertido de orujo en el río Guadalquivir publicado por el Diario Córdoba (Julio, 2017) sigue habiendo una gran cantidad de orujo que además de que no se aprovecha provoca un impacto medioambiental importante (provocando la muerte de decenas de peces y un daño irreparable en el ecosistema), por lo que el aprovechar el orujo y a su vez el orujillo (así como todos los residuos) debe de ser una función primordial de la sociedad, con lo que se obtendrían, al menos, los siguientes beneficios:

- Eliminación y aprovechamiento de un residuo agrícola actual
- Obtención de energía (en este caso eléctrica) gracias al orujillo
- Nuevos empleos en la zona
- Evitar importaciones de combustibles contaminantes para la obtención de energía, consiguiendo obtener energía propia y renovable, evitando así emitir toneladas de emisiones a la atmósfera; así como evitar conflictos políticos para obtener yacimientos de combustibles fósiles.

Aquí estudiaremos como afecta la planta de biomasa en las emisiones de gases de efecto invernadero que emite y LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> QUE EVITA A LA ATMÓSFERA EN COMPARACIÓN CON LAS CENTRALES DE CICLO COMBINADO DE GAS NATURAL en generación eléctrica con un rendimiento medio del 50%.

Balance de emisiones CO<sub>2</sub>

<b>EMISIONES EVITADAS en el período 2011 – 2020 (t CO<sub>2</sub>)</b>	
Energías Renovables – Generación de Electricidad (*)	
Hidroeléctrica normalizada	592.172
Eólica normalizada	62.712.996
Eólica marina	1.554.616
Solar termoeléctrica	32.569.924
Solar fotovoltaica	12.934.085
<b>BIOMASA</b>	<b>10.587.673</b>
Biogás**	3.093.316
Residuos domésticos renovables	1.586.777
Energías del mar	235.108
Geotermia	217.767
<b>TOTAL ÁREAS ELÉCTRICAS</b>	<b>126.084.435</b>
Energías Renovables – CALEFACCIÓN/REFRIGERACIÓN	
Biomasa y residuos (cal/ref)	11.280.173
Biogás (cal/ref)**	975.152
Geotérmica (cal/ref)	65.412
Paneles solares y otros (cal/ref)	4.969.922
Bomba de calor (aerotérmica* geotérmica)	486.308
<b>TOTAL ÁREAS TÉRMICAS</b>	<b>17.776.967</b>
Biocarburantes – TRANSPORTES	
Biodiesel	24.516.882
Bioetanol	2.543.943
<b>TOTAL ÁREA TRANSPORTE</b>	<b>27.060.825</b>

ACUMULADO CO <sub>2</sub> evitado en el período 2011 – 2020 (tCO <sub>2</sub> )	170.922.226
---	-------------

\*Emisiones evitadas frente a centrales de ciclo combinado de gas natural en generación eléctrica con un rendimiento medio del 50%.

\*\*Adicionalmente, se estima que en el período 2011 – 2020 las emisiones acumuladas de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O evitadas por las nuevas instalaciones de digestión anaerobia de purines y estiércoles, expresadas como t CO<sub>2</sub>\_eq, serían 10.069.317 t CO<sub>2</sub>\_eq asociadas al objetivo eléctrico de biogás y 4.277.718 t CO<sub>2</sub>\_eq asociadas al objetivo térmico.

Fuente: Elaboración IDAE

\*\*

Factores de emisiones de CO <sub>2</sub>			
	Fuente	Valores aprobados	Valores previos (****)
		kg CO <sub>2</sub> /kWh E. final	kg CO <sub>2</sub> /kWh E. final
Electricidad convencional Nacional	(*)	0,357	
Electricidad convencional peninsular	(**)	0,331	0,649
Electricidad convencional extrapeninsular	(**)	0,833	0,981
Electricidad convencional Baleares	(**)	0,932	
Electricidad convencional Canarias	(**)	0,776	
Electricidad convencional Ceuta y Melilla	(**)	0,721	
Gasóleo calefacción	(***)	0,311	0,287
GLP	(***)	0,254	0,244
Gas natural	(***)	0,252	0,204
Carbón	(***)	0,472	0,347
Biomasa no densificada	(***)	0,018	neutro
Biomasa densificada (pelets)	(***)	0,018	neutro

Tabla 13. Factores de emisiones de CO<sub>2</sub>. Fuente: MINETAD

Cálculo de emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas	Planta de Biomasa
Producción eléctrica neta (MWh/año)	78.520,61
Factor de conversión (kg CO <sub>2</sub> /kWh)**	0,018
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> EVITADAS (t de CO<sub>2</sub>)***</b>	<b>1.413,37</b>

Tabla 14. Emisiones evitas de CO<sub>2</sub>, en toneladas

\*\*\*Emisiones evitadas frente a centrales de ciclo combinado de gas natural en generación eléctrica con un rendimiento medio del 50%.

- A diferencia de los combustibles fósiles, EL DIÓXIDO DE CARBONO originado en el proceso de combustión de la biomasa ES DEVUELTO A LA ATMÓSFERA, desde donde fue tomado durante su generación. Según esto, el uso de la biomasa como combustible no hace aumentar el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera y, por lo tanto, no atribuye el efecto invernadero. En el caso del monóxido de carbono, las emisiones que se producen al quemar biomasa son superiores que cuando se quema carbón, aunque influye notablemente la tecnología utilizada. La reducción en la formación de este compuesto se consigue cuando el equipo de combustión funciona adecuadamente y se garantiza que ésta sea completa.
- Los compuestos de azufre que se forman durante la combustión son los ÓXIDOS DE AZUFRE, que pueden llegar a convertirse en ácido sulfúrico, siendo una de las sustancias que contribuyen a la lluvia ácida. También se pueden formar óxidos de azufre en los procesos de fermentación y en la pirolisis de la biomasa. Pero, en general, estos compuestos no constituyen un problema en el caso de LA BIOMASA YA QUE NO SUELE TENER AZUFRE, O SI LO TIENE ES EN PEQUEÑAS CANTIDADES.

- Los ÓXIDOS DE NITRÓGENO se forman por la oxidación del contenido en la biomasa y en el aire, que se necesita en algunos de los procesos de uso y transformación de aquélla. Parece que, como LA BIOMASA NORMALMENTE SE QUEMA A TEMPERATURAS INFERIORES A LAS QUE LO HACEN LOS COMBUSTIBLES FÓSILES, LA FORMACIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO ES INFERIOR A LA QUE SE PRODUCE CON ESTOS ÚLTIMOS. El modo de proceder a la hora de reducir las emisiones de los mismos es reduciendo su formación, que se consigue controlando rigurosamente el proceso de combustión, tanto en lo que se refiere al nivel térmico en el que se desarrolla como al porcentaje de aire.

DIRECTIVA (UE) 2015/2193 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO  
De 25 de noviembre de 2015

Contaminante	Biomasa sólida	Otros combustibles sólidos	Gasóleo	Combustibles líquidos distintos del gasóleo	Gas natural	Combustibles gaseosos distintos del gas natural
SO <sub>2</sub>	200 <sup>(1)</sup>	400	—	350 <sup>(2)</sup>	—	35 <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup>
NO <sub>x</sub>	300 <sup>(5)</sup>	300 <sup>(5)</sup>	200	300 <sup>(6)</sup>	100	200
Partículas	20 <sup>(7)</sup>	20 <sup>(7)</sup>	—	20 <sup>(8)</sup>	—	—

<sup>(1)</sup> El valor no se aplica en el caso de instalaciones que quemen exclusivamente biomasa sólida leñosa.

<sup>(2)</sup> Hasta el 1 de enero de 2025, 1 700 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de instalaciones que formen parte de una pequeña red aislada o de una microrred aislada.

<sup>(3)</sup> 400 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de gases de bajo poder calorífico procedentes de hornos de coque, y 200 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de gases de bajo poder calorífico procedentes de altos hornos (industria siderúrgica).

<sup>(4)</sup> 100 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de biogás.

<sup>(5)</sup> 500 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de instalaciones con una potencia térmica nominal total igual o superior a 1 MW e inferior o igual a 5 MW.

<sup>(6)</sup> Hasta el 1 de enero de 2025, 450 mg/Nm<sup>3</sup> cuando quemen fuelóleo pesado que contenga entre 0,2 % y 0,3 % N y 360 mg/Nm<sup>3</sup> cuando quemen fuelóleo pesado que contenga menos de 0,2 % N en el caso de instalaciones que formen parte de una pequeña red aislada o de una microrred aislada.

<sup>(7)</sup> 50 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de instalaciones con una potencia térmica nominal total igual o superior a 1 MW e inferior o igual a 5 MW; 30 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de instalaciones con una potencia térmica nominal total superior a 5 MW e inferior o igual a 20 MW.

<sup>(8)</sup> 50 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de instalaciones con una potencia térmica nominal total igual o superior a 1 MW e inferior o igual a 5 MW.

Tabla 15. Valores límite de emisión (mg/Nm<sup>3</sup>) para las nuevas instalaciones de combustión medianas que no sean motores ni turbinas de gas. Fuente: Directiva (UE) 2015/2193 del Parlamento Europeo y del Consejo

Contaminante	Tipo de instalación de combustión medianas	Gasóleo	Combustibles líquidos distintos del gasóleo	Gas natural	Combustibles gaseosos distintos del gas natural
SO <sub>2</sub>	Motores y turbinas de gas	—	120 <sup>(1)</sup>	—	15 <sup>(2)</sup>
NO <sub>x</sub>	Motores <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup>	190 <sup>(5)</sup>	190 <sup>(5)</sup> <sup>(6)</sup>	95 <sup>(7)</sup>	190
	Turbinas de gas <sup>(8)</sup>	75	75 <sup>(9)</sup>	50	75
Partículas	Motores y turbinas de gas	—	10 <sup>(10)</sup> <sup>(11)</sup>	—	—

<sup>(1)</sup> Hasta el 1 de enero de 2025, 590 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores diésel que formen parte de una pequeña red aislada o de una microrred aislada.

<sup>(2)</sup> 40 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de biogás.

<sup>(3)</sup> Los motores que funcionen entre 500 y 1 500 horas al año podrán quedar exentos del cumplimiento de esos valores límite de emisión en caso de que apliquen medidas primarias para limitar las emisiones de NO<sub>x</sub> y cumplan los valores límite de emisión establecidos en la nota 4 a pie de página.

<sup>(4)</sup> Hasta el 1 de enero de 2025 en instalaciones que formen parte de una pequeña red aislada y de una microrred aislada, 1 850 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores de dos combustibles en modo líquido y 380 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores de dos combustibles en modo gas; 1 300 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores diésel con ≤ 1 200 rpm con una potencia térmica nominal total inferior o igual a 20 MW y 1 850 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores diésel con una potencia térmica nominal total superior a 20 MW; 750 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores diésel con > 1 200 rpm.

<sup>(5)</sup> 225 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de los motores de dos combustibles en modo líquido.

<sup>(6)</sup> 225 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de motores diésel con una potencia térmica nominal total inferior o igual a 20 MW con ≤ 1 200 revoluciones por minuto (rpm).

<sup>(7)</sup> 190 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de los motores de dos combustibles en modo gas.

<sup>(8)</sup> Estos valores límite de emisión solo son aplicables por encima de una carga del 70 %.

<sup>(9)</sup> Hasta el 1 de enero de 2025, 550 mg/Nm<sup>3</sup> para instalaciones que formen parte de una pequeña red aislada o de una microrred aislada.

<sup>(10)</sup> Hasta el 1 de enero de 2025, 75 mg/Nm<sup>3</sup> para los motores diésel que sean parte de una pequeña red aislada o de una microrred aislada.

<sup>(11)</sup> 20 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso de instalaciones con una potencia térmica nominal total igual o superior a 1 MW e inferior o igual a 5 MW.

Tabla 16. Valores límite de emisión (mg/Nm<sup>3</sup>) para los motores y las turbinas de gas nuevos. Fuente: Directiva (UE) 2015/2193 del Parlamento Europeo y del Consejo

## 2.5. ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico de la planta de biomasa es realizado de forma superficial, sin entrar en muchos detalles y DE FORMA APROXIMADA TENIENDO COMO OBJETIVO PODER OBTENER UNA IDEA GENERAL DEL COSTE FINAL de dicha central. Se basa principalmente en dos aspectos:

- 1. Análisis de costes
- 2. Inversión

### 1. Análisis de costes:

*“En este apartado se analizan los precios que pueden llegar a pagar por la biomasa los productores de energía; es decir, se analizan los precios desde el lado de la demanda de biomasa.*

*En general, los costes de inversión para instalaciones de biomasa son superiores a sus homólogos para instalaciones de combustibles convencionales.*

*Esto se debe, no solo a la falta de desarrollo de sistemas de producción en serie para algunos componentes, sino que también influyen las características especiales requeridas por los equipos para poder utilizar biomasa de forma eficiente.*

*En cambio, cuando nos referimos a los costes de operación o explotación de plantas de biomasa, su comparación frente a combustibles convencionales puede ser favorable o no según el tipo de aplicación.*

*La principal componente de los costes de explotación en este tipo de instalaciones es la compra de la biomasa. Los costes debidos al suministro de la biomasa varían según la cantidad demandada, la distancia de transporte y los posibles tratamientos para mejorar su calidad, como el secado, el astillado o la politización. A ello hay que añadir la disponibilidad del combustible, su estacionalidad y la variación de los precios, íntimamente ligados al comportamiento de las cosechas, en el caso de restos agrícolas y de la industria agroalimentaria.*

*La evolución esperada de los costes normalizados de energía **eléctrica** con biomasa durante las próximas décadas experimentara una reducción en términos reales, según se expresa en la siguiente figura. En la misma se presenta la evolución de estos costes, considerando para cada año, el intervalo de costes entre la tecnología con mayor coste y la de menor coste para el tamaño de planta y tipo de biomasa indicados.*

*Fuente: Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020*

Examinamos los costes teniendo en cuenta los costes fijos y los costes variables:

### **COSTES FIJOS:**

- ✓ Coste de equipos (obtenido de los catálogos de los equipos recomendados, o en su defecto de equipos de características similares):

- Alternador: 3.000.000
- Turbina: 5.100.000 €
- Caldera: 9.250.000 €
- Condensador: 900.000 €
- Torre de refrigeración: 600.000 €
- Bomba de alimentación: 5.000 €
- Bomba de condensados: 5.000 €
- Resto de equipos: 3.000.000 €

TOTAL PARTIDA: 21.860.000€

- ✓ Coste de compra del solar (146.405 m<sup>2</sup>): 1.500.000€\*

*\*Valor aproximado, teniendo en cuenta las tablas estándar y precios medios anuales de las tierras de uso agrario (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)*

TOTAL PARTIDA: 1.500.000€

- ✓ Coste de mano de obra de la instalación:

En la planta de biomasa se necesita multitud de trabajadores, pero no existe uniformidad laboral ya que dependiendo del sector al que pertenezcan, de su temporalidad laboral, o del rango en el que se encuentren variará su salario, por lo que hemos realizado un cálculo rápido incluyendo el SALARIO MÍNIMO ANUAL ACTUAL DE 10.302,60€ (14 pagas) y el NÚMERO DE TRABAJADORES NECESARIOS TOTAL DE 591 EMPLEOS (calculado en el apartado “2.4.1. Impacto Social”)

$$10.302,60€ \times 591 \text{ empleos} = 6.088.836,6 \text{ €/año}^*$$

*\*En el sumatorio se tendrá en cuenta este valor en un año y a lo largo de 15 años*

TOTAL PARTIDA (1 año): 6.088.836,6 €/año  
(15 años): 91.332.549 €/15años

- ✓ OBRA CIVIL (incluye movimiento de tierras, edificación y urbanización)

- Movimiento de tierras: 250.000 €
- Edificación del ciclo Rankine: 3.000.000 €
- Urbanización: 500.000 €

TOTAL PARTIDA: 3.750.000 €

### **SUMATORIO DE LOS COSTES FIJOS:**

AÑO 1: 33.198.836,6 €
AÑO 15: 118.442.549,00 €

## COSTES VARIABLES:

- ✓ Coste de orujillo en un año:

$$2,68 \text{ t/h} \times 7416 \text{ h/año}_{(\text{funcionamiento})} = 19.874,88 \text{ t/año}$$

A continuación, extraemos una media del coste de Orujillo de los últimos 2 años en €/t (IDAE):

Precios en €/t	2T/2015	3T/2015	4T/2015	1T/2016	2T/2016	3T/2016	4T/2016	1T/2017	2T/2017	3T/2017	4T/2017
Pellet certificado A1 ensacado	196,59	187,72	187,61	183,62	182,69	181,99	186,12	189,95	180,23	182,25	187,62
Pellet certificado A1 a granel	180,06	174,96	167,09	169,21	167,62	166,16	170,25	175,15	171,00	178,17	174,03
Pellet no certificado a granel	175,50	164,44	166,89	171,37	166,94	171,77	173,02	171,30	172,86	168,56	167,37
Leñas	108,82	123,18	125,01	126,35	115,16	136,77	135,70	142,66	124,11	135,16	134,33
Astilla elaborada	99,86	96,98	95,49	86,88	88,69	93,00	91,56	96,28	85,64	89,17	86,69
Hueso de aceituna a granel	100,92	116,19	107,29	89,94	81,59	82,59	83,03	92,37	85,97	92,74	101,88
Cáscaras frutos a granel	64,12	61,18	57,65	56,21	61,35	61,71	59,16	58,27	57,54	57,05	59,15
Astilla en bruto	50,38	48,07	48,40	45,07	46,17	47,15	45,69	46,83	48,32	49,25	48,97
<b>Orujillo</b>	<b>38,37</b>	<b>36,25</b>	<b>38,55</b>	<b>31,22</b>	<b>21,68</b>	<b>18,03</b>	<b>14,25</b>	<b>13,93</b>	<b>12,46</b>	<b>14,43</b>	<b>17,95</b>

Ilustración 59. Evolución de precios medios (€/t) de biomasa para usos térmicos. Fuente: IDAE

$$19.874,88 \text{ t/año} \times 18 \text{ €/t} = 357.747,84 \text{ €/año}$$

\*En el sumatorio se tendrá en cuenta este valor en un año y a lo largo de 15 años

TOTAL PARTIDA (1 año): 357.747,84 €/año  
(15 años): 5.366.217,6 €/15años

- ✓ Costes de transporte:

El coste de transporte es función de la distancia entre la extractora que suministra la materia prima a la planta de combustión y del volumen de materia prima transportado, en nuestro caso esta distancia es de 3,9 km.

Tomando como base de cálculo un año de producción, tenemos que la cantidad de materia prima disponible de orujillo sería de:

$$19.874,88 \text{ t/año} \times 8 \text{ €/t}^{**} = 158.999,04 \text{ €/año}$$

\*\*Dato extraído del artículo "Logística de la biomasa del olivar como fuente energética renovable"

TOTAL PARTIDA (1 año): 158.999,04 €/año  
(15 años): 2.384.985,6 €/15años

- ✓ Coste anual de operación y mantenimiento:

Extraemos el valor en c€/kwh de la media de los últimos 2 años (0,43 c€/kWh).

Se presentan los datos de comparación de la evolución de precios (c€/kWh) también en formato tabla:

Precios en c€/kWh	2T 2015	3T 2015	4T 2015	1T 2016	2T 2016	3T 2016	4T 2016	1T 2017	2T 2017	3T 2017	4T 2017
GASOIL C	5,69	5,11	4,71	3,82	4,31	4,63	4,74	5,44	4,96	4,74	4,81
Pellet certificado A1 a granel	3,78	3,68	3,51	3,55	3,52	3,49	3,58	3,68	3,59	3,74	3,66
Pellet no certificado a granel	3,69	3,45	3,51	3,60	3,51	3,61	3,63	3,60	3,63	3,54	3,52
Astilla elaborada	2,84	2,76	2,71	2,47	2,52	2,64	2,60	2,74	2,43	2,53	2,46
Hueso aceituna a granel	2,27	2,62	2,42	2,03	1,84	1,86	1,87	2,08	1,94	2,09	2,29
<b>Orujillo térmico</b>	<b>0,93</b>	<b>0,88</b>	<b>0,93</b>	<b>0,75</b>	<b>0,52</b>	<b>0,44</b>	<b>0,34</b>	<b>0,34</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,43</b>

20 de febrero de 2018

Ilustración 60. Datos de comparación de la evolución de precios (c€/kWh). Fuente: IDAE

$$78.520,61 \text{ MWh} \times \frac{1000 \text{ kWh}}{1 \text{ MWh}} \times 0,43 \frac{\text{c€}}{\text{kWh}} \times \frac{1 \text{ €}}{100 \text{ c€}} = 337.638,62 \text{ €}$$

TOTAL PARTIDA (1 año): 337.638,62 €/año  
(15 años): 5.064.579,3 €/15años

- ✓ Costes administrativos:  
Se le estima un coeficiente al coste administrativo de un 5% (1,05).

### SUMATORIO DE LOS COSTES VARIABLES:

AÑO 1:	854.385,5 x 1,05:	897.104,78 €
AÑO 15:	12.815.782,5 x 1,05:	13.456.571,6 €

## 2. Inversión:

Según el marco normativo vigente recurrimos al Plan de Energías Renovables 2011 – 2020 (IDAE), donde se destaca que la inversión necesaria para una planta de biomasa por cada kW de potencia eléctrica es de 2.031 €.

$$10,588 \text{ MW} \times \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \times \frac{2.031 \text{ €}}{\text{kW instalado}} = \mathbf{21.504.228 \text{ €}}$$

## 2.6. ANÁLISIS DAFO

FORTALEZAS	DEBILIDADES
Recurso renovable y competitivo Energía limpia y sostenible, reducción GEI Creación de empleo, directo e indirecto, en zonas rurales Aprovechamiento de residuos contaminantes actuales Nuevos sistemas de generar energía fortaleciendo la red eléctrica española	Disponibilidad limitada Difícil coordinación logística Costes de inversión elevados Pocas referencias a nivel estatal Emisión de partículas y NO <sub>x</sub> en la atmósfera
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
Necesidad de obtener energía renovable Desarrollo rural de la comarca Sector en crecimiento y con buenas expectativas de futuro Reformas energéticas a favor de las energías renovables	Mercado aún muy centralizado Desconocimiento social Competencia con otras aplicaciones que tenga el orujillo Reformas energéticas en contra de las energías renovables

Tabla 17. Análisis DAFO. Fuente: Elaboración propia

## 2.7. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA

### 2.7.1. DATOS TÉCNICOS PRINCIPALES DE LA PLANTA

Ubicación	Montilla (Córdoba)
Combustible	Orujillo
Potencia eléctrica en bornes del alternador	11,49 MVA
Energía eléctrica neta anual producida	78.520,61 MWh
Rendimiento térmico si lo consideramos con el trabajo en la bomba	22,2 %
$\dot{m}_{\text{COMBUSTIBLE}}$ (12%)	2,68 t/h
Caudal de vapor en la turbina	11 kg/s = 39.600 kg/h = 39,6 t/h
Potencia en la entrada de la turbina	11,765 MW
Calor aportado en la caldera	37 MW
Calor extraído en el condensador	25,27 MW
Caudal de agua de refrigeración en el condensador	421,15 kg/s ÷ l/s = 1.516,14 m <sup>3</sup> /h ÷ t/h
Potencia de la bomba	31,57 kW

Tabla 18. Principales características de la planta. Fuente: Elaboración propia

### 2.7.2. CICLO RANKINE RESUMEN DE LA PLANTA

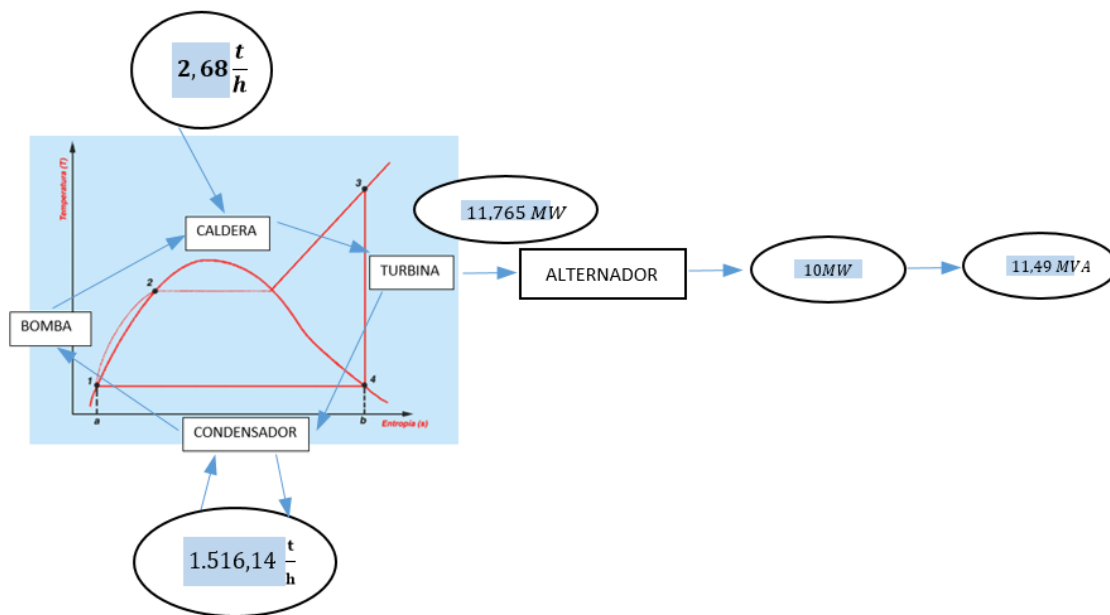


Ilustración 61. Ciclo Rankine resumen de la planta. Fuente: Elaboración propia

### **3. CONCLUSIONES**

El proceso y tecnología seleccionados y explicados en el proyecto son los más convenientes para la generación eléctrica con biomasa.

El aprovechamiento de residuos como el orujo debe de ser un factor primordial para generar energía.

La provincia de Córdoba tiene unas características excelentes para obtener biomasa del olivar, y así poder sustituir la energía proveniente de combustibles fósiles por energía renovable con las ventajas ya mencionadas.

El total de emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> es de 1.413 Toneladas al año.

Al menos se generarán 591 empleos en la zona.

El cálculo realizado y diseñado para este proyecto nos lleva a trabajar con los equipos seleccionados (alternador, turbina, caldera, bomba de alimentación, bomba de condensados y torre de refrigeración) adaptándolos al diagrama empleado.

Se ha tenido en cuenta la viabilidad del proyecto.

La generación de energía eléctrica a partir de biomasa es una energía a tener en cuenta en los próximos años ya que es económicamente, medioambientalmente y socialmente sostenible.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Ruiz Bermejo, J. A. (2013). Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa. Doctorado. Universidad de la Rioja.
- ✓ Máquinas y equipos térmicos (2017). 2ª Edición Autor: Cristina Escudero Salas y Pablo Fernández Iglesias. ISBN: 978-84-283-3869-1
- ✓ Fundamentos de termodinámica técnica. Edición: 2ª ed., Reimp.. Autor: Moran, Michael J. Editorial: Barcelona : Reverté, 2011
- ✓ Termodinámica. Edición: 6ª ed. Autor: Çengel, Yunus A.. Editorial: México ; Madrid: McGraw Hill, 2009
- ✓ Nogués y Guerrero, Jesús (1926). Elementos de máquinas y calderas (2 edición). Bilbao: Casa Dochao.
- ✓ Seoáñez Calvo M. (2013). Tratado de la biomasa: con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética, McGraw-Hill España, España.
- ✓ APPA. Asociación de Productores de Energías Renovables.
- ✓ IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
- ✓ JUNTA DE ANDALUCIA. Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía
- ✓ AAE. La Biomasa en Andalucía. Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía
- ✓ CAP. Potencial energético de los subproductos de la industria olivarera en Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca (CAP). Junta de Andalucía
- ✓ SONDEAN. Área de biomasa. Potencial y aprovechamiento energético de la biomasa del olivar en Andalucía.
- ✓ ENCE. Grupo empresarial ENCE.
- ✓ PER. Plan de Energías Renovables (2011 – 2020).
- ✓ SEE. Secretaría de Estado de Energía
- ✓ IRENA. The International Renewable Energy Agency (IRENA).

- ✓ AVEBIOM. Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM)
- ✓ UNESA. Asociación Española de la Industria Eléctrica
- ✓ BOE. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.
- ✓ MAVEN POWER (2010): "DISEÑO & MODELAJE DE PLANTA DE COGENERACIÓN A PEQUEÑA ESCALA
- ✓ CIEMAT. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
- ✓ Diario Córdoba. Vertido de Orujo al Guadalquivir.
- ✓ Ayuntamiento de Montilla
- ✓ SAACKE.
- ✓ RENOVETEC. ENERGIZA.
- ✓ EUROSERVER
- ✓ Termodinámica Lógica y Motores Térmicos, J. Agüera, Ed Ciencia3
- ✓ ENDESA EDUCA
- ✓ REVISTA ENERGÉTICA XXI de Septiembre de 2011.
- ✓ GOOGLE MAPS
- ✓ <https://www.sedecatastro.gob.es/>
- ✓ [www.mavainsa.com](http://www.mavainsa.com)
- ✓ BIORAISE
- ✓ gvSIG

## EQUIPOS:

✓ CALDERA:

[https://www.viessmann.es/content/dam/vi-brands/ES/PDFs/CALDERA\\_INDUSTRIAL/VIESSMANN\\_Cat%C3%A1logo%20Vitomax200-HW-LS-HS%20y%20Vitoplex%20100-LS.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original./VIESSMANN\\_Cat%C3%A1logo%20Vitomax200-HW-LS-HS%20y%20Vitoplex%20100-LS.pdf](https://www.viessmann.es/content/dam/vi-brands/ES/PDFs/CALDERA_INDUSTRIAL/VIESSMANN_Cat%C3%A1logo%20Vitomax200-HW-LS-HS%20y%20Vitoplex%20100-LS.pdf/_jcr_content/renditions/original./VIESSMANN_Cat%C3%A1logo%20Vitomax200-HW-LS-HS%20y%20Vitoplex%20100-LS.pdf)

✓ TURBINA

[https://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/steam-turbines/Industrial\\_Steam\\_Turbines\\_sp.pdf](https://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/steam-turbines/Industrial_Steam_Turbines_sp.pdf)

✓ BOMBA DE ALIMENTACIÓN:

<http://www.directindustry.es/prod/flowserve-sihi-pumps/product-17731-61275.html>

✓ BOMBA DE CONDENSADOS:

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi3vd-g\\_vHcAhVGzaQKHY\\_WDB8QFjAAegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ksb.com.br%2Fphp%2Fprodutos%2Fdownload.php%3Farquivo%3Dmt\\_spy\\_a2384\\_0p\\_1.pdf%26tipo%3Dtecnicos&usg=AOvVaw2CtTjpR-RziFhWub0nBNKx](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi3vd-g_vHcAhVGzaQKHY_WDB8QFjAAegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ksb.com.br%2Fphp%2Fprodutos%2Fdownload.php%3Farquivo%3Dmt_spy_a2384_0p_1.pdf%26tipo%3Dtecnicos&usg=AOvVaw2CtTjpR-RziFhWub0nBNKx)

✓ TORRE DE REFRIGERACIÓN:

<http://www.customcoolingtowers.com/cing.asp>

✓ CONDENSADOR:

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/6000m2-steam-condensate-condenser-for-steam-turbine-stg-60176541228.html?spm=a2700.8699010.normalList.137.63b332f8IQ6wYp>

## 5. ANEXOS

### 5.1. CÁLCULOS

El objetivo del proyecto es obtener 10 MW de biomasa utilizando orujillo como combustible, por lo que realizaremos diferentes cálculos para conseguir conocer cuánto potencial de biomasa necesitamos y, a su vez, qué características tienen que tener los equipos que vamos a instalar.

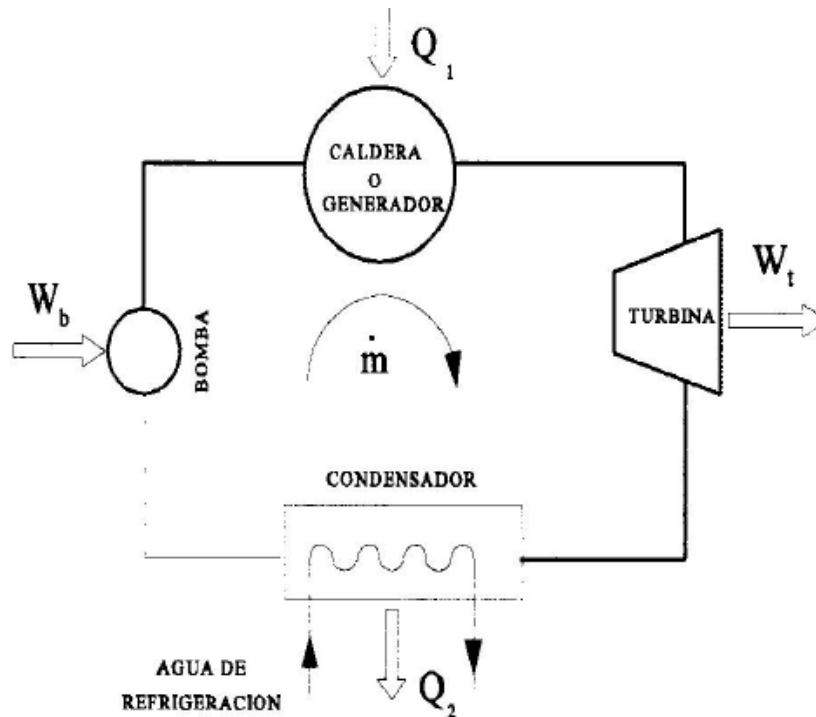


Ilustración 62. Ciclo Rankine.

Para comenzar, procedemos a calcular la potencia aparente ( $S$ ), dividiendo la potencia activa con el coseno  $\phi$ .

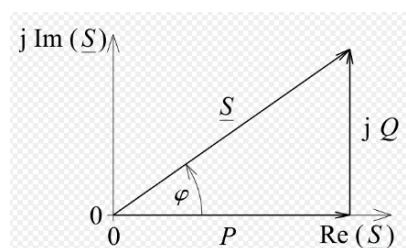


Ilustración 63. Factor de potencia.

$$\text{Potencia aparente } (S) = \frac{10 \text{ MW}}{0.87} = 11,49 \text{ MVA}$$

Ya que deseamos obtener 10 MW al final de nuestro ciclo Rankine (potencia activa o real), tenemos que calcular el potencial de cada equipo de forma inversa a dicho diagrama (por orden: alternador, turbina, caldera y potencial de biomasa necesario).

## ALTERNADOR

$$\text{Potencia mecánica real} = \frac{10 \text{ MW}}{0.85} = 11,765 \text{ MW}$$

$$\text{Potencia mecánica aparente} = \frac{10 \text{ MW}}{0.85 \times 0.87} = 13,52 \text{ MVA}$$

Por lo tanto la principal característica que buscamos en el alternador es una potencia mecánica de 11,765 MW (13,52 MVA); aunque también se tendrá en cuenta otras características técnicas que puedan facilitar su funcionamiento con el de la turbina.

Tras realizar una exhaustiva búsqueda por el mercado, llegamos a la conclusión de que el alternador más conveniente para nuestro proyecto es de la marca AEG (Industrial Engineering GmbH):

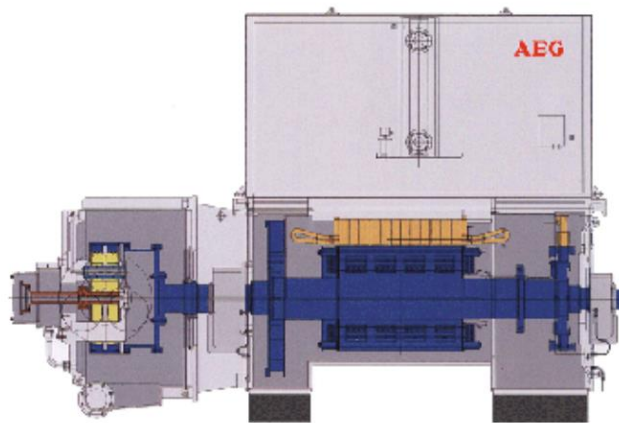


Ilustración 64. Alternador recomendado. Fuente: AEG

*“El alternador viene con un engranaje adosado y se suministra como unidad. Así se puede acoplar un alternador económico y técnicamente bien probado de cuatro polos con 1500 rpm a 50 ciclos con turbinas hasta 15000 rpm.*

*El engranaje acoplado es de tipo epicíclico con pérdidas reducidas y vida extensa. Alternador y engranaje son una unidad bloque listo para el montaje.*

*El sistema se puede suministrar en todos los tipos comunes de protección y refrigeración.”*

AEG



**Velocidad del alternador: 1500 ó 1 800 rpm**

**Alcance de potencia: 4000 – 50 000 kVA**

Tensión del alternador: hasta 15000 V

Velocidad de turbina necesaria a incorporar:  
5000 – 15 000 rpm



Grupos a biomasa

Industria del papel y de madera

Industria química y petroquímica

Grupos industriales

Grupos de calefacción

Ilustración 65. Características del alternador recomendado. Fuente: AEG

Como podemos comprobar, este alternador cumple con las características establecidas por lo que realizamos el cálculo necesario para el siguiente equipo: TURBINA.

**TURBINA:**

$$\text{Potencia mecánica real} = \frac{10 \text{ MW}}{0.85} = 11,765 \text{ MW}$$

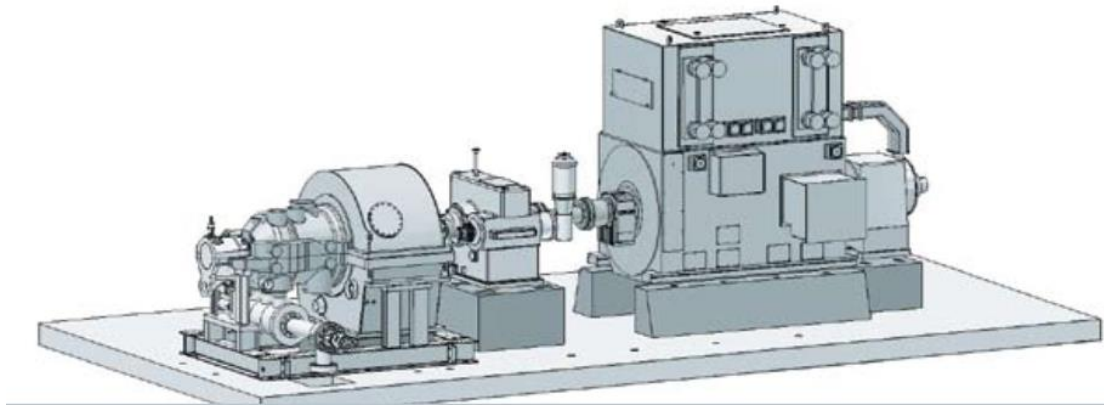


Ilustración 66. Turbina recomendada. Fuente: Siemens



Ilustración 67. Turbina recomendada. Fuente: Siemens

## SST-150

### Hasta 20 MW

La SST-150 es una turbina de carcasa simple, que acciona el generador hasta 1.500 ó 1.800 rpm y tiene un diseño en paquete sobre bastidor (skid). Para generar energía, aporta elevada eficiencia junto con una configuración muy compacta.

### Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 20 MW
- Presión de entrada de hasta 103 bar
- Temperatura de vapor de entrada de hasta 505 °C
- Velocidad de giro de hasta 13.300 rpm
- Toma de hasta 25 bar
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 10 bar o condensación de hasta 0,25 bar
- Área de escape 0,28 – 1,6 m<sup>2</sup>

### Características

- Contrapresión/Condensación
- Diseño de la unidad en paquete
- Módulos de turbina prefabricados, periféricos modulares
- Extracción controlada simple
- Escape radial
- Tuberías de aceite y vapor separadas

Ilustración 68. Características de la turbina recomendada. Fuente: Siemens

- ✓ **CONDICIONES DE ENTRADA (TURBINA):** Ya que la presión máxima y la temperatura máxima a la que puede llegar la turbina son de 103 bares y 505°C respectivamente debemos buscar una caldera que nos de unos valores cercanos a estos pero sin sobrepasarlos.
- ✓ **CONDICIONES DE SALIDA (TURBINA):**
  - $P_{\text{TURBINA CONTRAPRESIÓN}}$  de hasta 10 bar
  - $P_{\text{TURBINA CONDENSACIÓN}}$  de hasta 0,25 bar

### POTENCIAL NECESARIO DE BIOMASA

Para conocer el Poder Calorífico Inferior del orujillo accedemos al Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía (IDAE) y extraemos su valor: **3.780 kcal/kg**

$$PCI_{\text{ORUJILLO}} = 3.780 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} = \mathbf{15.823,08 \text{ kJ/kg}}$$

Una vez que conocemos el poder calorífico inferior del orujillo, calculamos el flujo de biomasa necesario (en kg/s) para poder lograr el potencial establecido anteriormente,

$$P_{\text{tB}} = m_{\text{B}} \times \text{PCI}$$

$$m_{\text{B}} = \frac{11,7650 \text{ MW}}{15.823,08 \text{ kJ/kg}} = \frac{11.765 \text{ KW}}{15.823,08 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0,744 \text{ kg/s}}$$

Además de conocer dicho flujo biomásico en kg/s debemos saber cuánto volumen de orujillo necesitaremos.

De esta forma, necesitamos conocer la totalidad de horas en las que la planta de biomasa estará en funcionamiento al año (ya que debe realizar dos paradas para su mantenimiento, con sus respectivos períodos que aseguren una correcta parada y arranque).

Horas de funcionamiento de la planta de biomasa al año:

$$\frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \times 365 \text{ días} - \left( \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} \times 8 \text{ semanas} \right) = \mathbf{7.416 \text{ horas}}$$

Volumen de orujillo necesario al año en la planta de biomasa:

$$0,744 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{1 \text{ h}} \times 7416 \text{ h} \times \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = \mathbf{19.863,01 \frac{\text{t}}{\text{año}}}$$

Volumen de orujillo necesario por hora en la planta de biomasa:

$$0,744 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = \mathbf{2,68 \frac{\text{t}}{\text{h}}}$$

## CALDERA

La caldera (equipo situado en el ciclo justo antes a la turbina) es un equipo muy importante ya que varía principalmente según el tipo de tecnología aplicada (en este caso combustión) y según el combustible introducido (orujillo, perteneciente a la familia de la biomasa).

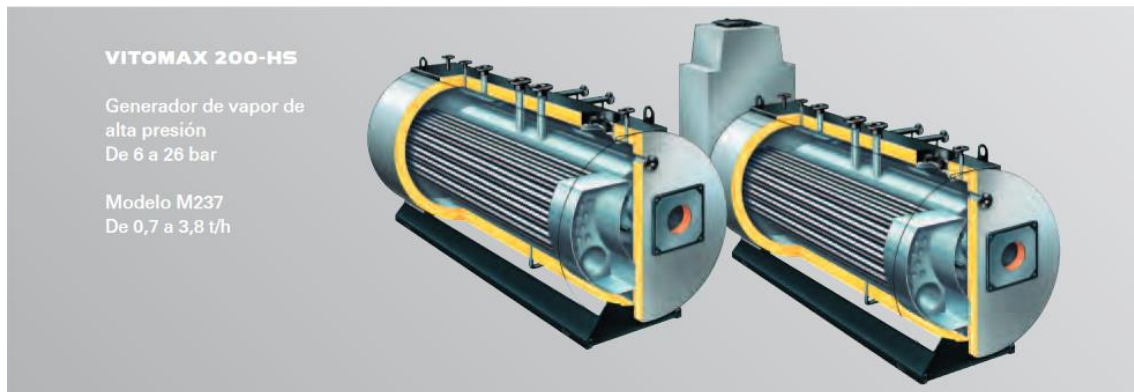


Ilustración 69. Caldera recomendada. Fuente: VIESSMANN

### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

- ✓ Capacidad : 0,7 a 3,8 t/h
- ✓ Presión de 6 a 26 bar

## **CÁLCULO DE NUESTRA PLANTA DE BIOMASA (CICLO RANKINE)**

A continuación, profundizamos nuestro cálculo examinando cada uno de los puntos del ciclo Rankine (para conocer su entalpía, entropía, temperatura y presión) y de esta forma poder saber el rendimiento térmico del ciclo, el calor extraído en el condensador y en la caldera y el caudal de agua necesario para la refrigeración del sistema.

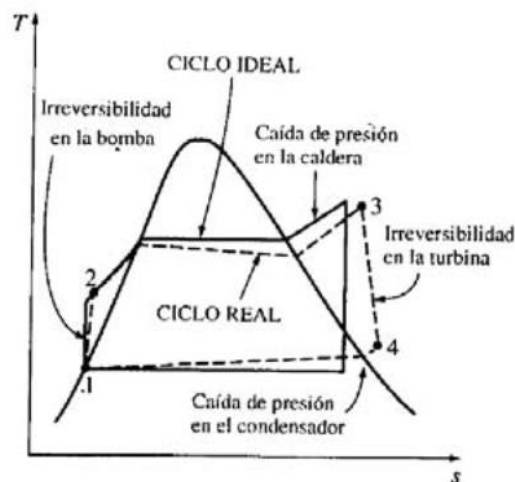


Ilustración 70. Diagrama T - S empleado en la planta de biomasa. Fuente: PUCP

Como se muestra en la ilustración anterior es diferente el ciclo ideal del ciclo real con el que se trabaje, por esto a continuación nos vamos a referir en todo momento al ciclo real Rankine:

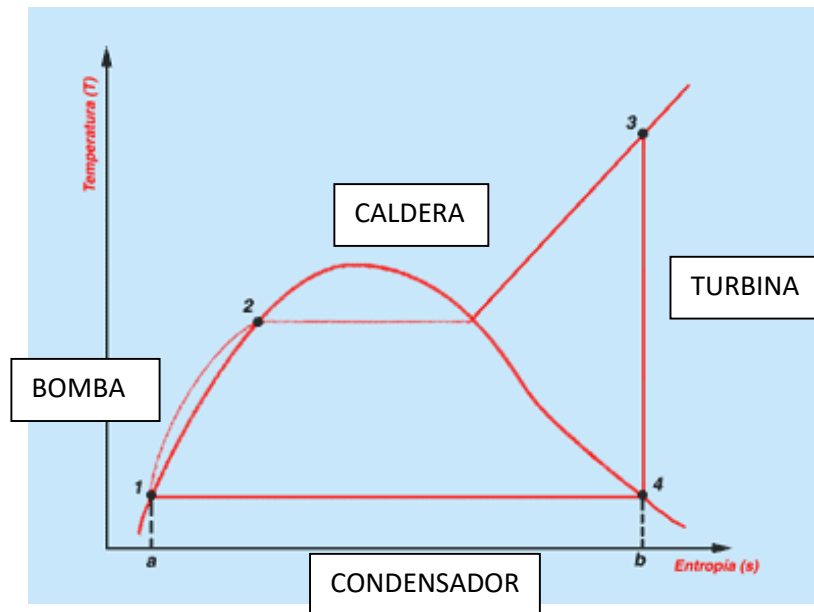


Ilustración 71. Diagrama T - S REAL Rankine. Fuente: Enciclopedia Encarta 2005

Ya que debemos tener en cuenta lo siguiente:

La presión a la salida de la turbina DEBE DE SER IGUAL O SUPERIOR A LA ATMOSFÉRICA. La presión de la caldera elegida trabaja en el rango DE 6 A 26 bar.

Para comenzar a trabajar en el ciclo Rankine utilizamos, además de los valores impuestos por los equipos seleccionados (ya mencionados), los siguientes valores estándar de diseño:

Presión en el condensador = 1,013 bar
Presión de la caldera de 6 a 26 bar (Utilizamos 25 bar)
Temperatura a la salida de la caldera y entrada de la turbina = 500°C
Presión a la salida de la caldera y a la entrada de la turbina = 100 bar

Tabla 19. Valores estándar impuestos en la planta de biomasa. Fuente: Elaboración propia

Por lo que ya sabemos (debido a características de los equipos y a valores estándar) los valores que conocemos son los siguientes:

PUNTO	PRESIÓN (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPÍA (kJ/kg)	ENTROPÍA (kJ/kg K)
1	1,013	---	---	---
2	25	---	---	---
3	100	500	---	---
4	1,013	---	---	---

Tabla 20. Condiciones en cada punto del diagrama Rankine. Fuente: Elaboración propia

Partimos del **PUNTO 3** ya que con la turbina elegida anteriormente (a 500°C y 100 bar) obtenemos una entalpía de **3.374,60 kJ/kg** (utilizando las tablas de vapor de agua recalentado).

P bar	t <sub>s</sub> °C	t = 500 °C				t = 510 °C			
		u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v dm <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v dm <sup>3</sup> /kg
1,0	99,63	3131,57	3488,10	8,8348	3565,3	3148,48	3509,63	8,8616	3611,6
1,01325	99,97	3131,56	3488,09	8,8292	3525,9	3148,47	3509,62	8,8560	3571,6
1,2	104,81	3131,43	3487,90	8,7505	2970,6	3148,34	3509,43	8,7773	3009,2
1,4	109,32	3131,29	3487,70	8,6791	2545,8	3148,19	3509,23	8,7059	2578,9
1,6	113,32	3131,13	3487,50	8,6173	2227,3	3148,05	3509,05	8,6441	2256,2
1,8	116,93	3130,99	3487,30	8,5627	1979,5	3147,91	3508,85	8,5896	2005,2
2,0	120,23	3130,76	3487,00	8,5139	1781,2	3147,69	3508,57	8,5408	1804,4
3,0	133,54	3130,05	3486,00	8,3257	1186,5	3146,99	3507,58	8,3526	1202,0
4,0	143,63	3129,22	3484,90	8,1919	889,19	3146,19	3506,52	8,2188	900,82
5,0	151,85	3128,41	3483,80	8,0879	710,78	3145,38	3505,43	8,1149	720,10
6,0	158,84	3127,60	3482,70	8,0027	591,84	3144,59	3504,37	8,0297	599,63
7,0	164,96	3126,78	3481,60	7,9305	506,89	3143,80	3503,30	7,9575	513,58
8,0	170,41	3125,96	3480,50	7,8678	443,17	3143,01	3502,23	7,8949	449,03
9,0	175,36	3125,15	3479,40	7,8124	393,61	3142,22	3501,17	7,8395	398,83
10,0	179,88	3124,34	3478,30	7,7627	353,96	3141,41	3500,08	7,7899	358,67
12,0	187,96	3122,70	3476,10	7,6765	294,50	3139,82	3497,95	7,7037	298,44
14,0	195,04	3121,07	3473,90	7,6032	252,02	3138,24	3495,82	7,6305	255,41
16,0	201,37	3119,44	3471,70	7,5395	220,16	3136,65	3493,67	7,5669	223,14
18,0	207,11	3117,82	3469,50	7,4830	195,38	3135,07	3491,53	7,5105	198,04
20,0	212,37	3116,20	3467,30	7,4323	175,55	3133,50	3489,40	7,4598	177,95
22,0	216,66	3218,58	3598,04	7,5583	177,14	3218,58	3598,04	7,5583	177,14
24,0	220,96	3217,17	3596,18	7,5192	164,33	3217,17	3596,18	7,5192	164,33
26,0	225,25	3215,77	3594,32	7,4802	151,51	3215,77	3594,32	7,4802	151,51
28,0	229,55	3214,36	3592,46	7,4411	138,70	3214,36	3592,46	7,4411	138,70
30,0	233,84	3107,96	3456,20	7,2345	116,08	3125,46	3478,60	7,2624	117,71
35,0	242,54	3103,79	3450,60	7,1580	99,088	3121,41	3473,17	7,1861	100,50
40,0	250,33	3099,64	3445,00	7,0909	86,341	3117,37	3467,73	7,1192	87,590
45,0	257,41	3095,38	3439,30	7,0311	76,427	3113,23	3462,20	7,0596	77,549
50,0	263,92	3091,23	3433,70	6,9770	68,494	3109,18	3456,75	7,0057	69,514
60,0	275,56	3082,65	3422,20	6,8818	56,592	3100,86	3445,62	6,9110	57,459
70,0	285,80	3074,00	3410,60	6,7993	48,086	3092,47	3434,38	6,8289	48,844
80,0	294,98	3065,17	3398,80	6,7262	41,704	3083,92	3422,97	6,7563	42,381
90,0	303,31	3056,17	3386,80	6,6600	36,737	3075,20	3411,37	6,6906	37,352
100,0	310,96	3047,00	3374,60	6,5994	32,760	3066,34	3399,58	6,6306	33,325
120,0	324,64	3028,17	3349,60	6,4906	26,786	3048,17	3375,50	6,5229	27,277

Tabla 21. Valores del punto 3 a 500°C y 100 bar. Fuente: Libro Termotecnia básica para ingenieros químicos. Antonio de Lucas Martinez

De esta forma, obtenemos también su entropía: **6,5994 kJ/kg K**

DATOS PUNTO 3 (500°C y 100 bar)	<b>h = 3.374,60 kJ/kg.</b>
	<b>s = 6,5994 kJ/kg K</b>



A continuación, en las tablas referentes a las propiedades del vapor de agua recalentado extraemos los siguientes datos:

Con P a 1,013 bar y T <sup>a</sup> 120°C	<b>h -&gt; 2.716,36 kJ/kg</b>
	<b>s -&gt; 7,4612 kJ/kg K</b>

<b>PUNTO</b>	<b>PRESIÓN (bar)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>ENTALPÍA (kJ/kg)</b>	<b>ENTROPÍA (kJ/kg K)</b>
<b>1</b>	1,013	---	---	---
<b>2</b>	25	---	---	---
<b>3</b>	100	500	<b>3.374,60</b>	<b>6,5994</b>
<b>4</b>	1,013	120	<b>2.716,36</b>	<b>7,4612</b>

**PUNTO 1** (a la salida del condensador y entrada a la bomba):

<b>DATOS PUNTO 1</b>	<b>P = 1,013 bar</b>
----------------------	----------------------

Extraemos los valores del punto 1 de las tablas

<b>Con P = 1,013 bar</b>	<b>T<sup>a</sup> = 99,97</b>
	<b>h = 419,1 kJ/kg</b>
	<b>s = 1,3069 kJ/kg K</b>
	<b>v = 1,0437 dm<sup>3</sup>/kg</b>

Por lo que actualizamos nuestra tabla resumen:

<b>PUNTO</b>	<b>PRESIÓN (bar)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>ENTALPÍA (kJ/kg)</b>	<b>ENTROPÍA (kJ/kg K)</b>
<b>1</b>	1,013	99,97	419,1	1,3069
<b>2</b>	25	---	---	---
<b>3</b>	100	500	<b>3.374,60</b>	<b>6,5994</b>
<b>4</b>	1,013	120	<b>2.716,36</b>	<b>7,4612</b>

Finalmente, en el **PUNTO 2** suponemos una temperatura ligeramente superior que en el punto 1:

<b>DATOS PUNTO 2</b>	<b>P = 25 bar</b>
	<b>T2 = 100 °C</b>

Por lo que aplicamos la Primera Ley de la Termodinámica entre los puntos 1 y 2 (aplicado a estos puntos):

$$\Delta H = V \times \Delta P$$

Extraemos el valor del volumen en el punto 2 a 25 bar (de las tablas de agua más vapor):  
**1,1972 dm<sup>3</sup>/kg**

De esta forma, sustituyendo los valores obtenidos en la fórmula nos queda lo siguiente:

$$h_2 - h_1 = v_2 (P_2 - P_1)$$

$$h_2 = 419,1 \text{ kJ/kg} + 1,1972 \text{ dm}^3/\text{kg} \times (25 - 1,013) \times 10^{-1} \text{ kJ/dm}^3 = \mathbf{421,97 \text{ kJ/kg}}$$

Una vez obtenido todo esto, conseguimos también el valor de entropía (6,2575 kJ/kgK),

PUNTO	PRESIÓN (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPÍA (kJ/kg)	ENTROPÍA (kJ/kg K)
<b>1</b>	1,013	99,97	419,1	1,3069
<b>2</b>	25	100	421,97	6,2575
<b>3</b>	100	500	3.374,60	6,5994
<b>4</b>	1,013	120	2.716,36	7,4612

Tabla 22. Tabla resumen de los principales puntos del ciclo Rankine. Fuente: Elaboración propia

Con estos valores, podemos determinar varios parámetros como ya mencionamos anteriormente (rendimiento térmico del ciclo, el calor extraído en el condensador y en la caldera, y el caudal de agua necesario para la refrigeración del sistema).

- ✓ Caudal de vapor en la turbina:

$$\dot{W}_{\text{TURBINA}} = \dot{m} (h_3 - h_4)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{\text{TURBINA}}}{h_3 - h_4} = \frac{11,765 \text{ MW}}{3.785,95 - 2.765,03} = \frac{11.765,0 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{3.785,95 - 2.716,36} = \mathbf{11 \text{ kg/s}}$$

- ✓ Calor extraído en el condensador

$$Q_{4-1} = \dot{m} \times (h_4 - h_1)$$

$$Q_{4-1} = 11 \times (2.716,36 - 419,1) = 25.268,81 \text{ kJ/s} = \mathbf{25,27 \text{ MW}}$$

- ✓ Caudal de agua de refrigeración necesario en el condensador (considerando  $\Delta T = 60^\circ$  aproximadamente)

$$Q_{4-1} = \dot{m} \times C_e \times \Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{Q_{4-1}}{C_e \times \Delta T} = \frac{25.268,81 \text{ kJ/s}}{1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 60 \text{ }^\circ\text{K}} = \mathbf{421,15 \text{ kg/s}}$$

- ✓ Calor aportado en la caldera

$$Q_{2-3} = \dot{m} \times (h_3 - h_2)$$

$$Q_{2-3} = 11 \text{ kg/s} \times (3.785,95 - 421,97) = 37.003,8 \text{ kJ/s} = \mathbf{37 \text{ MW}}$$

- ✓ Potencia reversible de la bomba:

$$\dot{W}_{\text{BOMBA}} = \dot{m} \times (h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{\text{BOMBA}} = 11 \text{ kg/s} (421,97 - 419,1) = \mathbf{31,57 \text{ kW}}$$

- ✓ Potencia eléctrica (Producción eléctrica en los bornes del alternador):  
11,765 MW  
 $P_{\text{SSAA}}: 0,10 \times P_{\text{ALT}}: 1,177 \text{ MW}$   
 $P_{\text{NETA}} = P_{\text{ALT}} - P_{\text{SSAA}} = 11,765 \text{ MW} - 1,177 \text{ MW} = 10,588 \text{ MW}$

- ✓ Y la energía eléctrica neta anual producida:

$$\text{EEN} = P_{\text{NETA}} \times h_{\text{EF}} = 10,588 \text{ MW} \times 7.416 \text{ h} = \mathbf{78.520,61 \text{ MWh}}$$

- ✓ Rendimiento térmico de la instalación (considerando también el trabajo de la bomba):

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{aportado}}} = \frac{W_{3-4} + W_{1-2}}{Q_{3-2}} = \frac{(h_3 - h_4) + (h_1 - h_2)}{(h_3 - h_2)} =$$

$$\frac{(3.374,60 - 2.716,36) + (419,1 - 421,97)}{3.374,60 - 421,97} = \mathbf{22,2 \%}$$

Aunque no es un rendimiento muy elevado debemos tener en cuenta que este rendimiento es similar a otros rendimientos de plantas industriales operativas actuales.

Si se quisiera AUMENTAR DICHO RENDIMIENTO tendríamos que variar principalmente la ENTALPÍA DEL PUNTO 3 (INCREMENTÁNDOLA) O LA DEL PUNTO 4 (DISMINUYÉNDOLA) para que así existiese una mayor diferencia y por tanto mayor rendimiento.

- En el PUNTO 3, esto implicaría la utilización de equipos de una gran potencia (que consigan llegar a temperaturas cercanas a 650 °C y presiones elevadas) por lo que su coste y su rango de utilización serían mayores y sobredimensionaríamos el equipo con respecto a las características del diagrama empleado.
- En el PUNTO 4, esto implicaría reducir la presión por debajo de la presión atmosférica desplazando el punto 4 dentro de la campana de Andrews (ya que actualmente está situado ligeramente por encima de dicha campana), por lo que tendríamos que tener en cuenta el título de dicho punto (característica que nos indica la proporción de agua y vapor).

A continuación procedemos a escoger un CONDENSADOR QUE PUEDA ADAPTARSE A NUESTRO DIAGRAMA y que tenga unas características técnicas similares a las siguientes:

PRESIÓN TURBINA	$P_{TURBINA (ATMOSFÉRICA)} = 1,013 \text{ bar}$
CAUDAL DE VAPOR EN LA TURBINA	$11 \text{ kg/s} \times 3600 \text{ s} = 39.600 \text{ kg/h} = 39,6 \text{ t/h}$
CAUDAL DE AGUA DE REFRIGERACIÓN	$421,15 \text{ kg/s} \div 1 \text{ s} = 1.516,14 \text{ m}^3/\text{h} \div \text{t/h}$

Tabla 23. Requisitos que debe cumplir el condensador requerido. Fuente: Elaboración propia.

Tras unificar todas estas características, nos adentramos en el mercado y obtenemos el siguiente condensador:

**CONDENSADOR (Zhejiang Jiashe Power Engineering Co., Ltd. NC42)**



Ilustración 73. Condensador empleado. Fuente: Zhejiang Jiashe Power Engineering (jiashe.en.alibaba.com)

型号 Model	冷却面积 Cooling Area (m <sup>2</sup> )	型式 Type	外型尺寸 Overall dimensions (mm)	进汽口尺寸 Steam inlet size (mm)	进出水口尺寸 Water inlet and outlet size (mm)	冷却水量 Cooling Water Flow (t/h)
NC14	140	单道双流程 Single- Pass Two- Flow	4160x2850x1550	800	250	450-650
NC16	160		3910x2680x1485	700	250	600-800
NC28	280		5000x3395x1670	1100	300	800-1100
NC42	420		4965x3510x2555	1220	400	1200-1800
NC56	560		5090x3850x2805	1100	400	1600-2400
NC100	1000	双道双流程 Two- Pass Two- Flow	6125x4305x3660	2000x1350	600	2400-3500
NC125	1250		7291x4315x3844	2000x1350	700	2500-3600
NC125-1	1250		7277x4410x2903	3640x1140	600	2500-3600

Ilustración 74. Características del condensador utilizado. Fuente: jiashe.en.alibaba.com

**BOMBA DE CONDENSADOS (KSB SPY 400-440B)**

CAUDAL DE REFRIGERACIÓN DE AGUA	421,15 kg/s = 421,15 l/s = 0,421 m <sup>3</sup> /s = 1.515,6 m <sup>3</sup> /h
PRESIÓN EN EL CONDENSADOR	1,013 bar



**Aplicaciones principales**

- Agua de refrigeración y condensados
- Aguas residuales
- Aguas residuales industriales
- Aguas residuales municipales
- Centrales eléctricas > 100 MW
- Centrales eléctricas < 100 MW
- Drenaje de superficies
- Energía
- Industria química
- Ingeniería de procesos e industrial
- Líquidos portadores de calor, circuitos
- Procesos
- Procesos especiales
- Tanques de agua de lluvia
- Transporte de aguas residuales

Ilustración 75. Características de la bomba de condensado empleada. Fuente: KSB


<b>SPY</b>		<b>Bomba de circulación</b>
	DN            350 - 1200 Q m <sup>3</sup> /h       hasta 21.600 H m            hasta 50 p bar          hasta 10 T °C          hasta +105 n min <sup>-1</sup> hasta 1.500 Datos a 50 Hz Valores superiores bajo petición	<b>Diseño:</b> bomba de carcasa de voluta de una etapa, con acoplamiento, con diseño "back pull-out". <b>Aplicaciones:</b> sistemas de drenaje, riego y abastecimiento de agua, bombeo de condensados, agua de refrigeración, agua para servicios, etc.
	Referencia nº 2384.51	

Ilustración 76. Características de la bomba de condensado empleada. Fuente: KSB

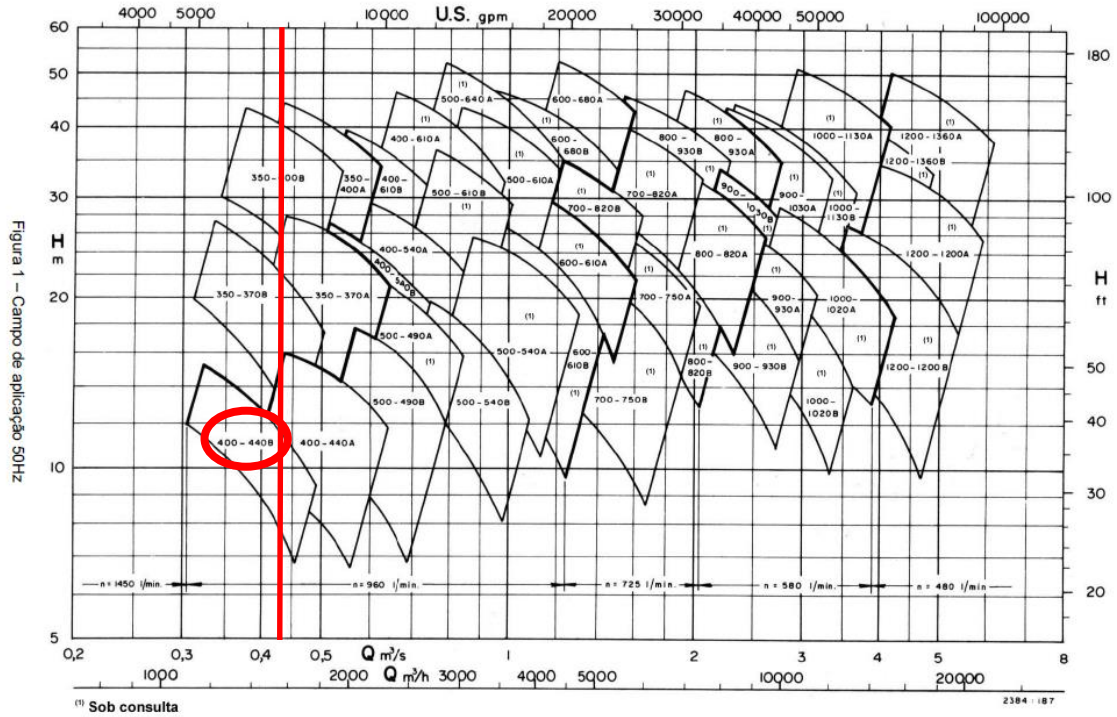


Ilustración 77. Campo de aplicación de las bombas de condensado KSB a 50 HZ

		Tamanhos																													
		350-370 A/B AS		350-400 A/B AS		350-400 AS/BS		400-440 A/B AS		400-540 A/B AS/BS		400-610 A/B AS		500-490 AS/BS		500-540 B AS		500-640 AS/BS		600-610 A AS		600-680 A AS		700-750 AS		800-830 BS AS		900-830 AS			
Dados Construtivos		S		D		S		D		S		S		S		D		S		S		S		S		S		S			
Voluta		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30			
Pressão máxima de teste hidrostático (bar)		6,0		10,0		6,0		10,0		6,0		10,0		9,5		6,0		5,5		8,5		5,5		8,0		5,5		7,5		5,0	
		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze		Bronze	
		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18		A536 60-40-18	
limites NPSHr / NPSHd para serviço		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30		A48CL30	
		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.		< 0,75 Qopt.	
		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.	
		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.		0,75 Qopt.	
		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.		0,75 até 1,4 Qopt.	
Execuções dos rotores		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto		(A) aberto	
		F		F		F		F		F		F		F		F		F		F		F		F		F		F		F	
Tipos de Rotores		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6		Folgas anéis desgaste s (medidas aprox. - mm), ver fig.6	
		A		A		A		A		A		A		A		A		A		A		A		A		A		A		A	
		75		50		85		65		70		95		105		75		115		80		140		105		175		175		175	
		B		B		B		B		B		B		B		B		B		B		B		B		B		B		B	
		50		45		55		60		65		95		70		65		105		75		95		100		120		120		120	
Suporte de mancal		1		1		1		1		1		2		3		3		4		5		6A		6B		6B		6B		6B	
Rolamento		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo	
		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial		mancal radial	
		7315BUA		7315BUA		7315BUA		7315BUA		7315BUA		7319BUA		7320BUA		7320BUA		7324BUA		7330BUA		23032		6330		6330		6330		6330	
		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		29336		7330BUA		7330BUA		7330BUA		7330BUA	
		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-	
		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-	
Graxa (volume em g)		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo		Fixo	
		190		190		190		190		190		360		360		360		570		1144		1010		1660		1660		1660		1660	
Óleo (volume em l)		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel		Móvel	
		4		4		4		4		4		7		7		7		13		13		13		13		13		13		13	
		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-	
Lubrificação		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa		Óleo / Graxa	
		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-	
Medidas da câmara de engastamento D/d1 - (mm)		112/80/125		112/80/130		112/80/125		112/80/130		112/80/130		132/100/130		150/110/150		170/130/150		150/110/150		180/140/150		210/160/185		210/160/185		210/160/185		210/160/185		210/160/185	
Seccão de gaxeta - (mm)		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16		16x16	
Consumo do líquido de selagem de fonte externa - (l/h)		95		95		95		95		95		120		125		140		125		150		175		175		175		175		175	
Diâmetro nominal - dw (mm)		68		68		68		68		68		85		95		115		95		125		145		145		145		145		145	
Consumo do líquido de lavagem e de resfr. de fonte ext. - (l/h)		190		190		190		190		190		240		250		280		250		300		350		350		350		350		350	

Ilustración 78. Características de la Bomba de condensado 400 - 440 B

Dados Construtivos		Tamanhos								
		350-370 A/B	350-370 AS	350-400 A/B	350-400 AS/BS	400-440 A/B	400-440 AS	400-540 A/B	400-540 AS/BS	
Voluta	S (Simples) D (Dupla)	S		D		S		D		
Pressão máxima de teste hidrostático (bar)	A48CL30	6,0		10,0		6,0		10,0		
	Bronze	6,7		11,2		6,7		11,2		
	A536 60-40-18	9,0		15,0		9,0		15,0		
limites NPSHr / NPSHd para serviço	A48CI30 ⊕	< 0,75 Qopt.				0,5				
		0,75 até 1,4 Qopt.								
	Bronze	< 0,75 Qopt.				0,6				
		0,75 até 1,4 Qopt.								
Tipos de Rotores	A743CF8M	< 0,75 Qopt.				0,7				
		0,75 até 1,4 Qopt.								
Tipos de Rotores	Execuções dos rotores (A) aberto (F) fechado	A	F	F	F	A	F	F	F	
	Folgas anéis desgastes (medidas aprox. - mm), ver fig.6	0,75		0,60		0,75		0,72		
	Passagem para corpos sólidos - (mm)	A	75	50	85	65	B	50	45	55
Suporte de mancal	Suporte de mancal	1						3		
	Rolamento	Fixo	mancal radial	7315BUA				7320 BUA		
			mancal axial	-				-		
		Móvel	NJ216						NJ222	
	Graxa (volume em g)	Fixo	190						360	
		Móvel	70						220	
	Óleo (volume em l)	SPY	4						10	
SPY V		-						-		
Lubrificação										
Vedações de eixo	Medidas da câmara de engastamento D/dI - (mm)	112/80/125		112/80/130		112/80/125		112/80/130		
	Secção de gaxeta - (mm)	16x16								
	Consumo do líquido de selagem de fonte externa - (l/h)	95								
	Diâmetro nominal - dw (mm)	68								
	Consumo do líquido de lavagem e de resfr. de fonte ext. ⊕ - (l/h)	190								
P/n (max) kW/rpm	SAE 1045	0,2266		0,3145		0,2266		0,3145		
	AISI 420	0,4532		0,6290		0,4532		0,6290		
	AISI 316	0,1841		0,2555		0,1841		0,2555		
Momentos de inércia das massas J ⊕ (kg m²)	s/água	0,113		0,900		0,825		3,375		
	c/água	0,175		1,250		1,250		4,250		
Pesos kg	Corpo espiral em A48CI30	340		420		490		900		
	Rotor em bronze	29		44		35		93		
	Conjunto girante completo com mancal superior	130		155		160		215		
	Bomba completa	560		650		800		1250		
Volume de água (L)		840		750		1000		950		
Superfícies - m²	Corpo espiral	interno	2,0		2,5		2,7		4,1	
		externo	3,7		3,5		4,8		5,8	
	Tampa do mancal	interno	0,25		0,25		0,30		0,4	
		externo	0,76		0,96		0,91		1,31	
	Suporte do mancal	0,35		0,35		0,35		0,35		
	Tampa do mancal	0,08		0,08		0,08		0,08		
	Tampa do mancal	0,06		0,06		0,06		0,06		
	Pé de apoio	0,25		0,25		0,3		0,4		
	Superfície total	interno	2,25		2,75		3,0		4,5	
externo		5,2		5,2		6,5		8,0		
Flanges		DIN EN 1092-2 Tipo 21 For								

Ilustración 79. Características de la Bomba de condensado 400 - 440 B

## TORRE DE REFRIGERACIÓN (CING MODELS CING-1800-1)

CAUDAL DE REFRIGERACIÓN DE AGUA	421,15 kg/s = 421,15 l/s = 0,421 m <sup>3</sup> /s = 1.515,6 m <sup>3</sup> /h
PRESIÓN EN EL CONDENSADOR	1,013 bar

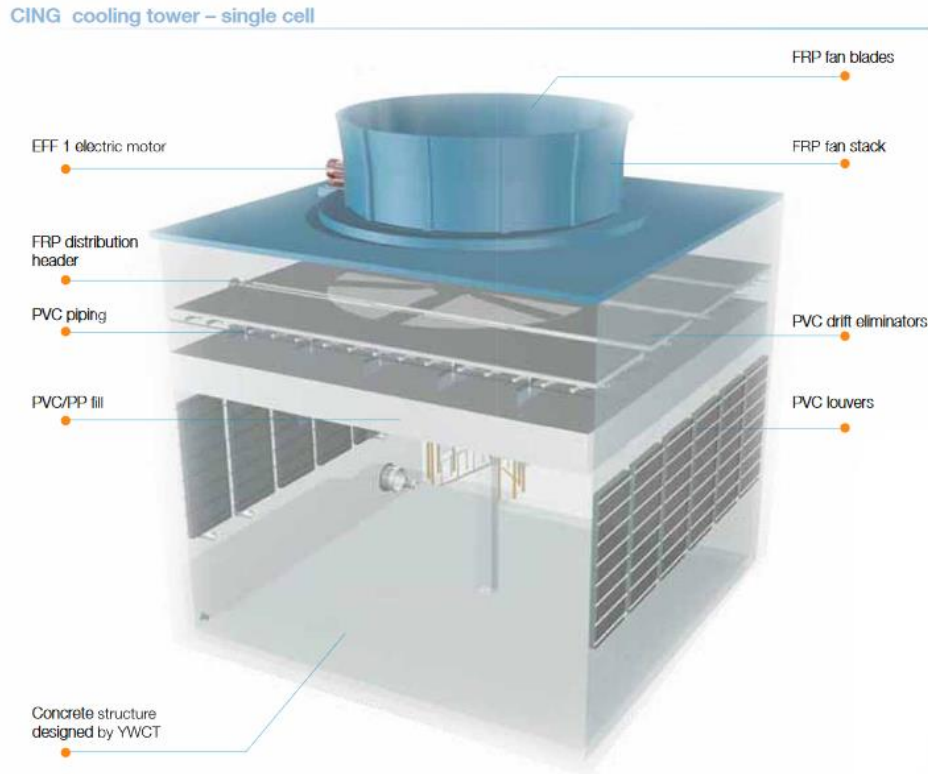


Ilustración 80. Torre de Refrigeración recomendada. Fuente: CING Cooling Towers

Basic CING models							
Model	Single cell dimensions [cm]			Cooling capacity [Kcal/hr]*	Hydraulic water flow capacity per single cell [m <sup>3</sup> /hr]		Motor [HP]
	L	W	H		Maximum	Minimum	
CING-1000-1	600	600	600	3,500,000	1,000	350	50
CING-1800-1	800	800	850	6,500,000	1,800	650	100
CING-2800-1	1,000	1,000	1,100	10,000,000	2,800	1,000	125
CING-4000-1	1,200	1,200	1,300	14,500,000	4,000	1,450	200
CING-5500-1	1,400	1,400	1,550	20,000,000	5,600	2,000	250

\* Cooling capacity refers to standard design conditions: Range = 5.5°C and Approach = 4°C (25°C WB temp)

Ilustración 81. Principales características de la torre de refrigeración.  
Fuente: CING Cooling Towers CING-1800-1

## **BOMBA DE ALIMENTACIÓN (FLOWSERVE MSH 065C-2 )**

Continuando con el ciclo RANKINE tenemos que encontrar una bomba que cierre dicho ciclo llevando el agua obtenida del condensador a la caldera. La bomba que buscamos debe reunir las siguientes características:

PRESIÓN DE ENTRADA A LA CALDERA	25 bares
PRESIÓN A LA SALIDA DEL CONDENSADOR	1,013 bares
POTENCIA REVERSIBLE DE LA BOMBA	31,57 kW
CAUDAL A LA SALIDA DE LA TURBINA (VAPOR)	11 kg/s = 11 l/s = 39,6 m <sup>3</sup> /h = 39.600 kg/h = 39,6 t/h

Ilustración 82. Principales requisitos que debe cumplir la bomba de alimentación que buscamos.  
Fuente: Elaboración propia.

### Modular multistage pumps

**SIHImulti**  
Type MSH



#### Description


SIHImulti pumps are horizontal multistage centrifugal pumps of ring-section design, which meet the technical requirements of ISO 5199 / EN 25199. The type MSH is developed for the high pressure range up to PN 160. The advanced modular design reduces the number of parts whilst maximising interchangeability. Optimal selection of impeller diameter and diffuser size for each ensures that the pump closely match the required duty conditions.



#### Características

- |   |  |  |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Medios:<br/>de agua, de condensados</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Tecnología:<br/>centrifuga</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sector:<br/>para la industria química, para tratamiento de aguas</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Otras características:<br/>multietapa, con cierre mecánico, de alta presión, de irrigación, para procesos químicos, de limpieza, para ósmosis inversa, de acero inoxidable, para montaje horizontal</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Caudal:<br/>Mín.: 0 m<sup>3</sup>/h (0 ft<sup>3</sup>/h)<br/>Máx.: 250 m<sup>3</sup>/h (8.828.6667 ft<sup>3</sup>/h)</li> <li>■ Altura:<br/>Mín.: 0 m (0'00")<br/>Máx.: 1,600 m (5249'04")</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Presión:<br/>Mín.: 0 bar (0 psi)<br/>Máx.: 160 bar (2.320.604 psi)</li> </ul> |

Ilustración 83. Principales características de la bomba de alimentación. Fuente: Flowserve MSH

<b>SIH<sup>multi</sup> 065 C</b> Baureihen / series <b>MSL, MSM, MSH</b>	Nenndrehzahl / nominal speed <b>1450 min<sup>-1</sup></b>	 HALBERG™ Pumps
--	--	---

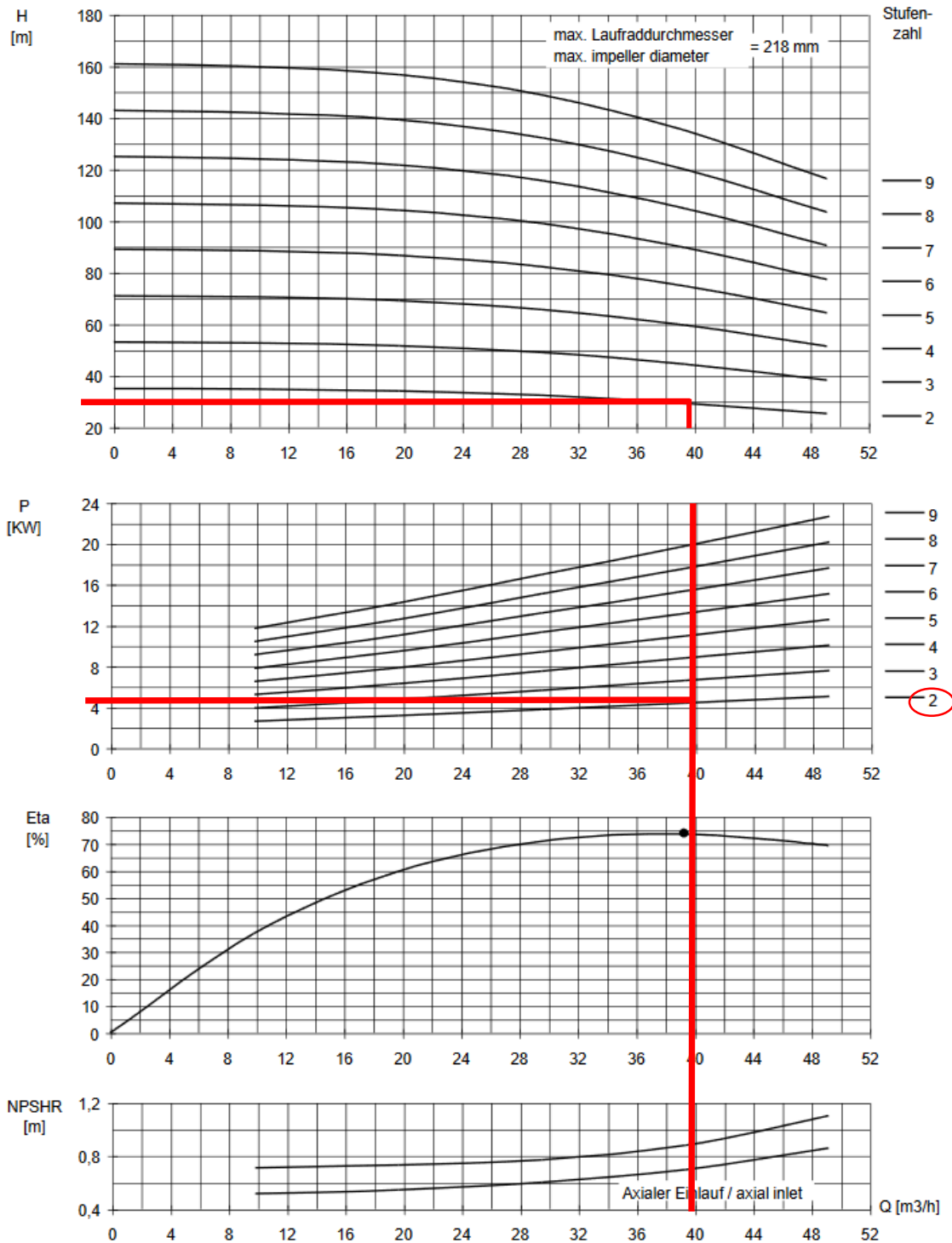


Ilustración 84. Tablas de bomba de alimentación. Fuente: Flowserve

## 5.2. FICHAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS

### 5.2.1. ALTERNADOR

#### Alternadores para la generación de energía con turbinas a gas ó de vapor



El alternador viene con un engranaje adosado y se suministra como unidad. Así se puede acoplar un alternador económico y técnicamente bien probado de cuatro polos con 1500 rpm a 50 ciclos con turbinas

hasta 15000 rpm.

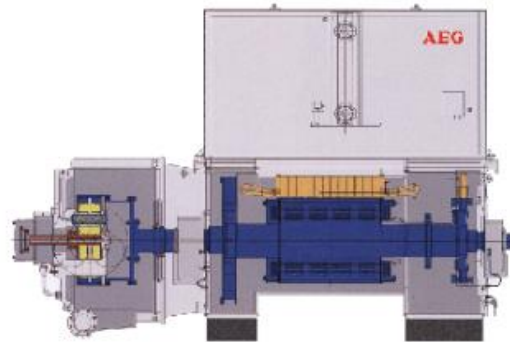
El engranaje acoplado es de tipo epiciclico con pérdidas reducidas y vida extensa. Alternador y engranaje son una unidad bloque listo para el montaje.

El sistema se puede suministrar en todos los tipos comunes de protección y refrigeración.



Campos de aplicación del E-Pack

- > grupos a biomasa
- > Industrias del papel y de madera
- > Industrias químicas y petroquímicas
- > grupos industriales
- > grupos de calefacción

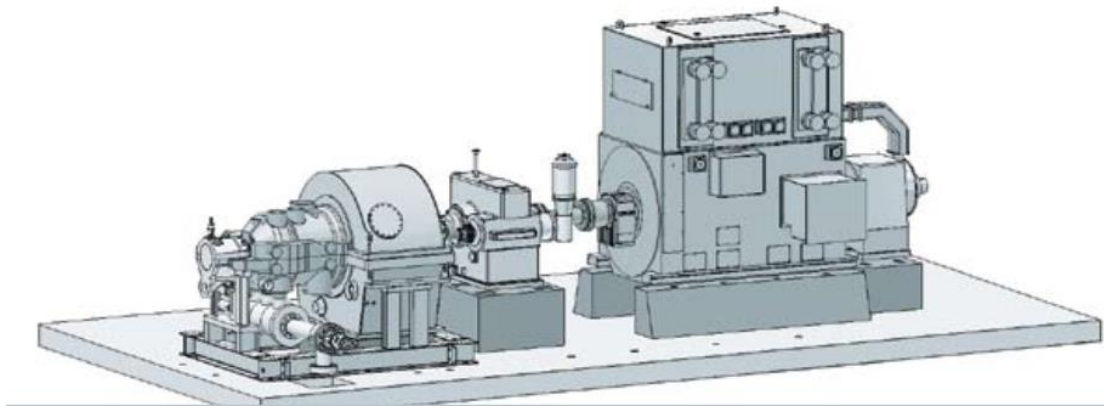


Datos básicos técnicos

- > Velocidad de turbina: 5000 – 15 000 rpm
- > Velocidad del alternador: 1500 ó 1 800 rpm
- > Tensión del alternador: hasta 15000 V
- > Alcance de potencia : 4000 – 50 000 kVA

Ilustración 85. Ficha técnica del alternador utilizado. Fuente: AEG

## 5.2.2. TURBINA



### SST-150

#### Hasta 20 MW

La SST-150 es una turbina de carcasa simple, que acciona el generador hasta 1.500 ó 1.800 rpm y tiene un diseño en paquete sobre bastidor (skid). Para generar energía, aporta elevada eficiencia junto con una configuración muy compacta.

#### Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 20 MW
- Presión de entrada de hasta 103 bar
- Temperatura de vapor de entrada de hasta 505 °C
- Velocidad de giro de hasta 13.300 rpm
- Toma de hasta 25 bar
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 10 bar o condensación de hasta 0,25 bar
- Área de escape 0,28 – 1,6 m<sup>2</sup>

#### Características

- Contrapresión/Condensación
- Diseño de la unidad en paquete
- Módulos de turbina prefabricados, periféricos modulares
- Extracción controlada simple
- Escape radial
- Tuberías de aceite y vapor separadas

Ilustración 86. Ficha técnica utilizada. Fuente: Siemens

### 5.2.3. CALDERA

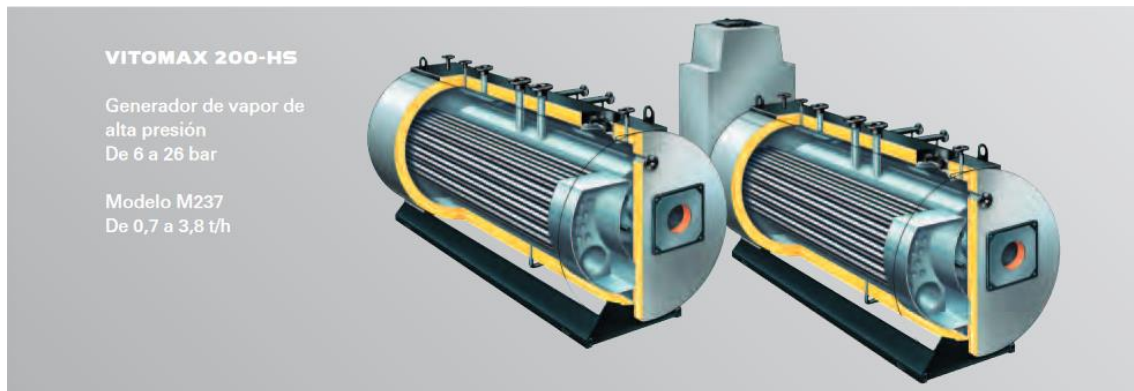


Ilustración 87. Ficha técnica de la caldera empleada. Fuente: VIESSMANN VITOMAX 200-HS M237

- *Vitomax 200-HS, modelo M237*

*Producción de vapor: de 0,7 a 3,8 t/h*

*Presión de servicio hasta 25 bar*

*Gracias a la disposición lateral del cañón del quemador, fue posible desarrollar una caldera muy compacta sin por ello renunciar a las consabidas ventajas constructivas.*

### 5.2.4. CONDENSADOR:



型号 Model	冷却面积 Cooling Area (m <sup>2</sup> )	型式 Type	外型尺寸 Overall dimensions (mm)	进汽口尺寸 Steam inlet size (mm)	进出水口尺寸 Water inlet and outlet size (mm)	冷却水量 Cooling Water Flow (t/h)
NC14	140	单道双流程 Single- Pass Two- Flow	4160x2850x1550	800	250	450-650
NC16	160		3910x2680x1485	700	250	600-800
NC28	280		5000x3395x1670	1100	300	800-1100
NC42	420	双道双流程 Two- Pass Two- Flow	4965x3510x2555	1220	400	1200-1800
NC56	560		5090x3850x2805	1100	400	1600-2400
NC100	1000		6125x4305x3660	2000x1350	600	2400-3500
NC125	1250		7291x4315x3844	2000x1350	700	2500-3600
NC125-1	1250		7277x4410x2903	3640x1140	600	2500-3600
NC160	1600		8305x4721x3312	3640x1140	600	2600-4000
NC200	2000		8305x4721x3312	3640x1140	700	4300-6400
NC220	2200		9020x5195x3710	4040x2000	700	4300-6400
NC350	3500		9330x5740x4235	6000x1650	800	7000-10500

Ilustración 88. Ficha técnica del condensador empleado. Fuente: jiashe.en.alibaba.com

## 5.2.5. BOMBA DE ALIMENTACIÓN:

### Modular multistage pumps

## SIH<sup>multi</sup> Type MSH



### Description

SIH<sup>multi</sup> pumps are horizontal multistage centrifugal pumps of ring-section design, which meet the technical requirements of ISO 5199 / EN 25199. The type MSH is developed for the high pressure range up to PN 160. The advanced modular design reduces the number of parts whilst maximising interchangeability. Optimal selection of impeller diameter and diffuser size for each ensures that the pump closely match the required duty conditions.



### Características

■ Medios: de agua, de condensados	■ Tecnología: centrifuga	■ Sector: para la industria química, para tratamiento de aguas
■ Otras características: multietapa, con cierre mecánico, de alta presión, de irrigación, para procesos químicos, de limpieza, para ósmosis inversa, de acero inoxidable, para montaje horizontal	■ Caudal: Mín.: 0 m <sup>3</sup> /h (0 ft <sup>3</sup> /h) Máx.: 250 m <sup>3</sup> /h (8,828.6667 ft <sup>3</sup> /h)	■ Presión: Mín.: 0 bar (0 psi) Máx.: 160 bar (2,320.604 psi)
	■ Altura: Mín.: 0 m (0'00") Máx.: 1,600 m (5249'04")	

Ilustración 89. Ficha técnica de la bomba de alimentación empleada. Fuente: Flowserve

## 5.2.6. BOMBA DE CONDENSADO:



### Aplicaciones principales

- Agua de refrigeración y condensados
- Aguas residuales
- Aguas residuales industriales
- Aguas residuales municipales
- Centrales eléctricas > 100 MW
- Centrales eléctricas < 100 MW
- Drenaje de superficies
- Energía
- Industria química
- Ingeniería de procesos e industrial
- Líquidos portadores de calor, circuitos
- Procesos
- Procesos especiales
- Tanques de agua de lluvia
- Transporte de aguas residuales

### Características

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medios:<br/>de agua, de condensados</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Accionamiento:<br/>eléctrica</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tecnología:<br/>centrífuga de voluta</li> </ul>                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Otras características:<br/>monoetapa, de irrigación, de refrigeración, de achique</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Caudal:<br/>Mín.: 0 m<sup>3</sup>/h (0 ft<sup>3</sup>/h)<br/>Máx.: 21,600 m<sup>3</sup>/h (762,796.8012 ft<sup>3</sup>/h)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Presión:<br/>Mín.: 0 bar (0 psi)<br/>Máx.: 10 bar (145.038 psi)</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Altura:<br/>Mín.: 5 m (16'04")<br/>Máx.: 50 m (164'00")</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Potencia:<br/>Mín.: 0 kW (0 hp)<br/>Máx.: 1,200 kW (1,631.55 hp)</li> </ul>  |   |

### Descripción

#### Descripción

Bomba de cuerpo de voluta monoetapa, con acoplamiento y diseño "back pull-out".

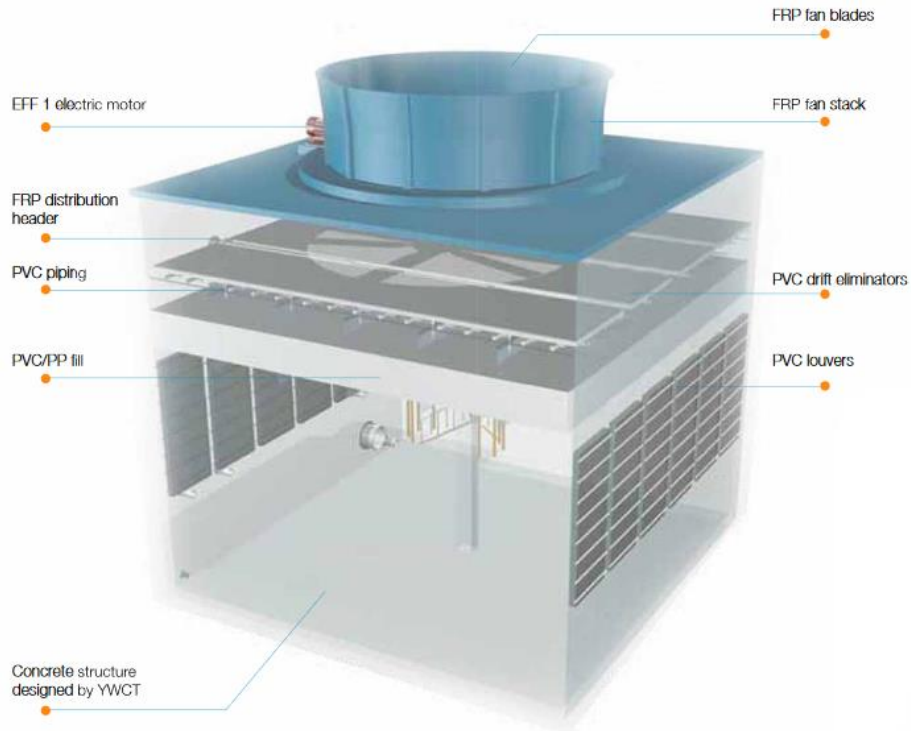
#### Aplicaciones

Sistemas de drenaje, riego y abastecimiento de agua, bombeo de condensados, agua de refrigeración, agua para servicios, etc.

Ilustración 90. Ficha técnica de la bomba de condensado empleada. Fuente: KSB

## 5.2.7. TORRE DE REFRIGERACIÓN:

CING cooling tower – single cell



### Basic CING models

Model	Single cell dimensions [cm]			Cooling capacity [Kcal/hr]*	Hydraulic water flow capacity per single cell [m <sup>3</sup> /hr]		Motor [HP]
	L	W	H		Maximum	Minimum	
CING-1000-1	600	600	600	3,500,000	1,000	350	50
CING-1800-1	800	800	850	6,500,000	1,800	650	100
CING-2800-1	1,000	1,000	1,100	10,000,000	2,800	1,000	125
CING-4000-1	1,200	1,200	1,300	14,500,000	4,000	1,450	200
CING-5500-1	1,400	1,400	1,550	20,000,000	5,600	2,000	250

\* Cooling capacity refers to standard design conditions: Range = 5.5°C and Approach = 4°C (25°C WB temp)

Ilustración 91. Ficha técnica de la torre de refrigeración empedada. Fuente CING cooling towers

### 5.3. GRÁFICAS

TABLA 3 (3 páginas): Propiedades del agua saturada (líquido y vapor).

p <sub>s</sub> bar	t <sub>s</sub> °C	Volumen		Energía interna		Entalpía		Entropía	
		v'	v''	u'	u''	h'	h''	s'	s''
		dm <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg K	
0.00611	0.01	1.0002	206136.0	0.0000	2375.3	0.01	2501.4	0.0000	9.1562
0.01	6.98	1.0001	129210.7	29.30	2386.19	29.3	2515.4	0.1060	8.9767
0.02	17.51	1.0012	67011.6	73.50	2399.58	73.5	2533.6	0.2606	8.7246
0.03	24.10	1.0027	45670.0	100.99	2408.59	101.0	2545.6	0.3543	8.5785
0.04	28.98	1.0040	34800.3	121.45	2415.2	121.46	2554.4	0.4226	8.4746
0.05	32.90	1.0052	28194.5	137.79	2420.63	137.8	2561.6	0.4763	8.3960
0.06	36.16	1.0064	23739.2	151.53	2425.0	151.53	2567.4	0.5210	8.3304
0.07	39.03	1.0074	20530.4	163.39	2428.89	163.4	2572.6	0.5591	8.2767
0.08	41.54	1.0084	18103.8	173.87	2432.2	173.88	2577.0	0.5926	8.2287
0.09	43.79	1.0094	16203.4	183.29	2435.27	183.3	2581.1	0.6224	8.1881
0.10	45.83	1.0102	14674.4	191.82	2437.9	191.83	2584.7	0.6493	8.1502
0.125	50.27	1.0122	11895.5	210.39	2443.91	210.4	2592.6	0.7070	8.0729
0.150	52.96	1.0140	10022.1	226.00	2448.87	226.0	2599.2	0.7549	8.0093
0.175	57.23	1.0157	8671.0	239.50	2453.16	239.5	2604.9	0.7960	7.9557
0.20	60.09	1.0172	7649.2	251.38	2456.7	251.40	2609.7	0.8320	7.9085
0.25	64.99	1.0199	6204.0	271.97	2463.20	272.0	2618.3	0.8933	7.8323
0.30	69.13	1.0223	5229.0	289.20	2468.4	289.23	2625.3	0.9439	7.7686
0.35	72.71	1.0245	4525.5	304.26	2473.11	304.3	2631.5	0.9878	7.7166
0.40	75.89	1.0265	3993.2	317.53	2477.0	317.58	2636.8	1.0259	7.6700
0.45	78.74	1.0284	3576.1	329.55	2480.78	329.6	2641.7	1.0603	7.6306
0.50	81.35	1.0300	3240.1	340.44	2483.9	340.49	2645.9	1.0910	7.5939
0.60	85.94	1.0331	2732.0	359.79	2489.6	359.86	2653.5	1.1453	7.5320
0.70	89.95	1.0360	2365.0	376.63	2494.5	376.7	2660.0	1.1919	7.4797
0.80	93.50	1.0380	2086.9	391.58	2498.8	391.66	2665.8	1.2329	7.4346
0.90	96.71	1.0410	1869.1	405.06	2502.6	405.15	2670.9	1.2695	7.3954
1.00	99.63	1.0432	1693.7	417.36	2506.1	417.46	2675.5	1.3026	7.3594
1.01325	99.97	1.0437	1673.0	418.99	2506.48	419.1	2676.0	1.3069	7.3554
1.10	102.32	1.0455	1549.2	428.68	2509.19	428.8	2679.6	1.3330	7.3277
1.20	104.81	1.0476	1428.1	439.27	2512.03	439.4	2683.4	1.3609	7.2984
1.40	109.32	1.0513	1236.3	458.25	2517.22	458.4	2690.3	1.4109	7.2465
1.60	113.32	1.0547	1091.1	475.23	2521.63	475.4	2696.2	1.4550	7.2017
1.80	116.93	1.0579	977.18	490.51	2525.61	490.7	2701.5	1.4944	7.1622
2.00	120.23	1.0605	885.70	504.49	2529.5	504.7	2706.7	1.5301	7.1271

Tabla 24 Propiedades del agua saturada (líquido y vapor). Fuente: Libro Termotecnia básica para ingenieros químicos. Antonio de Lucas Martínez

**TABLA 3: Continuación.**

p <sub>s</sub> bar	t <sub>s</sub> °C	Volumen		Energía interna		Entalpia		Entropia	
		v'	v''	u'	u''	h'	h''	s'	s''
		dm <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg K	
2.5	127.40	1.0672	718.70	535.10	2537.2	535.37	2716.9	1.6072	7.0527
3.0	133.54	1.0732	605.80	561.15	2543.6	561.47	2725.3	1.6718	6.9919
3.5	138.90	1.0786	524.30	583.95	2546.9	584.33	2732.4	1.7275	6.9405
4.0	143.63	1.0836	462.50	604.31	2553.6	604.74	2738.6	1.7766	6.8959
4.5	147.92	1.0882	413.43	622.25	2557.6	623.25	2743.9	1.8207	6.8565
5.0	151.85	1.0926	374.90	639.68	2561.2	640.23	2748.7	1.8607	6.8212
5.5	155.47	1.0970	342.46	655.20	2563.35	655.8	2751.7	1.8970	6.7870
6.0	158.849	1.1006	315.71	669.90	2567.4	670.56	2756.8	1.9312	6.7600
6.5	161.99	1.1046	292.48	683.38	2568.79	684.1	2758.9	1.9623	6.7304
7.0	164.96	1.1080	272.92	696.44	2572.5	697.22	2763.5	1.9922	6.7080
8.0	170.41	1.1148	240.43	720.22	2576.8	721.11	2769.1	2.0462	6.6628
9.0	175.36	1.1212	215.42	741.83	2580.5	742.83	2773.9	2.0946	6.6226
10.0	179.88	1.1273	194.40	761.68	2583.6	762.81	2778.1	2.1387	6.58638
11.0	184.06	1.1331	177.39	779.85	2584.57	781.1	2779.7	2.1786	6.5498
12.0	187.96	1.1386	163.21	797.03	2586.85	798.4	2782.7	2.2160	6.5194
13.0	191.60	1.1438	151.14	813.21	2588.92	814.7	2785.4	2.2509	6.4913
14.0	195.04	1.1489	140.73	828.49	2590.78	830.1	2787.8	2.2836	6.4651
15.0	198.28	1.1539	131.82	843.16	2594.5	844.84	2792.2	2.3150	6.4448
17.5	205.72	1.1656	113.40	876.16	2595.65	878.2	2794.1	2.3845	6.3853
20.0	212.37	1.1766	99.63	906.44	2600.3	908.79	2799.5	2.4474	6.3409
22.5	218.40	1.1871	88.68	933.63	2599.87	936.3	2799.4	2.5030	6.2932
25.0	223.94	1.1972	79.98	959.11	2603.1	962.11	2803.1	2.5547	6.2575
27.5	229.06	1.2069	72.69	982.58	2602.00	985.9	2801.9	2.6015	6.2174
30.0	233.84	1.2165	66.68	1004.8	2604.1	1008.4	2804.2	2.6457	6.1869
32.5	238.32	1.2255	61.47	1025.62	2602.52	1029.6	2802.3	2.6866	6.1524
35.0	242.54	1.2347	57.07	1045.4	2603.7	1049.8	2803.4	2.7253	6.1253
37.5	246.53	1.2434	53.15	1064.34	2601.98	1069.0	2801.3	2.7618	6.0950
40.0	250.334	1.2521	49.78	1082.3	2602.3	1087.3	2801.4	2.7964	6.0701
45.0	257.415	1.2692	44.06	1116.2	2600.1	1121.9	2798.3	2.8610	6.0199
50.0	263.92	1.2858	39.44	1147.8	2597.1	1154.2	2794.3	2.9202	5.9734
55.0	269.94	1.3023	35.62	1177.74	2593.99	1184.9	2789.9	2.9758	5.9309
60.0	275.56	1.3187	32.44	1205.4	2589.7	1213.4	2784.3	3.0267	5.8892
65.0	280.83	1.3350	29.71	1232.52	2586.39	1241.2	2779.5	3.0760	5.8526

Tabla 25. Propiedades del agua saturada (líquido y vapor).

Fuente: Libro Termodinámica básica para ingenieros químicos. Antonio de Lucas Martínez

**TABLA 3: Continuación.**

p <sub>s</sub> bar	t <sub>s</sub> °C	Volumen		Energía interna		Entalpía		Entropía	
		v'	v''	u'	u''	h'	h''	s'	s''
		dm <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg K	
70,0	285,80	1,3514	27,37	1257,6	2580,5	1267,0	2772,1	3,1211	5,8133
75,0	290,51	1,3678	25,32	1284,44	2577,00	1292,7	2766,9	3,1658	5,7810
80,0	294,98	1,3842	23,52	1305,6	2569,8	1316,6	2758,0	3,2068	5,7432
85,0	299,24	1,4010	21,92	1328,89	2566,08	1340,8	2752,4	3,2480	5,7141
90,0	303,31	1,4179	20,48	1350,5	2557,8	1363,3	2742,1	3,2858	5,6772
95,0	307,22	1,4351	19,21	1372,57	2553,81	1386,2	2736,3	3,3242	5,6506
100,0	310,96	1,4524	18,03	1393,0	2544,4	1407,6	2724,7	3,3596	5,6141
110,0	318,20	1,4887	15,99	1433,7	2529,8	1450,1	2705,6	3,4295	5,5527
120,0	324,64	1,5267	14,26	1473,0	2513,7	1491,3	2684,9	3,4962	5,4924
130,0	330,90	1,5671	12,78	1511,1	2496,1	1531,5	2662,2	3,5606	5,4323
140,0	336,63	1,6107	11,50	1548,6	2476,8	1571,1	2637,6	3,6232	5,3717
150,0	342,12	1,6581	10,34	1585,6	2455,5	1610,5	2610,5	3,6848	5,3098
160,0	347,32	1,7107	9,306	1622,7	2431,7	1650,1	2580,6	3,7461	5,2455
170,0	352,40	1,7702	8,364	1660,2	2405,0	1690,3	2547,2	3,8079	5,1777
180,0	356,96	1,8397	7,489	1698,9	2374,3	1732,0	2509,1	3,8715	5,1044
190,0	361,44	1,9243	6,657	1739,9	2338,1	1776,5	2464,5	3,9388	5,0228
200,0	365,71	2,0364	5,834	1785,6	2293,0	1826,3	2409,7	4,0139	4,9269
210,0	369,79	2,2018	5,022	1840,06	2242,03	1886,3	2347,5	4,1049	4,8222
212,0	370,58	2,2489	4,831	1853,92	2226,48	1901,6	2328,9	4,1279	4,7917
214,0	371,37	2,3059	4,624	1869,65	2208,45	1919,0	2307,4	4,1543	4,7570
216,0	372,14	2,3788	4,393	1888,42	2186,81	1939,8	2281,7	4,1858	4,7157
218,0	372,92	2,4819	4,118	1912,79	2158,63	1966,9	2248,4	4,2271	4,6628
220,0	373,68	2,6675	3,735	1951,62	2114,43	2010,3	2196,6	4,2934	4,5814
220,9	374,10	3,1550	3,155	2029,6	2029,6	2099,3	2099,3	4,4298	4,4298

Tabla 26. Propiedades del agua saturada (líquido y vapor). Fuente: Libro Termodinámica básica para ingenieros químicos. Antonio de Lucas Martínez

**TABLA 4: Continuación.**

p bar	t <sub>s</sub> °C	t = 120 °C				t = 130 °C			
		u	h	s	v	u	h	s	v
		kJ/kg	kJ/kg	kJ/kgK	dm <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kgK	dm <sup>3</sup> /kg
1,0	99,63	2537,23	2716,50	7,4670	1792,7	2552,39	2736,45	7,5166	1840,7
1,01325	99,97	2537,12	2716,36	7,4612	1772,7	2552,29	2736,32	7,5108	1820,1
1,2	104,81	2535,59	2714,40	7,3787	1490,1	2550,90	2734,55	7,4288	1530,5
1,4	109,32	2533,94	2712,30	7,3033	1274,0	2549,41	2732,65	7,3539	1308,9
1,6	113,32	2532,20	2710,10	7,2373	1111,9	2547,88	2730,70	7,2884	1142,7
1,8	116,93	2530,56	2708,00	7,1786	985,78	2546,40	2728,80	7,2302	1013,3
2,0	120,23								
3,0	133,54								

Tabla 27. Propiedades del vapor recalentado. Fuente: Libro Termodinámica básica para ingenieros químicos. Antonio de Lucas Martínez

P bar	t <sub>s</sub> °C	t = 500 °C				t = 510 °C			
		u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v dm <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v dm <sup>3</sup> /kg
1,0	99,63	3131,57	3488,10	8,8348	3565,3	3148,48	3509,63	8,8616	3611,6
1,01325	99,97	3131,56	3488,09	8,8292	3525,9	3148,47	3509,62	8,8560	3571,6
1,2	104,81	3131,43	3487,90	8,7505	2970,6	3148,34	3509,43	8,7773	3009,2
1,4	109,32	3131,29	3487,70	8,6791	2545,8	3148,19	3509,23	8,7059	2578,9
1,6	113,32	3131,13	3487,50	8,6173	2227,3	3148,05	3509,05	8,6441	2256,2
1,8	116,93	3130,99	3487,30	8,5627	1979,5	3147,91	3508,85	8,5896	2005,2
2,0	120,23	3130,76	3487,00	8,5139	1781,2	3147,69	3508,57	8,5408	1804,4
3,0	133,54	3130,05	3486,00	8,3257	1186,5	3146,99	3507,58	8,3526	1202,0
4,0	143,63	3129,22	3484,90	8,1919	889,19	3146,19	3506,52	8,2188	900,82
5,0	151,85	3128,41	3483,80	8,0879	710,78	3145,38	3505,43	8,1149	720,10
6,0	158,84	3127,60	3482,70	8,0027	591,84	3144,59	3504,37	8,0297	599,63
7,0	164,96	3126,78	3481,60	7,9305	506,89	3143,80	3503,30	7,9575	513,58
8,0	170,41	3125,96	3480,50	7,8678	443,17	3143,01	3502,23	7,8949	449,03
9,0	175,36	3125,15	3479,40	7,8124	393,61	3142,22	3501,17	7,8395	398,83
10,0	179,88	3124,34	3478,30	7,7627	353,96	3141,41	3500,08	7,7899	358,67
12,0	187,96	3122,70	3476,10	7,6765	294,50	3139,82	3497,95	7,7037	298,44
14,0	195,04	3121,07	3473,90	7,6032	252,02	3138,24	3495,82	7,6305	255,41
16,0	201,37	3119,44	3471,70	7,5395	220,16	3136,65	3493,67	7,5669	223,14
18,0	207,11	3117,82	3469,50	7,4830	195,38	3135,07	3491,53	7,5105	198,04
20,0	212,37	3116,20	3467,30	7,4323	175,55	3133,50	3489,40	7,4598	177,95
22,0	216,66	3218,58	3598,04	7,5583	177,14	3218,58	3598,04	7,5583	177,14
24,0	220,96	3217,17	3596,18	7,5192	164,33	3217,17	3596,18	7,5192	164,33
26,0	225,25	3215,77	3594,32	7,4802	151,51	3215,77	3594,32	7,4802	151,51
28,0	229,55	3214,36	3592,46	7,4411	138,70	3214,36	3592,46	7,4411	138,70
30,0	233,84	3107,96	3456,20	7,2345	116,08	3125,46	3478,60	7,2624	117,71
35,0	242,54	3103,79	3450,60	7,1580	99,088	3121,41	3473,17	7,1861	100,50
40,0	250,33	3099,64	3445,00	7,0909	86,341	3117,37	3467,73	7,1192	87,590
45,0	257,41	3095,38	3439,30	7,0311	76,427	3113,23	3462,20	7,0596	77,549
50,0	263,92	3091,23	3433,70	6,9770	68,494	3109,18	3456,75	7,0057	69,514
60,0	275,56	3082,65	3422,20	6,8818	56,592	3100,86	3445,62	6,9110	57,459
70,0	285,80	3074,00	3410,60	6,7993	48,086	3092,47	3434,38	6,8289	48,844
80,0	294,98	3065,17	3398,80	6,7262	41,704	3083,92	3422,97	6,7563	42,381
90,0	303,31	3056,17	3386,80	6,6600	36,737	3075,20	3411,37	6,6906	37,352
100,0	310,96	3047,00	3374,60	6,5994	32,760	3066,34	3399,58	6,6306	33,325
120,0	324,64	3028,17	3349,60	6,4906	26,786	3048,17	3375,50	6,5229	27,277
140,0	336,63	3008,67	3323,80	6,3937	22,509	3029,40	3350,68	6,4272	22,949
160,0	347,32	2988,41	3297,10	6,3054	19,293	3009,93	3325,05	6,3402	19,695
180,0	356,96	2967,47	3269,60	6,2232	16,785	2989,83	3298,68	6,2595	17,159
200,0	365,71	2945,68	3241,10	6,1456	14,771	2968,96	3271,42	6,1834	15,123

Tabla 28. Propiedades del vapor recalentado. Fuente: Libro Termodinámica básica para ingenieros químicos. Antonio de Lucas Martínez