



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**

Escuela Politécnica Superior de Linares

**ESTUDIO TEÓRICO Y ANÁLISIS  
EXPERIMENTAL DE UN REACTOR  
DE BIOMASA PARA  
APLICACIONES DE GENERACIÓN  
DISTRIBUIDA**

**Alumno:** Miguel Caballero López

**Tutor:** David Vera Candéas

**Depto.:** Ingeniería eléctrica

**Septiembre, 2020**

## TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN.....	4
2	OBJETIVOS .....	5
3	INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....	6
3.1	Definición de biomasa.....	6
3.2	Biomasa en España.....	7
3.3	Producción agrícola .....	9
3.3.1	Olivar .....	9
3.3.2	Dátil .....	11
3.3.3	Almendra .....	12
3.4	Potencial energético del olivar .....	14
3.4.1	Orujillo .....	14
3.4.2	Poda de olivar.....	15
3.4.3	Hueso de aceituna.....	16
3.4.4	Potencial de los residuos del olivar.....	16
3.5	Historia de la gasificación .....	17
3.6	Planta de gasificación.....	18
3.6.1	Proceso de gasificación.....	18
3.6.2	Tipos de gasificador.....	21
3.7	Producción energética a través de la gasificación.....	26
3.7.1	Ciclo Rankine .....	26
3.7.2	Motor de combustión interna .....	27
3.7.3	Turbina de gas.....	29
3.7.4	Pilas de combustible.....	30
3.7.5	Barreras tecnológicas .....	32
3.8	Ventajas de la gasificación .....	32
3.9	Proyecto OLIVEN .....	33
3.10	Otros proyectos de gasificación en España .....	34
3.10.1	Empresa GUASCOR .....	34

3.10.2	Empresa MOVIALSA .....	36
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
4.1	Base teórica de la caracterización de la biomasa .....	38
4.1.1	Análisis próximo y elemental .....	38
4.1.2	Poder calorífico y granulometría .....	39
4.2	Datos de la caracterización.....	41
4.2.1	Pericarpio de almendra.....	41
4.2.2	Poda de olivar.....	42
4.2.3	Cáscara de almendra .....	42
4.2.4	Pellets de orujillo.....	43
4.2.5	Hueso de dátil.....	43
4.2.6	Hueso de aceituna.....	44
4.2.7	Resumen de características .....	45
4.2.8	Fórmulas en los procesos de la instalación.....	45
4.3	Simulación de la planta de gasificación .....	49
4.3.1	Herramientas de Cycle Tempo .....	50
4.2.1	Modelado del circuito de gasificación.....	51
5	Antecedentes.....	67
5.1	Legislación aplicable a la cogeneración.....	67
5.2	Incentivos de la Junta de Andalucía al autoconsumo.....	69
5.3	Análisis del consumo energético actual de la almazara .....	70
6	RESULTADOS .....	73
6.1	Características del Syngas .....	73
6.2	Rendimientos del proceso de gasificación .....	74
6.2.1	Rendimiento del sistema según temperatura de reacción.....	74
6.2.2	Rendimiento del sistema según temperatura de intercambiador.....	78
6.3	Estudio tecno-económico del gasificador en una almazara.....	82
6.3.1	Introducción y consideraciones de la instalación .....	82
6.3.2	Estudio técnico de la cogeneración .....	83

6.3.3	Balance económico de la instalación .....	87
6.3.4	Cálculo de la amortización.....	90
7	CONCLUSIONES.....	93
8	BIBLIOGRAFÍA.....	95

# 1 RESUMEN

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado tiene el objetivo de realizar un estudio técnico y económico de la implantación de un sistema de gasificación de biomasa para la producción de energía eléctrica y energía térmica para su uso en una almazara y el balance económico que tendría en un año de producción de aceite.

España es uno de los países con más agricultura y espacios naturales de la Unión Europea e incluso del mundo; ello conlleva una gran cantidad de residuos agrícolas y forestales producidos año tras año, que tienen un enorme potencial en el campo de la producción de energía eléctrica, gas (mediante distintos métodos como gasificación y digestión anaerobia) o materiales semisintéticos a partir de la biomasa.

La gasificación consiste en la producción de gas para combustión de composición variable, principalmente CO y H<sub>2</sub>, llamado syngas o gas de síntesis, mediante combustión parcial de la materia, con déficit de oxígeno y a altas temperatura.

En nuestro caso particular estudiaremos 5 tipos de biomasa; poda de olivar, orujillo peletizado, hueso de dátil, cáscara y pericarpio de almendra. Tomaremos los datos característicos de cada una de forma teórico-experimental y estudiaremos el comportamiento, rendimiento y optimización del gasificador y el gas procedente de cada biomasa; para ello utilizaremos el software Cycle-Tempo, un simulador energético creado por la Universidad de Delf, Holanda, para sistemas de producción de electricidad, calor y refrigeración (Universidad Tecnológica de Delft, Holanda, 2010).

Finalmente haremos un balance de resultados de la instalación en la empresa, y valoraremos las posibles mejoras e implementaciones que podamos introducir en el proceso.

## 2 OBJETIVOS

Los objetivos que se tratarán en el presente trabajo de fin de grado son los siguientes:

- Diseño y modelado de la planta de gasificación y sistema de producción de energía eléctrica mediante el software Cycle Tempo y su puesta en marcha.
- Análisis de los resultados para los distintos tipos de biomasa utilizados y estudiados anteriormente.
- Optimización del funcionamiento del gasificador con los distintos parámetros para cada caso de estudio.
- Estudio tecno-económico de la implantación de una planta de gasificación en una almazara.

### 3 INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 Definición de biomasa

En una definición breve, la biomasa es toda materia orgánica susceptible de aprovechamiento energético.

Una parte de las energías renovables es la obtención de energía a partir de material orgánico. Este material se trata de la biomasa, y abarca gran número de tipos de origen y características muy diferentes entre sí. Los residuos de actividades forestales y cultivos agrícolas, residuos de mantenimiento de jardines y parques, residuos de industrias, cultivos destinados a producción energética, combustibles líquidos derivados de productos agrícolas residuos de origen animal o humano, etc., todos estos tipos están dentro de los materiales conocidos como "biomasa".

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la "biomasa" como "todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización". A esta definición encajarían también el carbón, petróleo y gas, aunque a estos no le podamos aplicar el conocido como balance neutro del CO<sub>2</sub> que ocurre con la biomasa producida en la actualidad. El balance neutro se trata del proceso en el que el CO<sub>2</sub> expulsado al procesar la biomasa no aumentaría el conocido efecto invernadero, ya que es carbono que ha sido absorbido por las plantas un corto periodo de tiempo atrás para realizar la fotosíntesis. (IDAE, 2007).

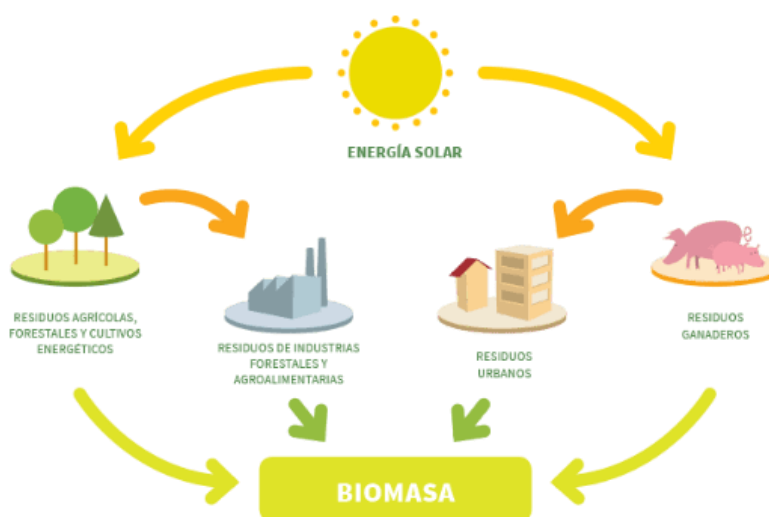


Figura 3.1: Ciclo de la biomasa en la naturaleza y sociedad.

El aprovechamiento de estos residuos puede suponer un avance en la economía muy importante debido a que elementos sin importancia, que tradicionalmente se eliminaban o se desechaban, llegando incluso a pagar para ello, ganan un valor añadido, creando además más empleo para su recogida, tratamiento y transformación en el proceso que corresponda, nos librarían de la dependencia energética que tiene España aun con los combustibles fósiles y las energías no renovables y permitiría darle oportunidad de desarrollo a la generación distribuida. A todo esto, debemos sumarle el beneficio medioambiental, ya que el balance de producción de CO<sub>2</sub> es nulo al haber sido absorbido por las plantas anteriormente de la atmósfera, y puede reducir el riesgo de incendios en los espacios naturales además de sanear bosques y dehesas.

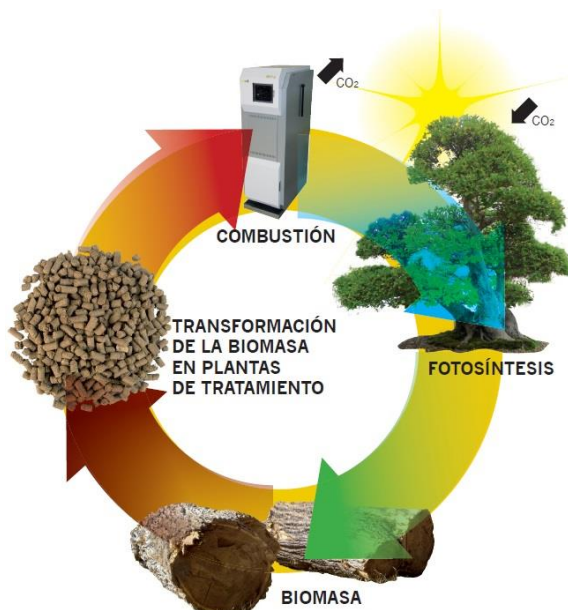


Figura 3.2: Balance del CO<sub>2</sub> en el uso de la biomasa.

### 3.2 Biomasa en España

Podemos clasificar la biomasa generada en España en función de su obtención como consecuencia de la actividad, generalmente del sector primario, entre las que encontramos:

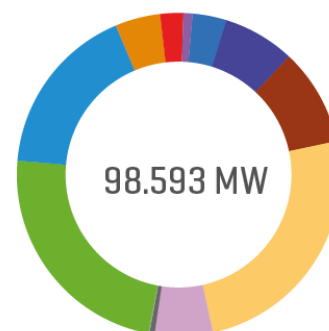
- Las actividades forestales producen restos generados en los trabajos de tratamientos de bosques y espacios naturales y limpieza de las masificaciones de vegetación. Estos restos son ramas, lechos de hojas y tocón de los árboles, además de matorrales y restos de poda.
- Residuos convertidos en subproductos de la industria maderera o forestal, en forma de virutas y serrín, polvo de lijado, cortezas etc.
- Las actividades agrícolas producen restos del cultivo de cereales como la paja y restos de cultivos herbáceos industriales y restos agrícolas leñosos de olivos, viñedos y frutales.

- La industria agrícola produce alperujo, orujillo, hueso de aceituna, cáscaras de semillas, raspones, lías y residuos biodegradables.

(IDAE, 2018).

En el año 2018, España tiene 98.593 MW de potencia instalada, cuyos porcentajes vienen reflejados en la siguiente tabla:

■ Nuclear	7,2%	■ Eólica	23,4%
■ Carbón	9,7%	■ Hidráulica	17,3%
■ Ciclo combinado	24,9%	■ Solar fotovoltaica	4,5%
■ Cogeneración	5,8%	■ Solar térmica	2,3%
■ Residuos no renovables	0,5%	■ Otras renovables	0,9%
■ Turbinación bombeo	3,4%	■ Residuos renovables	0,1%



*Figura 3.3: Porcentajes de producción de energía en España (SEE, 2018)*

En España se producen alrededor de 50 millones de toneladas de biomasa al año con posibilidades de aprovechamiento energético, de las cuales se utilizan solo 11,87 millones de toneladas. Más del 74 % de la biomasa que se consume son astillas/leñas de distinta procedencia; destacamos también por importancia en el mercado y economía el orujillo con un 15 %, y por último los huesos de aceituna. Los pellets no aparecen en la figura ya que son una transformación de la biomasa “primaria” La capacidad de producción de pellets es superior a 1.000.000 t/año y grado de utilización de la capacidad de producción en 2016 de pellets fue del 46%. En este caso el comercio con el exterior es muy poco relevante a comparación de la producción; la exportación de pellets, astillas y leñas destinadas a la biomasa en 2016 fue de 256.000 t mientras que importó 33.000 t en ese mismo año (SEE, 2018).

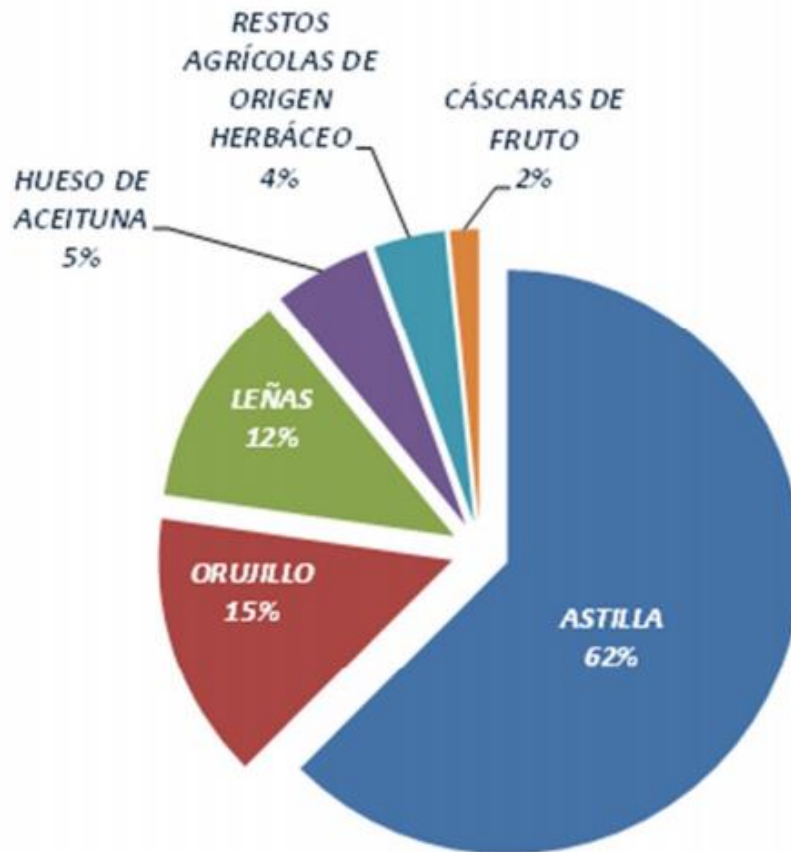


Figura 3.4: Porcentajes de producción de biomasa en España (IDAE, 2018)

### 3.3 Producción agrícola

#### 3.3.1 Olivar

Este cultivo se encuentra en casi todo el territorio español, ocupando una superficie de 2.584.564 hectáreas, donde el 96 % se corresponde con cultivo para el aceite, y el 4 % restante para aceituna de mesa. El regadío tiene una superficie de 555.673 ha, que supone el 22 %, aunque en Andalucía sube hasta el 30 %. El sistema más común es el de tipo localizado, el cual supone el 85 % de la superficie de regadío total.

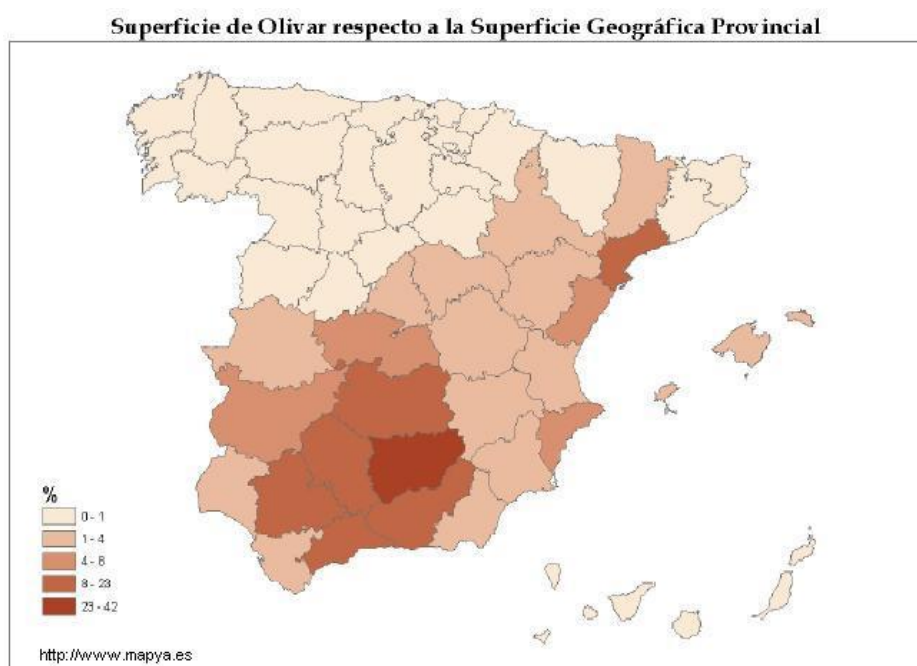


Figura 3.5: Distribución en porcentajes de la producción del olivar 2013

	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019
<b>Octubre</b>	30,5	22,7	9,7	28,0	7,3
<b>Noviembre</b>	157,6	260,5	93,5	206,2	98,4
<b>Diciembre</b>	427,5	606,5	457,1	426,1	630,6
<b>Enero</b>	160,2	364,2	527,3	404,7	689,4
<b>Febrero</b>	37,8	114,4	155,9	155,9	276,6
<b>Marzo</b>	19,5	26,0	37,4	18,6	71,2
<b>Abril</b>	3,2	3,6	4,5	15,0	10,3
<b>Mayo</b>	5,9	5,4	5,2	7,7	6,1
<b>TOTAL</b>	842,2	1.403,3	1.290,6	1.262,2	1.789,9

Tabla 3.1: Producción mensual y anual de aceituna en miles de toneladas.

El número total de olivos en España es de 282.696.000. La distribución geográfica de extensión de cultivo y de número de olivos por comunidades autónomas se muestra en la siguiente tabla:

CCAA	Nº Olivos	Hectáreas	%
Andalucía	174.788.000	1.515.320	60,38
Extremadura	29.602.000	255.310	10,17
Castila la Mancha	36.263.000	397.173	15,83
Cataluña	14.307.000	116.112	4,63
C. Valenciana	10.963.000	91.701	3,65
Aragón	5.884.000	57.346	2,28
Resto	10.884.000	76.715	3,06
<b>Total</b>	<b>282.691.000</b>	<b>2.509.677</b>	<b>100</b>

Tabla 3.2: Datos de la plantación de olivar en España 2019. Ministerio de agricultura.

### 3.3.2 Dátil

Estos cultivos, debido a la zona donde se llevan a cabo de predominantes desiertos, se pueden cultivar únicamente en zonas de oasis, con un mínimo de afluencia de agua, como algunas partes del sur de Túnez. Por lo tanto, se estimó que las 40.976 ha registradas en 2013, se encuentran principalmente en los oasis de las zonas alrededor de Kébili (58% de las superficies), Tozeur (20%), Gabès (16%) y Gafsa (5%), mientras que aproximadamente del 60 al 65% del área de cultivo actual comprende nuevas plantaciones desarrolladas entre 2007 y 2011.



Figura 3.6: Hueso de dátil limpio.

Según el 11º Plan Nacional de Desarrollo Agrícola (2007-2011), la creación de un área irrigada de 20 000 ha, así como los incentivos de inversión del sector privado, llevaron

a un gran aumento en la plantación de palmeras para el sector exportador desde 2007, lo que ayudó El área de cultivo se expande considerablemente. A raíz de un aumento continuo desde la década de 1980, la producción se ha disparado desde 2007, con una cosecha que superó las 220.000 toneladas en 2015, según fuentes profesionales.

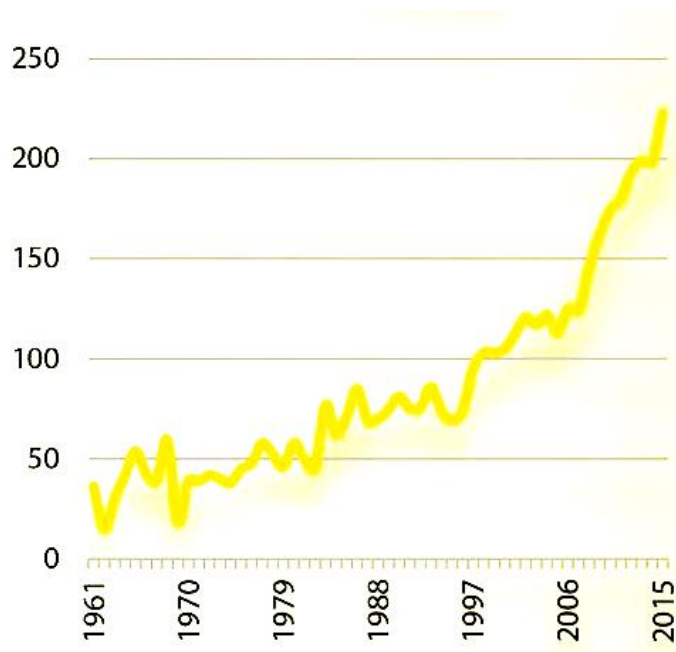


Figura 3.7: Evolución en la producción de dátil en Túnez.

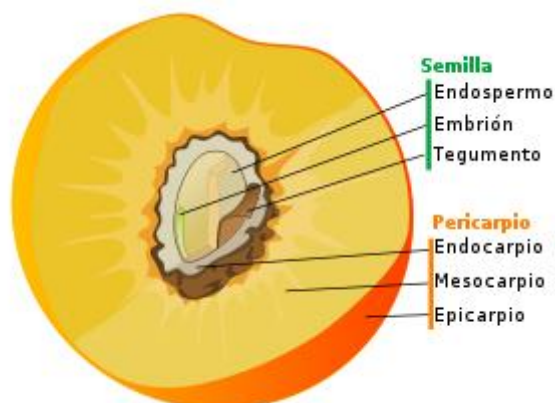
Sin embargo, el crecimiento de la producción debería ser menos fuerte en los próximos años, debido a las crecientes limitaciones de la disponibilidad de recursos (agua y tierra) y los costos de consumo. Además de estos, se agregan ciertos problemas estructurales, como la caída de la inversión pública en el sector agrícola y la inestabilidad política nacional y regional. Fue en este contexto de asegurar el valor de producción que se crearon dos IGP en 2012 para las fechas de Deglet Nour en Kébili y Tozeur. Del mismo modo, la producción de dátiles orgánicos está en aumento, con cantidades de exportación de alrededor de 5 000 toneladas por año, superiores a las de las variedades comunes (Tunisian dates, 2016).

### 3.3.3 Almendra

El fruto del almendro se compone de varias zonas diferenciadas: el pericarpio, que es la parte externa que protege la semilla propiamente dicha, y se divide en exocarpio (exterior), mesocarpio y endocarpio (cáscara).

La semilla madura está formada por el embrión (la almendra) y el tegumento (la piel). El hueso del fruto, puede tener una dureza variables dependiendo fundamentalmente del tipo de almendra y de la antigüedad que tenga el fruto desde su germinación, tiene forma

de gota, acabando un extremo en pico, con dos bordes diferenciados. Tiene una superficie irregular con huecos y estrías. En el se encuentra la semilla, la cual tiene una piel de color más oscuro al llegar a la madurez (Soler Díaz, 2013).



*Figura 3.8: Esquema de estructura interna del fruto de la almendra.*

Para la producción de 1 tonelada de almendras, se necesitan 4 toneladas del fruto recogido del árbol, por lo que un 75% del total en peso son residuos, entre ellos el pericarpio y la cáscara.

España es uno de los principales productores de almendra del mundo, ya que lleva una tendencia de crecimiento muy elevada (63% más de 2012 a 2018) y al mismo tiempo uno de los primeros importadores. La producción española se concentra en las áreas del Mediterráneo siendo Andalucía la Comunidad líder en producción. Las principales variedades de almendra cultivadas en España son Marcona, Largueta y Comuna.

Los datos de producción de almendra con cáscara en España y Andalucía para el año 2018 son los siguientes (Ministerio de Agricultura, 2018):

	Andalucía	España
<b>Superficie Total (Ha)</b>	198.983	657.768
<b>Superficie producción (Ha)</b>	170.908	555.561
<b>Producción total (ton.)</b>	107.819	339.033

*Tabla 3.3: Datos de producción de almendra en 2018.*

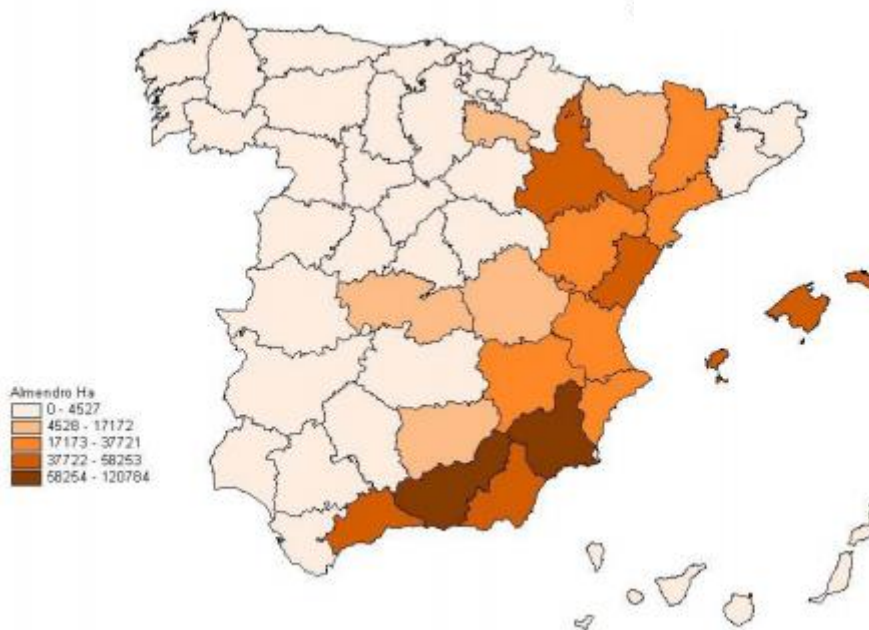


Figura 3.9: Distribución del cultivo del almendro en España 2018.

### 3.4 Potencial energético del olivar

#### 3.4.1 Orujillo

El rendimiento general de la producción de aceite de oliva está en torno a 0,27 toneladas de aceite por cada tonelada de aceituna recolectada, y 0,73 toneladas de orujo (residuo). Una campaña estándar produce unas 3.000.000 toneladas al año de orujo con un contenido en agua del 60-65 % en peso. Este orujo se guarda en balsas cercanas a la industria para más tarde ser procesado física y químicamente para obtener el aceite de orujo.

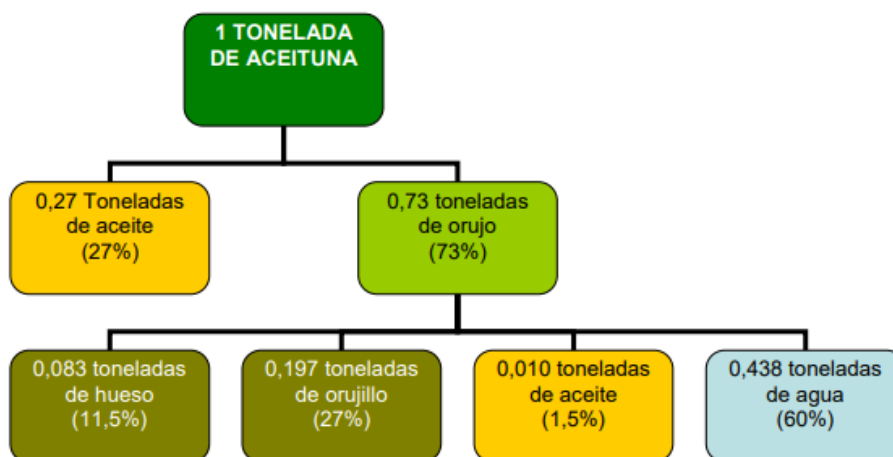


Figura 3.10: Esquema de subproductos de la aceituna

El residuo que queda al procesar el orujo es el orujillo, un producto con una humedad que ronda el 10 % y con un gran poder calorífico



*Figura 3.11: Imagen de orujillo peletizado.*

Actualmente, el secado se lleva a cabo mediante plantas de cogeneración instaladas en la misma empresa, generalmente con gas natural, lo que supone un gran ahorro/beneficio para las empresas extractoras al suponer una fuente de ingresos la venta de energía a la red. En Andalucía, una campaña genera alrededor de 1.200.000 toneladas al año, siendo utilizado en 2015 unas 542.000 toneladas para usos eléctricos (Fuente: Revista Almaceite, 2017).

#### **3.4.2 Poda de olivar**

Los restos del proceso de saneado y poda han sido siempre eliminados mediante quemas en el mismo emplazamiento del cultivo, lo que supone además de un problema medioambiental, un desperdicio energético al no aprovechar el calor despedido ni los nutrientes absorbidos del terreno por el árbol. Para el olivar se consideran unos índices de residuo de 1.400 y 1.700 kg/ha, en olivares con rendimientos productivos de 3.000 kg/ ha, respectivamente.

La poda, con lo que conlleva, supone un valor en torno a 20.000 kJ/kg, hablando de valores con secado previo de la biomasa. La humedad en el momento de la corta es muy elevada, por lo que se toman valores del poder calorífico inferior (PCI) teniendo en cuenta que la biomasa se seca simplemente de manera natural, reduciendo la humedad total al 25% y obteniendo valores sobre las 13.000 kcal/kg. El valor del poder calorífico inferior (PCI) calculado para las hojas es 18.800 kJ/kg, mientras que para los ramones y

las leñas 18.000 kJ/kg (valores medios, ya que depende de muchos otros factores como tipo, zona o edad) (AEE, 2007).



Figura 3.12: Imagen del proceso de poda del olivar. IFAPA, Olivicultura

### 3.4.3 Hueso de aceituna

La composición de la aceituna es un 85% pulpa y 15% hueso. Así mismo, el hueso se divide según su procedencia, en el generado por la fabricación de aceituna de mesa y el producido por la industria del aceite. En la de producción de aceite, el 70% del orujillo de deshuesa, y se separa de la pulpa, lo que produce unas 360.000 toneladas al año.

El resultado es un combustible de buen poder calorífico, adecuado para usos térmicos por su fácil transporte y almacenado.

### 3.4.4 Potencial de los residuos del olivar

A continuación, se muestra la relación de datos estudiados para la campaña 2018/2019:

	<b>Andalucía</b>	<b>España</b>
Superficie (Ha)	1.515.320	2.509.677
Producción (ton)	1.339.712	1.789.900
<b>Orujillo (ton)</b>	263.923	352.610
<b>Poda (ton)</b>	2.272.980	3.764.515
<b>Hueso de aceituna (ton)</b>	111.196	148.562

Tabla 3.4: Datos de los residuos del olivar

### 3.5 Historia de la gasificación

La gasificación comienza en el siglo XVIII, cuando un ingeniero del Reino Unido llamado Murdoch, pirolizó carbón mineral en un recipiente de hierro, produciendo gas que posteriormente usaría para la iluminación de su hogar. Tras esto, fue contratado por James Watt para que realizara una planta de obtención de gas para usarlo en el sistema de alumbrado de una de sus plantas de fundición.

La primera industria creada específicamente para la pirólisis del carbón fue creada en 1812 en Londres bajo el nombre de "London Gas, Light and Coke Company", y fue usada para iluminar el puente de Westminster.

En el año 1816 en la ciudad de Baltimor (EEUU) se construye una planta de obtención de gas de síntesis para uso lumínico de la ciudad. Una década después, ciudades como Sosten y Nueva York copiaron el sistema (J. Espinoza, 2011).

A finales de la década de 1920, había en EEUU un gran número de plantas de gasificación en EEUU, pero tenían un uso limitado debido a la necesidad de estar muy cerca de las poblaciones por sus limitaciones de almacenamiento y transporte debido a la tecnología de la época y el bajo poder calorífico del gas.

Poco más adelante aumento el interés en estas plantas y este proceso, ya que se pudieron obtener gas de síntesis con cantidades iguales de hidrogeno y monóxido de carbono las cuales podían sintetizar en amoniaco y etanol. (J. Espinoza, 2011).

Al descubrir y empezar a explotar reservas de gas natural en la segunda guerra mundial, el interés bajó drásticamente, básicamente también por su más alto poder calorífico (unos 37 MJ/m<sup>3</sup>).

En Sudáfrica, en 1950, se desarrolló un gasificador tipo Fischer Tropsch el cual llegó a ser el mayor del mundo. En esta década, Shell y Texaco desarrollaron procesos propios de gasificación petrolífera (J. Espinoza, 2011).

En la década de 1970 con la crisis del petróleo, y la aparición de opiniones que afirmaban que las reservas de gas natural se encontraban escasas debido al gran aumento de demanda y población mundial, suponiendo un problema hacia la década de 1990, se volvió a mostrar interés en la tecnología de la gasificación.

En las últimas décadas se ha mostrado un fuerte renacer en esta tecnología, provocado por distintas razones, pero fundamentalmente por dos; el drástico aumento del coste de la energía obtenida por formas tradicionales, y la aparición en escena de la biomasa. El petróleo ha crecido desde 1994 a 2004 un 100% su valor, sufriendo un pico máximo en 2008 justo al comienzo de la crisis. En la década de 2010 estos precios han ido recuperándose por la mejora de la economía en los países desarrollados.

### 3.6 Planta de gasificación

#### 3.6.1 Proceso de gasificación

La gasificación, como ya se ha visto, es un proceso que transforma materia prima en un gas de poder calorífico variable, y se obtienen subproductos como cenizas y corrientes semilíquidas de bajo valor energético, pero con carbono en su composición, considerados pérdidas del proceso.

Estas pérdidas pueden suponer dependiendo de la biomasa y las características técnicas del reactor entre un 2 y un 30% de la energía entrante. Otras pérdidas a tener en cuenta son las calorías perdidas en el gasificador (que suponen de un 4 a un 10%) y el conjunto de pérdidas que ocurren en el instante de la utilización del gas como combustible. Las segundas son producidas por la energía necesaria para evaporar el agua presente en el gas.

Sumando todas estas pérdidas, el rendimiento del proceso completo se encuentra en un rango entre 50 y 90% de la potencia química entrante en la biomasa (B. Rugeles, 2007).

Hay principalmente 4 etapas o subprocesos en la gasificación: secado, pirólisis, combustión y reducción, que se muestran en el esquema, con las respectivas reacciones químicas que tienen lugar en cada una de ellas:

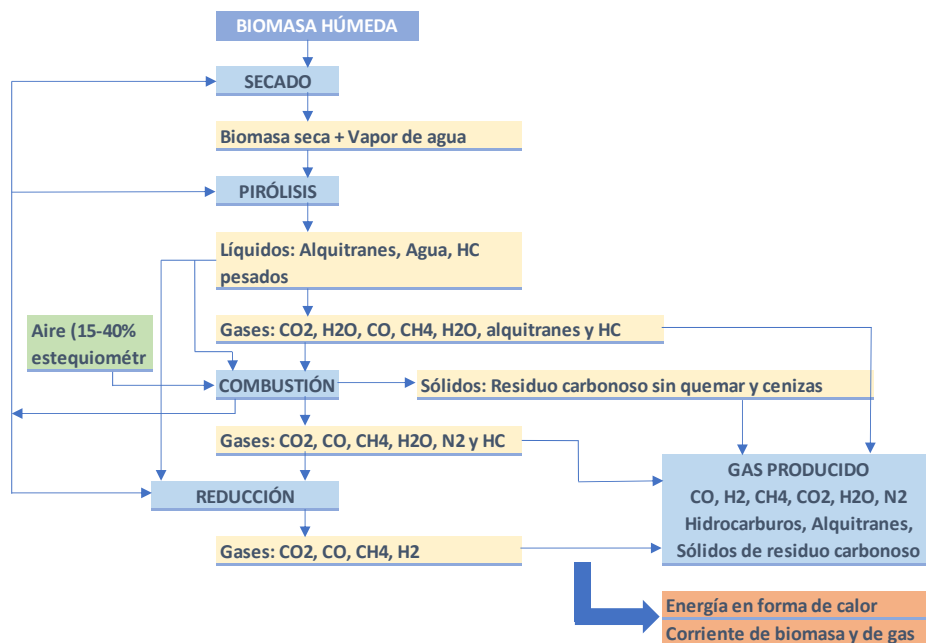


Figura 3.13: Esquema del proceso de gasificación.

### *Secado*

La biomasa entrante al sistema es calentada por el calor residual proveniente de las reacciones de combustión, por lo que se evapora parte de la humedad contenida en la biomasa.

Para que el syngas producido tenga un *PCI* considerado óptimo para combustión, los sistemas de gasificación suelen utilizar materia prima con una humedad entre el 7 y el 20% en peso. La presencia de dicha humedad requiere de energía para evaporar el agua en la medida de lo posible, y esta energía no es recuperable como en el caso de la térmica.

No es posible reducir por completo la humedad interna de la biomasa ya que se encuentra ligada a la estructura química de la materia, por eso, lo explicado anteriormente se aplica a la humedad externa o superficial. Se produce a partir de los 100 °C que es la temperatura de vaporización del agua a presión atmosférica, pero también ocurren procesos de volatilización de compuestos de baja masa molecular, orgánicos, hasta la temperatura aproximada de 200 °C (L. Carrasco, 2015).

### *Pirolisis*

Es estructuralmente hablando la primera etapa de degradación del combustible, descomponiendo térmicamente con presencia de oxígeno por debajo del estequiométrico y con una temperatura en un rango de 300-500 °C. Se empiezan a evaporar los compuestos más ligeros, que, al no poder quemarse al no existir oxígeno, se convierten en alquitranes (tar) y otros residuos. Se produce un "residuo carbonoso" sólido llamado char o carbón vegetal, de alto peso molecular. Los compuestos más importantes formados son: Vapor de agua, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO e hidrocarburos (como el benceno) (L. Carrasco, 2015).

### *Oxidación o combustión*

Llegada aquí la materia, una parte del residuo carbonoso, el char, reacciona con el agente gasificante (aire en nuestro caso) para producir CO<sub>2</sub> y conseguir una temperatura entre 600 y 1400 °C, aunque en la mayoría de los casos el funcionamiento oscila entre 800 y 1000 °C. Ya que el aire estequiométrico introducido es inferior al necesario, ocurre una combustión incompleta y se forma CO, pero una parte de este sí que forma CO<sub>2</sub>. Estas dos reacciones completa e incompleta son exotérmicas, forman porcentajes variables de CO y CO<sub>2</sub>, y el poco O<sub>2</sub> que queda reacciona con el CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> formando CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (L. Carrasco, 2015).

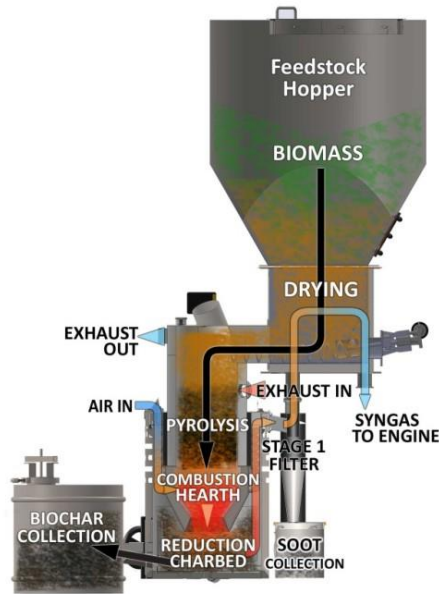


Figura 3.14: Sistema de gasificación y procesos (All Power Labs).

Las principales reacciones que ocurren durante el proceso de gasificación son las siguientes:

- Las reacciones heterogéneas gas-agua:



- La reacción homogénea gas-gas:



- La reacción de formación de metano:



- La reacción de oxidación:



La reacción de oxidación/combustión (E) aporta el calor necesario para que ocurran las reacciones endotérmicas, convirtiendo al proceso entero en un proceso autosostenible una vez alcanzado el equilibrio. La metanación (D) tiene lugar cuando hay un nivel elevado de agua en forma de vapor, y a altas presiones. La relevancia de esta reacción se debe a dos motivos fundamentales: la energía del gas producto crece con su aumento ya que el metano tiene un elevado *PCI* y el agente oxidante necesario se reduce al ser una reacción exotérmica.

Las reacciones (A) y (B) son endotérmicas y se consideran las más importantes en el proceso de gasificación, y obtienen su energía de la liberada por el proceso de oxidación. La reacción de metanación ocurre, principalmente, cuando se tienen altas concentraciones de vapor de agua, mientras que la reacción es importante a altas presiones, La reacción es importante en la gasificación por dos razones: La energía contenida en el gas producido se incrementa y el oxígeno requerido es menor debido al calor disipado en la generación de metano (B. Rugeles, 2007).

### 3.6.2 Tipos de gasificador

El tipo de gasificador viene definido según el tipo de lecho donde se encuentran el combustible y en el que sufre todas las reacciones vistas anteriormente. Estos tipos son lecho fijo, lecho fluidizado o flujo de arrastre. A continuación, se muestra una tabla resumen de las características principales por las que pueden ser clasificados los gasificadores, aunque nosotros hablaremos únicamente del último punto, ya que es el más utilizado en el mundo: (F. Chejne, 2006).

Poder calorífico del gas producido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas de bajo poder calorífico menos de 5 MJ/Nm<sup>3</sup>.</li> <li>• Gas de medio poder calorífico entre 5 y 10 MJ/Nm<sup>3</sup>.</li> <li>• Gas de alto poder calorífico entre 10 y 40 MJ/Nm<sup>3</sup>.</li> </ul>
-------------------------------------	--

Tipo de agente de gasificación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aire.</li> <li>• Vapor de Agua.</li> <li>• Oxígeno</li> </ul>
Presión de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja. Presión atmosférica.</li> <li>• Alta. Hasta 3 MPa.</li> </ul>
Dirección de movimiento relativo de la biomasa y del agente de gasificación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lecho fijo <i>updraft</i> o a contracorriente.</li> <li>• Lecho fijo <i>downdraft</i> o a cocorriente.</li> <li>• Lecho móvil perpendicular al flujo de gas. Flujo cruzado.</li> <li>• Lecho fluidizado.</li> </ul>

Tabla 3.5: Características según tipo de gasificación (Dendroenergía).

### Gasificación por lecho fijo

Han sido históricamente los más utilizados para el proceso. Funcionan en torno a los 1000 °C, según el tipo y dependiendo de la dirección del agente gasificador. Se clasifican en flujo ascendente o *updraft*, cocorriente o *downdraft* o de flujo transversal (F. Chejne, 2006).

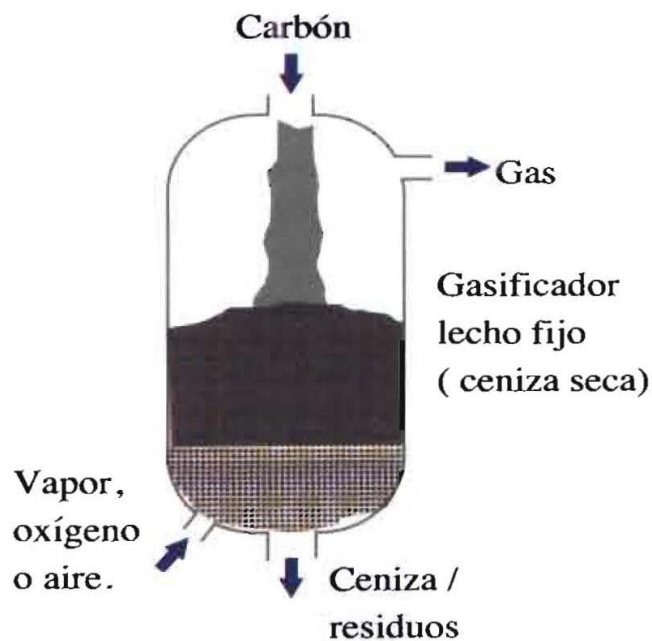


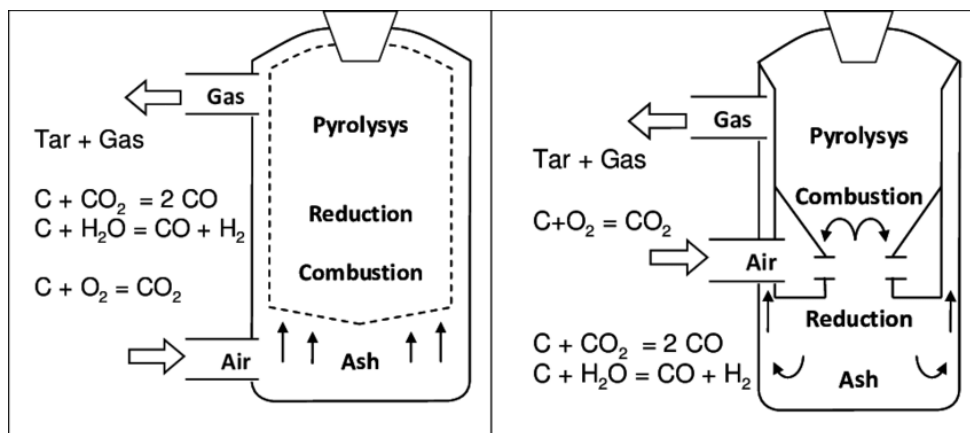
Figura 3.15: Flujos que intervienen en la gasificación.

*Tipo updraft. Flujo ascendente.*

En los gasificadores *updraft* la alimentación entra por la parte más alta del gasificador y el agente oxidante se introduce por la base, atravesando una parrilla. La zona de combustión llega hasta los 1000 °C, que puede ser controlada añadiendo aire o vapor de agua. Justo en la parte superior a esta se produce la pirólisis donde se forma alquitrán y cenizas en gran medida, y salen del gasificador con el gas producto. En este tipo de gasificador el rendimiento global es alto (alto poder de conversión) pero tiene el inconveniente de una formación elevada de alquitranes.

*Tipo downdraft. Flujo en cocorriente.*

Los gasificadores *downdraft* están estructurados para que la corriente de biomasa se mueva en la misma dirección que el agente gasificador, por lo que el gas producto sale del reactor tras pasar por la zona de combustión. Esto impide la formación completa de alquitrán durante la gasificación, produciendo un gas más limpio, aunque el contenido de partículas es más elevado. Los gases abandonan el gasificador a alta temperatura, lo que conlleva una eficiencia más baja que en la clase anterior. Este tipo de gasificador es el utilizado en nuestra simulación mediante Cycle-Tempo.



*Figura 3.16: A la izquierda tipo Updraft y a la derecha Downdraft.*

*Flujo transversal.*

En este tipo de gasificador, la alimentación entra por la parte de arriba a la vez que el aire u oxidante se introduce por la parte lateral. El gas producido se extrae por el otro lado del reactor, a la misma altura donde se introduce el oxidante. La zona caliente se produce donde entra el aire mientras que la pirólisis y el secado se producen ascendiendo por el gasificador, en ese orden. La ceniza se retira por el fondo y la temperatura oscila entre 800 y 900 °C, lo que produce bajo rendimiento y producción de alquitrán elevada.

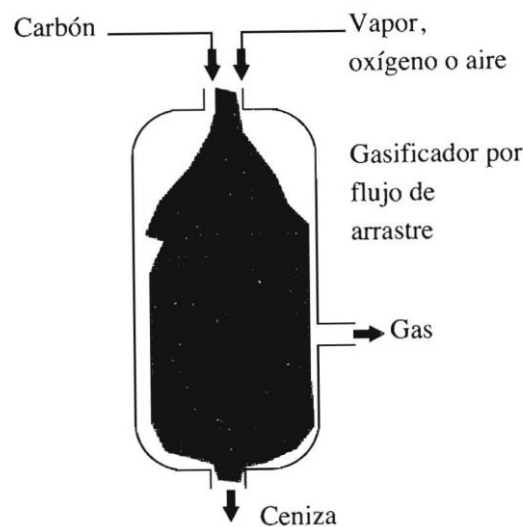
La principal desventaja es que necesitan una granulometría muy uniforme y tienen una limitada capacidad. El tamaño debe estar entre los 5 y los 80 mm para evitar que los gases lleven consigo partículas sin reaccionar y se causen tapones (F. Chejne, 2006).

### **Gasificador por flujo de arrastre.**

En este tipo el combustible y el oxidante y vapor se alimentan en la misma dirección.

La alimentación del combustible puede ser de dos maneras: seca, usando nitrógeno como gas de arrastre o mojada, transportada por mezcla de agua. En algunos casos puede producirse de las dos maneras para mejorar el rendimiento térmico y reducir los requisitos del oxidante. Dependiendo del tipo de alimentación, pueden operar con cualquier tipo de combustible o biomasa.

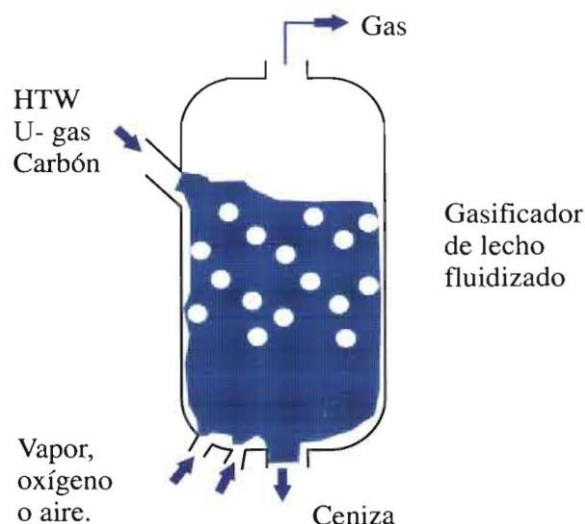
Es el tipo de gasificador que opera a más elevada temperatura, y para ello requiere de grandes cantidades de oxidante en comparación con los otros tipos. El gas de síntesis producido tiene como características generales la baja producción de metano y poca generación de alquitrán e hidrocarburos pesados (F. Chejne, 2006).



*Figura 3.17: Gasificador tipo flujo de arrastre.*

### **Gasificador de lecho fluidizado.**

Son un tipo que ha sido bastante utilizado tradicionalmente en procesos de gasificación. La principal ventaja es la uniforme distribución en la zona de gasificación de la temperatura.



Los principales tipos de gasificadores de lecho fluidizado son los gasificadores de lecho circulante y de lecho burbujeante.

*Figura 3.18: Gasificador tipo burbujeante.*

#### *Lecho fluidizado circulante.*

Los gasificadores de lecho fluidizado circulante cuentan con una gran capacidad y son utilizados en la industria papelera en el proceso de gasificación utilizando corteza de árboles y demás residuos forestales.

En el lecho, el combustible circula por la zona de reacción y el ciclón, lugar donde se remueve la ceniza y el material con el alquitrán vuelven a la zona de reacción. Esta clase de gasificador se permite operar a alta presión, por lo que es una ventaja si el syngas tiene como requisito salir a presión, por ejemplo para turbinas de gas (F. Chejne, 2006).

#### *Lecho fluidizado burbujeante.*

El funcionamiento de este tipo de gasificador es el siguiente: en la estructura hay una parrilla en la parte inferior por la que se introduce el aire y este se encuentra con el combustible que es introducido por el mismo lugar. La temperatura de este proceso oscila entre los 700 y 900 °C, dependiendo como en todos los tipos de la cantidad de oxidante utilizado. En la zona caliente se da la pirólisis, formando sobre todo un compuesto sólido y ciertos compuestos en forma de gas. Los compuestos con mayor masa molecular se descomponen por la temperatura y se obtiene un gas con una cantidad de tar baja (1-3 g/Nm<sup>3</sup>)

Un problema que presenta este tipo de gasificación es la facilidad de acumulación de material sólido (char, cenizas, inquemados) en la parte del reactor más baja, donde se encuentra la parrilla. Para ello es muy conveniente utilizar biomasa con bajo contenido en

restos minerales y metales alcalinos en sus estructuras químicas, siendo poco recomendables las plantas herbáceas. Se pueden evitar estos aglomerados modificando a la baja la temperatura de reacción del proceso, pero esto puede suponer una pérdida en el rendimiento de gasificación al dar lugar a compuestos sin reaccionar (F. Chejne, 2006).

### **3.7 Producción energética a través de la gasificación**

La finalidad de la producción del gas de síntesis o syngas es la obtención de energía eléctrica, y para ello es necesaria la utilización de tecnología que aproveche el poder calorífico del gas y lo transforme en energía mecánica (ciclo Rankine, motor de combustión, turbina de gas) o energía electroquímica (pilas de combustibles).

#### **3.7.1 Ciclo Rankine**

La descripción del ciclo Rankine (turbina de vapor) es la siguiente: La caldera donde se va a calentar el agua para obtener el vapor de agua necesario es alimentada por agua líquida con una temperatura por debajo siempre de la temperatura de líquido saturado. El agua es calentada mediante la combustión del combustible, syngas en nuestro caso, aunque puede ser sólido, como carbón o biomasa, líquido como diésel o cualquier otro tipo de gas. El vapor es transportado a alta presión hacia la turbina, cuyo eje está conectado al generador eléctrico, que tras esto es llevado al condensador. Los ciclos Rankine tienen multitud de configuraciones como turbinas de recuperación secundarias o recalentamiento del vapor en fases intermedias. En el condensador vuelve a la fase líquida y se repite la fase de bombeo hasta la caldera. Es uno de los procesos físico-químicos más utilizados y más extendidos en toda la historia. Su mejora e investigación en los últimos tiempos se ha centrado básicamente en el tratamiento de los gases contaminantes mediante filtros, desulfuradores y procesos catalíticos (Dirzo, 2009).

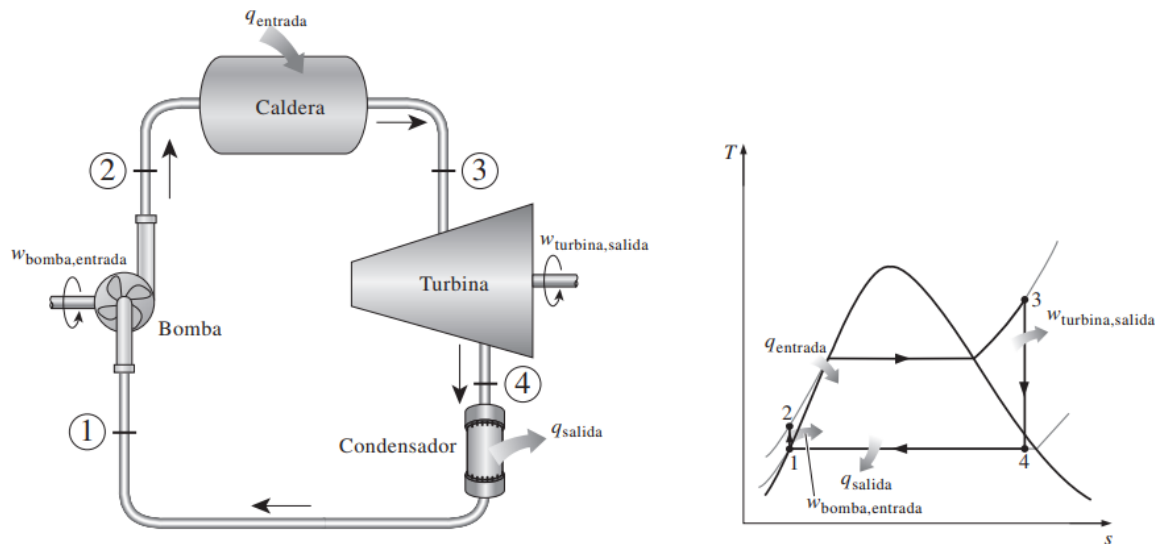


Figura 3.19: Esquema y diagrama del ciclo Rankine ideal simple

### Ciclo Rankine Orgánico (ORC)

En este tipo de instalaciones, la reducción de entalpía ocurrida durante el proceso de expansión es mucho menor que en las turbinas normales de vapor de agua, por lo que no se puede extraer una parte para un calentador abierto. No supone un gran problema debido a que la presión de condensación de los fluidos orgánicos utilizados suele ser a temperatura ambiente superior a la atmosférica, por lo que no es necesario el desgasificador ya que se puede llevar a cabo el precalentamiento antes de la caldera de otros modos.

Si el utilizado en el proceso es un fluido seco (líquido cuya pendiente en la línea de vapor saturado en el diagrama T-S es ascendente) se alcanza una temperatura elevada a la salida del expansor o turbina, la cual puede ser utilizada en un intercambiador para alcanzar una temperatura aun mayor a la entrada de la turbina, dando lugar a un ciclo regenerativo.

Algieri et al. llevó a cabo un estudio que demuestra que los ciclos ORC son una solución viable para generación de energía a tamaños pequeños y medianos, es decir, generación distribuida. Se pone de manifiesto la importancia de la temperatura máxima y la configuración del intercambiador en el rendimiento del proceso (Uris, 2017).

### 3.7.2 Motor de combustión interna

Los motores de combustión interna se basan en la combustión de la mezcla, previa compresión, aire y combustible en el cilindro, para crear una alta presión por los gases de

escape y así generar potencia mecánica que crea un movimiento lineal alternativo de un pistón, entre el punto muerto superior PMS y el inferior PMI.

Se puede comprimir el aire entrante al motor mediante un turbocompresor o supercargador para conseguir un aumento del rendimiento general del mismo, o del conjunto aire combustible en su defecto. Con esto se alcanza una energía de combustión más alta en cada ignición, aunque esto requiera más maquinaria y más requerimientos mecánicos. Otra manera de mejorar el proceso es enfriando el aire previamente a su introducción al cilindro con un intercooler.

Las revoluciones a las que trabaja el motor disminuyen con el aumento del tamaño (y por tanto potencia) del sistema. Los motores pequeños como los de un coche, rondan las 1500 rpm, los de intermedios como maquinaria ligera o transportes pesados oscilan entre 1000 y 750 rpm y las grandes, de generadores y transporte marítimo, entre 400 y 500 rpm, ya que supone un menor gasto de combustible (Negrete, 2017).

El gas de síntesis es apto para la utilización en producción eléctrica mediante motores de combustión interna, cuyo rendimiento depende fundamentalmente de la biomasa utilizada y de los motores.

El gas es de poder calorífico pobre, normalmente entre 4 y 7 MJ/m<sup>3</sup>, y con un alto contenido volumétrico en gases muy volátiles como monóxido de carbono, metano o hidrógeno. Presenta alta estabilidad al encendido y un buen número de metano, lo que lo hace válido para los MCI.

Esta es una tecnología ya comercial, y las aplicaciones en la industria tienen un rango desde potencias muy bajas hasta aproximadamente 1 MW. Los motores que pueden ser utilizados con gas de síntesis pueden ser los Diesel y los de ignición por chispa, los cuales siguen un ciclo Otto, siendo posible en estos últimos la sustitución del 100% del combustible por syngas (Lesme-Jaén, 2016).

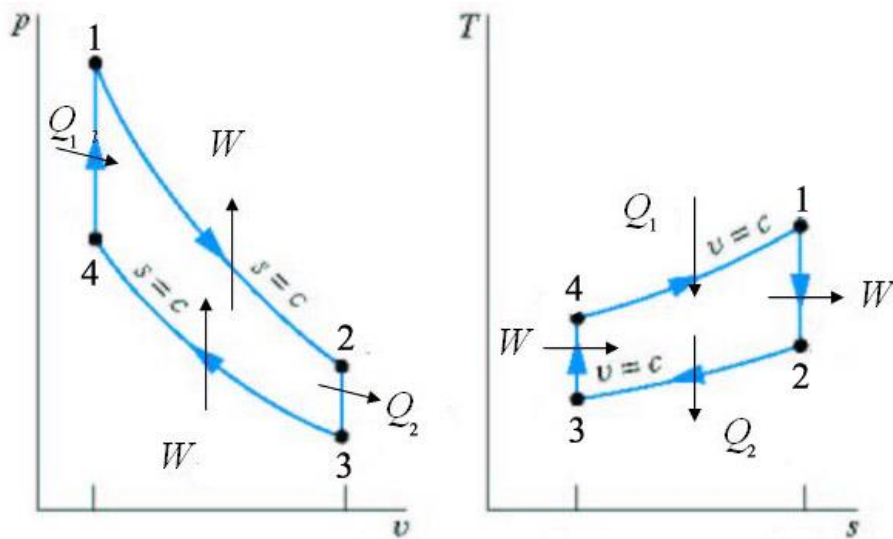


Figura 3.20: Diagrama P-V y T-S de un ciclo Otto (Gas o gasolina)

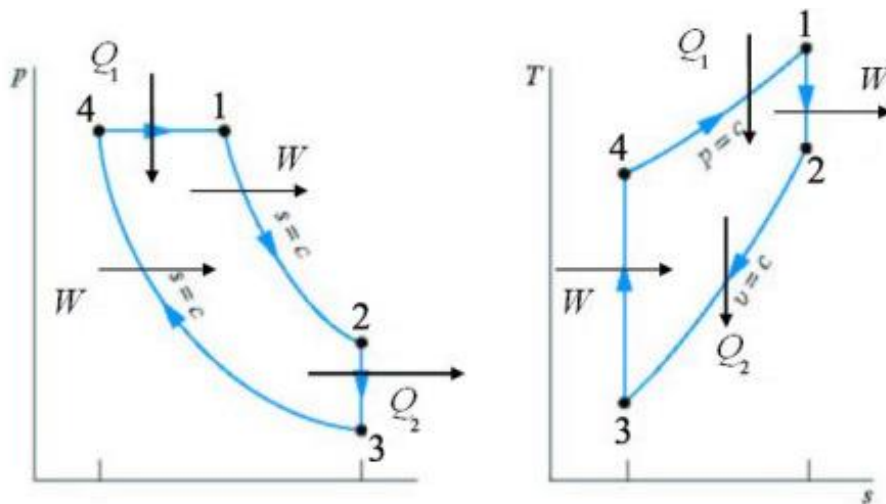


Figura 3.21: Diagrama P-V y T-S del ciclo Diesel

### 3.7.3 Turbina de gas

La turbina de gas es una turbomáquina a reacción, la cual funciona con gas como fluido de trabajo. Teniendo en cuenta la compresibilidad de los gases, son consideradas turbomáquinas térmicas. Se hace una diferenciación entre las turbinas de gas y las turbinas de vapor debido a que, a pesar de funcionar con elementos en fase gaseosa, las especificaciones y el diseño son distintas. El ciclo termodinámico empleado en las turbinas de gas es el ciclo Brayton, el cual tiene las siguientes fases: compresión, calentamiento y expansión o descompresión del fluido gaseoso que se emplea para producir trabajo mecánico, el cual puede ser utilizado tal cual o convertido en energía eléctrica mediante

acoplamiento a un generador. Al emplear aire como fluido termodinámico, este ciclo puede funcionar a temperaturas considerablemente altas, debido a esto es conveniente utilizar una fuente de energía térmica que pueda proporcionar gran cantidad de calor, para mejorar el rendimiento general del sistema.

Este tipo de turbinas utilizadas en el marco de la producción de energía eléctrica se suelen encontrar entre los 70 kW y 330 MW, encontrándose la eficiencia en el rango de 30 al 40 %, dependiendo de factores como el diseño, tamaño o temperatura (Chaparro, 2007).

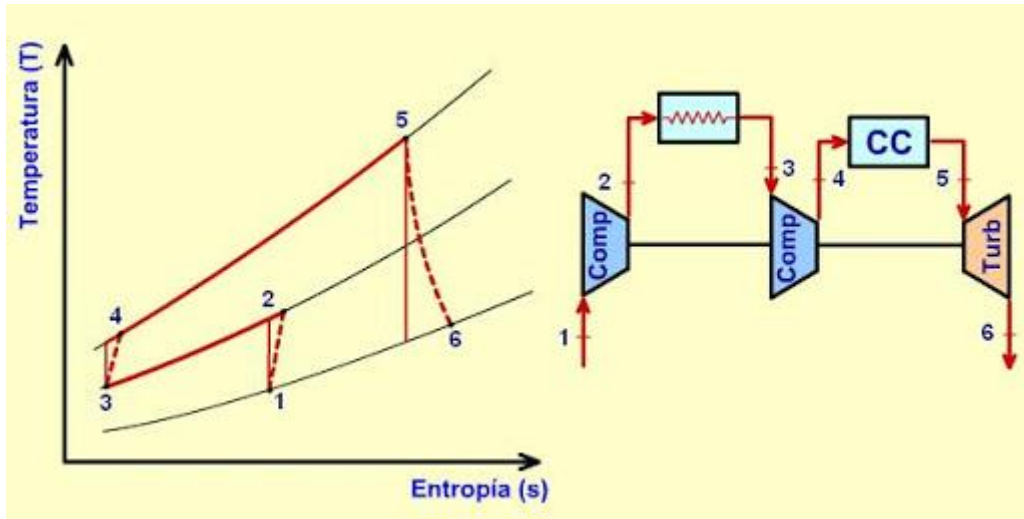


Figura 3.22: Esquema y diagrama de la turbina de gas

### 3.7.4 Pilas de combustible

Una pila o célula de combustible es un elemento de funcionamiento electroquímico el cual se basa en la transformación de la energía química de un combustible (PCI) en energía eléctrica en corriente continua evitando el proceso de quemado del combustible. Este proceso ocurre en un rango de presiones y temperaturas amplio, según su tipo. El rendimiento es más alto que en los demás modelos tratados con anterioridad y el impacto ambiental es mucho más reducido, ya que los subproductos de la reacción son agua y calor. Se distinguen de las baterías o pilas tradicionales en que la célula funciona mediante un flujo constante de reactivos, es decir, no permanecen estáticos en su interior, por lo que la producción de energía también es constante.

La pila se divide en celdas, y en esta se encuentran la capa de electrolito, que se pone en contacto con un electrodo, normalmente poroso, tal y como es representado en la siguiente figura:

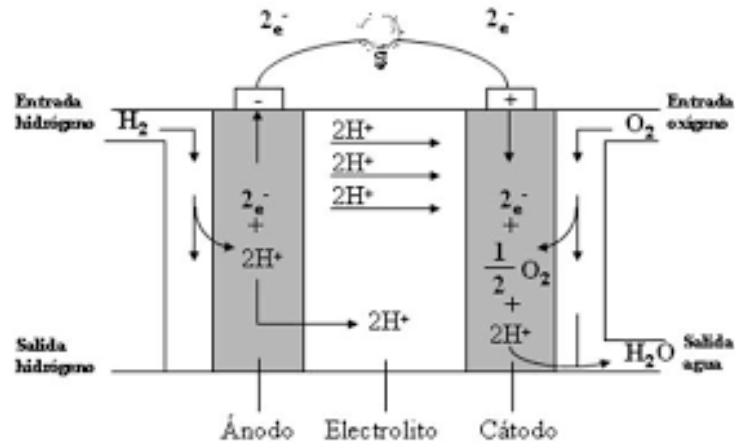


Figura 3.23: Esquema de la pila de combustible

El gas es introducido de manera continua por el ánodo, donde es ionizado para después sufrir el proceso de oxidación electroquímica, mientras que el oxidante (aire) es introducido por el cátodo. Las reacciones interesantes del proceso se producen en los electrodos, donde se produce corriente a través del electrolito.

El funcionamiento con el gas de síntesis es el siguiente: Los iones del oxígeno existente en el aire reaccionan con el CO y  $H_2$  para formar  $H_2O$  y  $CO_2$ . El gas pasa por la superficie del ánodo y se reforma completamente a CO y  $H_2$  sobre esta. Los electrones se conducen a través de un circuito externo del ánodo al cátodo de tal forma que se crea una corriente eléctrica. El CO puede reaccionar con vapor a  $CO_2$  y  $H_2$  mediante una reacción de desplazamiento del agua-gas "shift" (Chaparro, 2007).

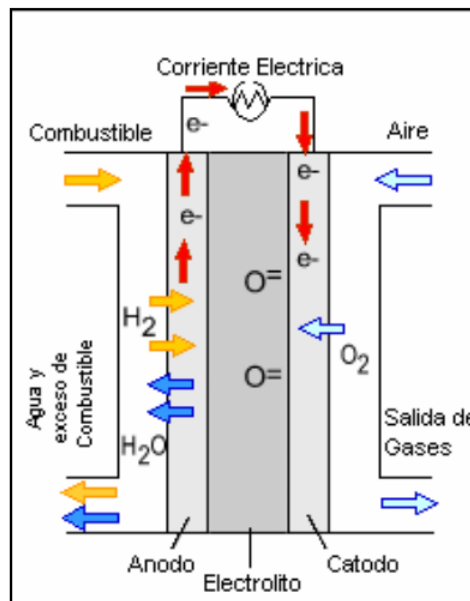


Figura 3.24: Funcionamiento de la pila de combustible con syngas

### 3.7.5 Barreras tecnológicas

Uno de los problemas que más interés suscita en la producción de energía mediante gasificación es el alquitrán. Este elemento o mezcla de sustancias produce efecto negativo en los catalizadores, siendo además un problema para estructuras y turbinas al ser condensado. Los procesos para su eliminación son difíciles y caros, encontrándose aun bajo investigación, como el lavado con solventes orgánicos, siendo el que mejor eficacia tiene de los métodos actuales.

Para otros compuestos no deseados tampoco existe un gran éxito, por ejemplo, para su utilización en pilas de combustible, ya que requieren de gran pureza al ser sensibles al envenenamiento por azufre u óxidos de diferentes compuestos.

Otro inconveniente es la alimentación de la biomasa al gasificador, especialmente cuando se requieren presiones por encima de 10 MPa, donde frecuentemente se utiliza transporte mediante tornillo, aunque con este método es habitual encontrar compactaciones y masificaciones debido a la humedad de la materia prima.

El coste de la gasificación integrada con una instalación de cogeneración de calor y electricidad superan a las instalaciones habituales, siendo necesarias políticas de subvención e incentivos gubernamentales (Arteaga-Pérez, 2015).

## 3.8 Ventajas de la gasificación

Vamos a enumerar a continuación las ventajas de la gasificación respecto a la combustión, ya sea de biomasa, combustibles fósiles, residuos urbanos, forestales o agrícolas (Steve Jenkins, 2015):

- Los contaminantes son eliminados en gran medida durante el proceso de limpieza de la gasificación en forma de residuos sólidos o disueltos en agua, siendo estos emitidos directamente a la atmósfera en la combustión en forma de partículas o moléculas nocivas.
- Los residuos o subproductos del proceso como cenizas, char, alquitrán o carbono sólido pueden ser utilizados como fertilizantes, en la industria química o combustibles, lo que le da un valor añadido.
- En la combustión de biomasa obtenemos energía térmica que puede ser utilizada casi exclusivamente en calderas o producción de electricidad con ciclos Rankine. En la gasificación obtenemos un gas, el cual puede ser utilizado para la industria química en la síntesis de otros compuestos, además de lo ya mencionado.

- Facilidad de transporte y almacenamiento del syngas.

### 3.9 Proyecto OLIVEN

OLIVEN es un proyecto financiado por el 7º Programa Marco de investigación ARIMNet2 de la Unión Europea, donde participan el Instituto de Investigación del Olivar, la Universidad de Ankara, el instituto de Olivar, el Ministerio de Agricultura de Túnez y la Universidad de Jaén.

El proyecto tiene como objetivo principal una forma de abastecer energéticamente de forma renovable, continua, y limpia a la industria oleícola mediante la gasificación de biomasa. Este sistema utiliza residuos producidos en esta industria, ofreciéndole un valor añadido y mejorando medioambientalmente el proceso de obtención del aceite de oliva.

El fin es desarrollar un producto con numerosas aplicaciones dentro del campo de la agricultura que fomente el autoconsumo energético y haciendo más competente esta industria en nuestro país, que se ve amenazada con respecto a otros mercados.

La investigación tiene una duración de 3 años, entre los años 2019 y 2021, y los resultados esperados se engloban en los siguientes:

- Informar a las almazaras y cooperativas locales de aceite de oliva para enseñar una visión más sostenible del mercado.
- Soluciones novedosas en la valorización de subproductos y gestión económica y social de la cadena de valor del aceite de oliva.
- Utilización más razonable de los recursos de los que disponemos como son la energía, el agua y productos químicos.
- Mejorar los costes de las partes involucradas en la producción del aceite mediante conceptos como autoconsumo y exportación de energía, ayudando a la economía rural.

Los beneficios se pueden verse reflejados directamente en:

- Una factura reducida gracias al autoconsumo, en concreto a la legislación vigente del Real Decreto 244/2019, la cual posibilita este tipo de instalaciones en empresas de extracción, almazaras y cooperativas. Esta reducción puede producirse hasta en el 100%.
- Obtención de agua caliente necesaria en el proceso de extracción, lo que ahorra en el combustible utilizado para alcanzar dicho calentamiento.
- Producción de gases a alta temperatura que pueden ser utilizados para el secado del hueso y del alperujo, el cual posteriormente puede ser convertido en orujillo, un excelente combustible para la gasificación.
- Producción de biochar, un subproducto el cual tiene grandes propiedades como potenciador del suelo, al ser un buen absorbente de agua y nutrientes para la planta,

y ofreciendo mayor disponibilidad mineral. También influye positivamente en microorganismos y raíces.

- La reducción de la huella o impacto del CO<sub>2</sub> en la producción del aceite español puede beneficiar en materia de marketing para el mercado nacional e internacional.

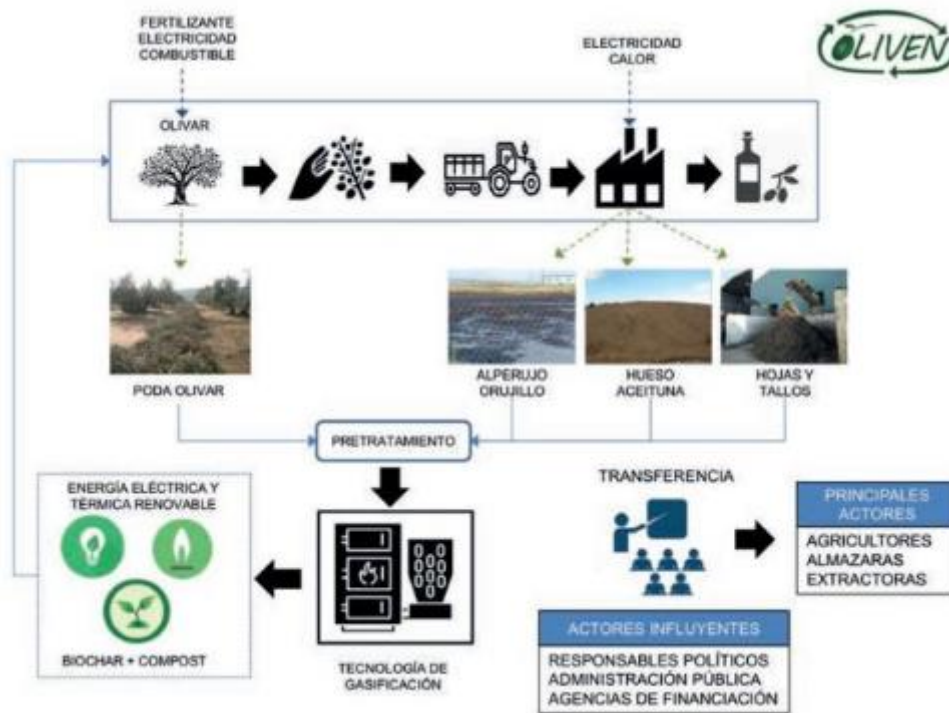


Figura 3.25: Esquema de los procesos del olivar sostenible

### 3.10 Otros proyectos de gasificación en España

#### 3.10.1 Empresa GUASCOR

La empresa GUASCOR, situada en el polígono industrial de Júndiz, en Vitoria Gasteiz, con ayuda económica de la IDAE está llevando a cabo una tecnología de gasificación, para lo que ha instalado una planta de gasificación de biomasa (astillas de madera y residuos forestales) con una capacidad de producción de potencia eléctrica de 450 kW, que podrán ser ampliados a 800 kW.

Características técnicas	
Biomasa: Astillas de pino	550 t/año
Horas de funcionamiento	1.700 h/año
Input térmico nominal	1.711 kW
Input térmico máximo	3.500 kW
Capacidad del gasificador	400-800 kg/h
Autoconsumo	85 kW

Tabla 3.6: Especificaciones del gasificador de GUASCOR

El proyecto desde el inicio está dividido en tres módulos de estudio, definidos por metas tecnológicas:

- Estudio del prototipo de gasificación en tres partes. Esta fase consiste en la instalación del reactor con el fin de conseguir un gas de síntesis con un PCI mayor de  $4,6 \text{ MJ/Nm}^3$ , con un rendimiento mínimo en frío del 65% en términos del PCI.
- Acoplamiento del sistema de limpieza y enfriado del gas, con un scrubber de biodiésel, y su adecuación para el uso en una planta de cogeneración
- Instalación de grupos electrógenos con MCIAs, basado en dos motogeneradores de combustión, uno con ciclo Otto de 330 kW y uno de ciclo diésel de 370 kW, el cual trabajará de forma dual con un 20% de gasoil y 80% de syngas. En esta fase se añade un módulo de pretratamiento basado en el secado vía trommel y astillado, el cual se abastece energéticamente de los dos motores anteriores.

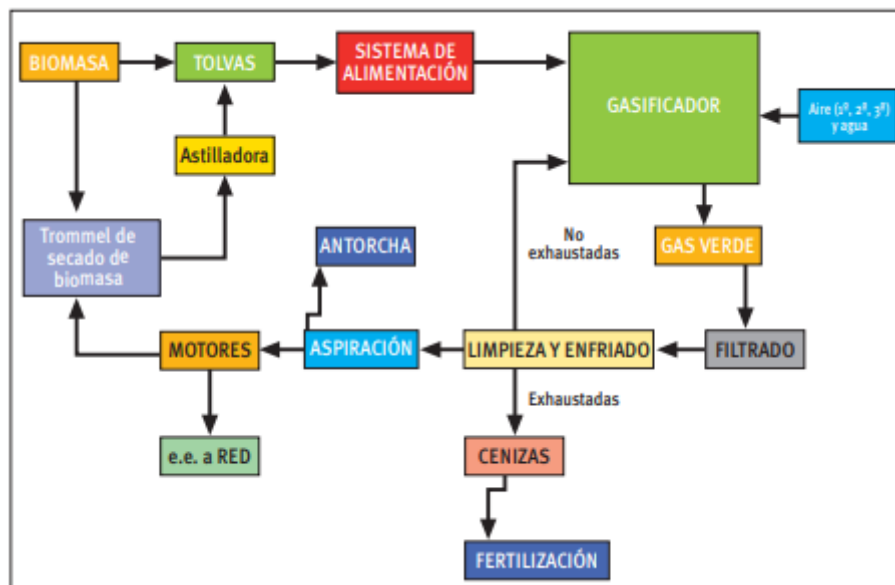


Figura 3.26: Esquema del gasificador.

### 3.10.2 Empresa MOVIALSA

La empresa productora de vino, mosto y alcoholes Movialsa, con localización en Campo de Criptana, Ciudad Real, instaló en 2011 una planta de cogeneración para producir agua caliente, vapor y electricidad con el fin de optimizar y aumentar el rendimiento de toda su fábrica.

La planta es alimentada por la gasificación de materiales residuales del aceite de oliva (orujo deshidratado y orujillo). Para la producción utiliza tres motores J620 Jenbacher que producen un total de 5,9 MW. de electricidad, 5.600 kg/h de vapor saturado a 6 bar y 159 m<sup>3</sup>/h de agua caliente a 90 °C, que son utilizados por la destilería.

La planta IBGPP gasifica 4000 kg/h de bagazo de uva de la fábrica de alcohol y pulpa de aceituna, lo que permite la eliminación total del efluente líquido de la fábrica. El bagazo se utiliza como materia prima en la planta gasificadora y el efluente líquido, llamado "Vinazas" (agua con 1 o 2% de materia orgánica) se concentra en una etapa múltiple de evaporador utilizando calor residual de motores de syngas (Movialsa, 2011).



*Figura 3.27: Gasificador de la planta de Movialsa.*



Figura 3.28: Generadores de la instalación.

Gasificador		Motores de gas	
Tecnología	Lecho burbujeante	Potencia eléctrica	5922 kW
Nº de líneas	4	Potencia térmica	6588 kW
Consumo	4000 kg/h – 19600 kWh	Eficiencia eléctrica	30,2%
Humedad	10%	Eficiencia térmica	33,6%
Eficiencia	0,72 kg/kW <sub>e</sub>	Tipo de generador	3 x J620

Tabla 3.7: Resumen de características de la instalación.

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Base teórica de la caracterización de la biomasa

#### 4.1.1 Análisis próximo y elemental

Para poder determinar si una biomasa es viable para cierto proceso, ya sea combustión, gasificación, pirólisis etc., debemos considerar ciertas características que se obtienen mediante una serie de evaluaciones para conocer su comportamiento. Las podemos definir en los siguientes tipos:

- Composición química:

Todos los tipos de biomasa se componen de agua, una parte orgánica y otra inorgánica. En el proceso de combustión se quema o volatiliza la parte orgánica, aunque la parte inorgánica influye de manera notable en el proceso ya que es la que forma las cenizas y los residuos sólidos. La composición química de la muestra se conoce mediante análisis de los elementos más relevantes como el carbono (C), hidrógeno, (H), nitrógeno (N), azufre (S) y en menor medida otros compuestos mucho menos frecuentes como el cloro (Cl) o el silicio (Si). El elemento que nos falta por nombrar es el oxígeno (O), pero este se calcula como la diferencia entre la suma de todos los elementos anteriores más la humedad y las cenizas menos el peso total (ITAGRA, 2012).

- Análisis próximo:

Para conocer la composición de manera primaria, es decir, de características básicas como la humedad (H), los materiales volátiles (VM), las cenizas (ASH) y el carbono fijo (FC) de la muestra. Se considera simple en mayor o menor medida, rápido y requiere de poco capital.

- Contenido en humedad:

Conocida también como humedad relativa, se trata del porcentaje en peso de agua que contiene una cierta cantidad conocida de biomasa. Puede medirse en base seca ( $h$ ) o en base húmeda ( $H$ ), ya que podemos tener en cuenta el peso de la biomasa según esta haya sido secada ( $P_o$ ) o continúe húmeda ( $P_h$ ). El peso en seco se obtiene pesando la materia seguidamente de haber sido secada en una estufa y evaporar el agua.

$$h = \frac{P_h - P_o}{P_o} \quad (1)$$

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_h} \quad (2)$$

Este porcentaje influye en gran medida en el poder calorífico de la muestra y por tanto en su proceso de combustión, ya que parte del calor de esa combustión se perdería evaporando el agua presente en la muestra. Mayoritariamente, los procesos de conversión energética necesitan rangos de humedad inferiores al 30%, ya que con porcentajes mayores se necesitarán tratamientos y procesos de secado antes de que podamos introducir la biomasa en cualquier tipo de reactor (ITAGRA, 2012).

- Porcentaje en cenizas:

La materia inorgánica contenida en las cenizas y por tanto en la biomasa, se encuentran en forma de sales unidas a moléculas orgánicas o como elementos minerales del suelo donde se ha realizado el cultivo, la recogida y el transporte y terminan en los distintos tipos de reactor (Melissari, 2012).

Uno de los procedimientos más extendidos para calcular el porcentaje de cenizas de la biomasa es el NREL/TP-510-42622, que consiste en calentar hasta los 575 °C una muestra de 1 g justo en un tiempo de 24 horas. Sencillamente esta muestra es pesada y comparada con el peso inicial, obteniendo el porcentaje con una división.

Un porcentaje elevado de cenizas puede traducirse en inconvenientes derivados de la acumulación de material semilíquido y depósitos de sólidos, formándose sobre todo en sitios a bajas temperaturas o intercambiadores de calor. También pueden producirse corrosión de los equipos del quemador y emisión de partículas contaminantes que tanto se limitan en la actualidad (Álvarez, 2013).

#### 4.1.2 Poder calorífico y granulometría

El poder calorífico o capacidad de generar calor, determina la energía química de la biomasa y es expresada en energía por unidad de peso o masa. Este calor se genera en la reacción de combustión de la muestra al completo. Encontramos dos tipos de poder calorífico; el superior (*PCS*) que es el que realmente se produce en la reacción de combustión, y el inferior (*PCI*) que es el realmente aprovechable energéticamente, ya que es el que libera la reacción después de haber evaporado el agua presente en la muestra. Por tanto, el *PCI* se obtiene eliminando el calor latente del agua formada (ITAGRA, 2012).

$$PCI = PCS - 2,5(9H + H_2O) \quad (3)$$

donde:

*PCI*: Poder calorífico inferior (MJ/Kg)

*PCS*: Poder calorífico superior (MJ/Kg)

*H*: Tanto por uno de hidrógeno en el combustible

*H<sub>2</sub>O*: Tanto por uno de humedad del combustible

Para determinar el poder calorífico de cierta muestra se suelen utilizar en muchos casos correlaciones empíricas, como la de Channiwala y Parikh (2002) que desarrollaron una fórmula (4) para obtener el *PCS* a partir de 15 correlaciones existentes y 50 tipos de combustibles de todas las clases (hidrocarburos, carbón, biomasa y gaseosos).

$$PCS (kJ \cdot kg^{-1}) = 349,1C + 1178,3H + 100,5S + 103,4O + 15,1N + 21,1Ash \quad (4)$$

Cada elemento se trata del porcentaje en masa contenido en la biomasa obtenido con el análisis elemental. El inconveniente es la limitación de su uso a las siguientes restricciones:

- $0 < C < 92\%$                        $4.745 < PCS < 55.345 \text{ kJ/kg}$
- $0,43 < H < 25\%$                        $0 < Ash < 71\%$
- $0,43 < N < 5,6\%$                        $0 < O < 50\%$

Granulometría: para la biomasa, hay una gran cantidad de formas en las que puede ser procesada, variando de tamaño y densidad a raíz de su naturaleza (polvo, hojas, piezas de madera de tamaños diversos). Las características de la granulometría dependen de la tecnología utilizada, ya que, si deseamos obtener un grado de molienda elevado, debemos aumentar el gasto energético necesario, ya que requiere de más potencia y tiempo de procesado.

También se debe tener en cuenta el nivel de compactación del material, que elimina agua y aire con la reducción de porosidad. Estudiaremos varios tipos fundamentales en los

que suele ser presentada la biomasa: pellets, briquetas, astillas, troncos o leños, briquetas y balas de paja (D. Vera, 2013).

- Pellets: Supone una mejora respecto a los demás tipos de compactación o granulado ya que tiene más densidad y es más constante para alimentar. Se debe secar antes de proceder a la pelletización. Las dimensiones del pellet estará entre 5 y 45 mm y la presión de formación será de más de 1.000 bares. Como características principales están la baja humedad (<8 %) y densidad por encima de 650 kg/m y un poder calorífico que oscile 4,9 y 5,4 kWh/kg.
- Astillas: Se utilizan en sistemas de quemado con alimentación automatizada de potencias mayores de 50 kW. La que encontramos en el mercado sufre secado en el transporte y almacenamiento, aunque se requiere de secado adicional si este porcentaje sube del 40 %. Las dimensiones se encuentran entre 1-10 cm de longitud y 4 de ancho.
- Leños o troncos: La materia leñosa se corta formando cilindros de más o menos la misma longitud, que suele ser 25, 33 o 50 cm. Una vez se corte la madera con el tamaño justo, ésta se estría para aumentar la superficie y así mejorar combustión y secado. La humedad no debe superar el 20%.
- Briquetas: Puede considerarse entre un leño y un pellet. En el proceso de fabricación, se seca por debajo del 10 % de humedad, aumentando el poder calorífico respecto a la leña, que se encontrará entorno a 18,5 MJ/kg. Mayormente utilizados para sistemas de calefacción pequeños (AAE, 2011).

## 4.2 Datos de la caracterización

### 4.2.1 *Pericarpio de almendra*

Los datos de la caracterización para el pericarpio de almendra han sido obtenidos en el artículo Remón, Javier et al. "Producción de bio-combustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotermal de pericarpios de almendra", 2019. Previamente a su caracterización, los pericarpios de almendras se secaron y se molieron a un tamaño de partícula apropiado para su tratamiento (< 15 mm).

<b>Análisis inmediato (% peso)</b>		<b>Análisis elemental (% peso)</b>	
Humedad	8,75	C	42,43
Cenizas	5,68	H	4,97
		N	0,7
		O	37,44
		S	0,03
<b>PCS (MJ/kg)</b>	17,11		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	15,81		

*Tabla 4.1: Caracterización del pericarpio de almendra.*

#### 4.2.2 Poda de olivar

Para la caracterización de la muestra de poda se tendrá en cuenta el artículo "Inorganic matter characterization in vegetable biomass feedstocks" de Suárez-García et al. publicado en 2002.

<b>Análisis inmediato (% peso)</b>		<b>Análisis elemental (% peso)</b>	
Humedad	4,60	C	45,49
Cenizas	2,13	H	5,58
Volátiles	77,63	N	0,55
Carbono Fijo	15,65	O	41,61
		S	0,04
<b>PCS (MJ/kg)</b>	18,05		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	16,70		

*Tabla 4.2: Caracterización de la poda de olivar.*

#### 4.2.3 Cáscara de almendra

La muestra de cáscara de almendra viene caracterizada en el artículo Canales Izquierdo, Isabel, et al. "Valorización de biocarbones obtenidos mediante pirólisis de residuos orgánicos" siendo el resultado la media del análisis de tres muestras.

<b>Análisis inmediato (% peso)</b>		<b>Análisis elemental (% peso)</b>	
Humedad	6,15	C	46,64
Cenizas	0,88	H	5,91
Volátiles	76,11	N	0,24
Carbono Fijo	16,86	O	40,16
		S	0,01
<b>PCS (MJ/kg)</b>	18,77		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	17,33		

Tabla 4.3: Caracterización de la cáscara de almendra.

#### 4.2.4 Pellets de orujillo

Los pellets de orujillo fueron estudiados por Miranda, T. et al. "Emissions from thermal degradation of pellets with different contents of olive waste and forest residues".

<b>Análisis inmediato (% peso)</b>		<b>Análisis elemental (% peso)</b>	
Humedad	6,86	C	47,89
Cenizas	5,17	H	6,11
Volátiles	71,89	N	1,84
Carbono Fijo	16,09	O	32,04
		S	0,10
<b>PCS (MJ/kg)</b>	20,52		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	19,02		

Tabla 4.4: Caracterización del pellet de orujillo.

#### 4.2.5 Hueso de dátil

El artículo de referencia para la obtención de los datos del hueso de dátil será "Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*" de Hani Sait et al.

<b>Análisis inmediato (% peso)</b>		<b>Análisis elemental (% peso)</b>	
Humedad	4,9	C	45,3
Cenizas	10,8	H	5,6
Volátiles	76,6	N	1,0
Carbono Fijo	7,7	O	31,6
		S	0,8
<b>PCS (MJ/kg)</b>	20,35		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	18,97		

Tabla 4.5: Caracterización del hueso de dátil.

#### 4.2.6 Hueso de aceituna

La caracterización del hueso de aceituna ha sido tomada del artículo "Alkali deposits found in biomass power plants: A preliminary investigation of their extent and nature" de Miles, T. et al.

<b>Análisis inmediato (% peso)</b>		<b>Análisis elemental (% peso)</b>	
Humedad	9,75	C	47,65
Cenizas	1,55	H	6,04
Volátiles	74,00	N	0,41
Carbono Fijo	14,69	O	34,55
		S	0,05
<b>PCS (MJ/kg)</b>	19,50		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	17,95		

Tabla 4.6: Caracterización del hueso de aceituna.

#### 4.2.7 Resumen de características

Muestra	%C	%H	%N	%O	%S	%H <sub>2</sub> O	%ASH	PCI (Mj/kg)
(1)	42,43	4,97	0,70	37,44	0,03	8,75	5,68	15,81
(2)	45,49	5,58	0,55	41,61	0,04	4,60	2,13	16,70
(3)	46,20	5,48	0,68	36,96	0,03	7,85	2,80	16,16
(4)	47,89	6,11	1,84	32,03	0,10	6,86	5,17	19,02
(5)	45,30	5,60	1,00	31,60	0,80	4,90	10,80	18,97
(6)	47,65	6,04	0,41	34,55	0,05	9,75	1,55	17,95

Tabla 4.7: Datos de todas las caracterizaciones de las muestras.

- (1) Pericarpio de almendra.
- (2) Poda de olivar.
- (3) Cáscara de almendra.
- (4) Orujillo.
- (5) Hueso de dátil.
- (6) Hueso de aceituna.

#### 4.2.8 Fórmulas en los procesos de la instalación

Para la determinación de algunos PCI a partir de los datos de análisis próximo y elemental de nuestras muestras de biomasa utilizamos la siguiente fórmula (1) ya mencionada en el apartado “poder calorífico y granulometría” (A. Sánchez, 2017).

$$PCI = PCS - 2,5(9H + H_2O) \quad (1)$$

Rendimiento del proceso de gasificación: división entre la energía aportada por el gas y la energía almacenada que aporta el combustible al proceso.

$$\eta_G = \frac{\text{Energía del gas}}{\text{Energía del combustible}} \quad (5)$$

La energía del gas de síntesis es:

$$E_{gas} = PCI \left( \frac{KJ}{Nm^3} \right) \cdot V_{gas} \left( \frac{Nm^3}{kg} \right) \quad (6)$$

Y la energía procedente de la biomasa o combustible:

$$E_{biomasa} = PCI \left( \frac{KJ}{Kg} \right) \quad (7)$$

Siendo  $PCI$  el poder calorífico inferior y  $V$  el volumen específico.

En cuanto al rendimiento del sistema, se puede hacer una división entre el rendimiento a la salida del gasificador (*hot*), donde el gas está a alta temperatura y sin pasar por la unidad de limpieza, y el Syngas obtenido al final de todo el proceso (*cold*), habiendo pasado por los filtros e intercambiadores. Estos rendimientos los estudiaremos para las muestras de biomasa de este TFG (D. Vera, 2013).

$$\eta_{g,hot} = \frac{PCI_g \cdot \dot{m}_g + c_{p,g} \cdot \dot{m}_g \cdot (T_g - T_0)}{PCI_b \cdot \dot{m}_b} \quad (8)$$

$$\eta_{g,cold} = \frac{PCI_g \cdot \dot{m}_g}{PCI_b \cdot \dot{m}_b} \quad (9)$$

- $PCI_g, PCI_b$ : Poder calorífico inferior del gas y de la biomasa.
- $\dot{m}_g, \dot{m}_b$ : caudal másico del gas y de la biomasa.
- $T_g, T_0$ : Temperatura del gas de salida y temperatura ambiental.

Un parámetro muy importante y que será el encargado de establecer la temperatura de gasificación alcanzada por el reactor es la ratio aire-combustible,  $x_{OF}$ , (kg aire/kg combustible o biomasa).

$$x_{OF} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \quad (10)$$

El flujo de gas producto, la biomasa entrante, las temperaturas y el poder calorífico inferior en el sistema serán obtenidos mediante Cycle Tempo. Respecto a la eficiencia del proceso, se destaca la capacidad de conversión del carbón existente en la biomasa, que se traduce en la cantidad de carbono transformado en gas producto. Este parámetro se supondrá del 95 % de eficiencia.

Para las 5 muestras de biomasa estudiadas en este proyecto, se estudiarán con los datos obtenidos en el software Cycle Tempo los rendimientos en frío y en caliente. Se tomarán datos para los siguientes supuestos:

- Variando la temperatura de gasificación entre 800-1100 °C, sin intercambiador de calor en el sistema.
- Variando la temperatura del aire de entrada mediante un intercambiador de calor que será estudiado en el apartado de diseño del sistema. Dicho intercambiador tendrá en todos los casos un rendimiento del 90%.

En ambos casos tomaremos la temperatura de salida a 25 °C.

Los  $PCIs$  y flujos máxicos, nos los facilitará para cada caso Cycle Tempo, teniendo que calcular el calor específico  $c_p$  de manera teórica.

Para calcular el  $c_p$  máxico debemos de hacer una media ponderada con el porcentaje de cada compuesto presente en el syngas que nos proporciona el software. A temperatura y presión atmosférica (25 °C, 1 atm) son los siguientes:

Compuesto	$c_p$ (kJ/kg·K)
H <sub>2</sub>	14,319
N <sub>2</sub>	1,040
H <sub>2</sub> O	4,186

CO <sub>2</sub>	0,044
CO	1,039
CH <sub>4</sub>	2,254

Tabla 4.8: Calores específicos de los distintos compuestos.

Tomamos estos 6 compuestos ya que la suma de sus porcentajes en todos los casos es superior al 99% del total, por lo que simplificar el resto de compuestos minoritarios no supone una diferencia significativa.

Para realizar la media ponderada debemos pasar el porcentaje molar a porcentaje másico, que se hace con la fórmula:

$$\% \text{ másico} = \frac{pm_x \cdot n_x}{m_T} \quad (11)$$

- $pm_x$ : Peso molecular del compuesto  $x$ .
- $n_x$ : Es el número de moles de  $x$ . Para una base de cálculo de 1 mol, es igual al porcentaje molar.
- $m_T$ : Masa total del compuesto, que será la correspondiente a 1 mol.

Por último, el  $c_p$  final se calculará con la fórmula:

$$\sum_{i=1}^n cp_i \cdot \%m_i \quad (12)$$

- $\%m_i$ : Porcentaje másico del compuesto  $i$ .
- $cp_i$ :  $cp$  del compuesto  $i$ .

Las potencias involucradas en la parte de cogeneración son fundamentalmente 3: Potencia de entrada, potencia eléctrica y potencia térmica.

La potencia de entrada del motor  $P_{motor}$  será la potencia de entrada del syngas, que se puede representar por la fórmula (13), la potencia térmica  $P_{térmica}$  (de los gases de escape) se representa por la fórmula (14) y la potencia saliente de forma eléctrica  $P_{eléctrica}$  corresponde a la (15).

$$P_{motor} = PCI_g \cdot \dot{m}_g \quad (13)$$

$$P_{térmica} = c_{p,s} \cdot \dot{m}_s \cdot (T_s - T_0) \quad (14)$$

$$P_{eléctrica} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (15)$$

- $c_{p,s}$ : calor específico de los gases de escape.
- $\dot{m}_s$ : flujo másico de los gases de escape.
- $T_s, T_0$ : Temperatura de los gases de salida y temperatura ambiental.
- $V, I$ : Voltaje e intensidad del generador eléctrico.
- $\cos \varphi$ : Factor de potencia.

Teniendo en cuenta las pérdidas en el motor mediante el calor de la refrigeración, pérdidas en la combustión, pérdidas mecánicas por rozamiento, por radiación y convección y la eficiencia del alternador, podemos decir que los rendimientos finales del sistema de generación son el rendimiento eléctrico y el rendimiento térmico:

$$\eta_e = \frac{P_{eléctrica}}{P_{motor}} \quad (16)$$

$$\eta_t = \frac{P_{térmica}}{P_{motor}} \quad (17)$$

### 4.3 Simulación de la planta de gasificación

El gasificador utilizado para la simulación será un modelo FBG – 25 de 10 kW<sub>e</sub>, cuya hoja de características, para la cual han tomado la cascarilla de arroz, son:

Flujo de gas	60 Nm <sup>3</sup> /h
--------------	-----------------------

Tipo de gasificador	Downdraft	
Poder calorífico medio del gas	> 1050 kcal/m <sup>3</sup> ; > 4,393 MJ/m <sup>3</sup>	
Temperatura del reactor	1050-1100 °C	
Consumo de biomasa por hora	25-30 kg	
Composición estimada del gas	CO – 17 ± 2	CH <sub>4</sub> – < 3%
	O <sub>2</sub> – < 1%	H <sub>2</sub> – 14 ± 3%
	CO <sub>2</sub> – 14 ± 3%	N <sub>2</sub> – Resto.

Tabla 4.9: Especificaciones del gasificador objeto de estudio.

Al ser estas características para la cáscara de arroz, como nos dice el fabricante, debemos hacer el modelo de Cycle Tempo que se ajuste a dichas especificaciones para después hacer un modelado de cada una de las muestras de este proyecto.

La muestra de materia prima utilizada en este estudio es de Hexian, en China. Antes de la medición, se usó un tamiz con una abertura de 1,7 mm para eliminar las impurezas y el polvo que contiene la cáscara, que tienden a influir en los resultados. El contenido de humedad se midió calentando la cáscara de arroz en un horno de secado a 105 °C, y el contenido de cenizas se midió introduciendo la cáscara de arroz en el horno de mufla a 600 °C, midiendo el peso de forma constante. La materia volátil se midió descomponiendo la cáscara de arroz en un horno de mufla a 900 °C para un total de exactamente 7 minutos. El carbono fijo se calculó por diferencia (J. Shen, 2012).

Análisis inmediato (% peso)		Análisis elemental (% peso)	
Humedad	7,4	C	40,95
Cenizas	10,10	H	4,69
Volátiles	64,07	N	0,46
Carbono Fijo	18,43	O	35,93
		S	0,47
<b>PCS (MJ/kg)</b>	14,68		
<b>PCI (MJ/kg)</b>	14,01		

Tabla 4.10: Caracterización de la cáscara de arroz.

Se utilizó una bomba calorimétrica de oxígeno isoterma. El barril interno del calorímetro estaba lleno de agua desionizada cuya temperatura era medida con una precisión de 10<sup>-4</sup> K a intervalos de 30 s utilizando un termómetro digital (J. Shen, 2012).

#### 4.3.1 Herramientas de Cycle Tempo

El interfaz de Cycle Tempo funciona a base de *Apparatus*. Son elementos que forman los distintos puntos del circuito que queremos construir. En ellos se introducen los distintos parámetros conocidos para que se lleve a cabo el proceso, en nuestro caso gasificación.

Se explican a continuación los utilizados:


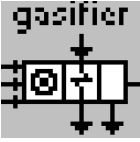
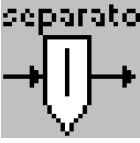
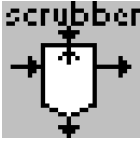
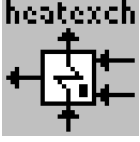
	<p>Sink/source: Sirven para delimitar las características de una corriente y las pérdidas que pueda tener. Principalmente presión, temperatura y caudal.</p>
	<p>Gasifier: Será el elemento principal del proceso. En él se introduce el ratio combustible-aire, la temperatura, presión y pérdidas.</p>
	<p>Separator: Elimina componentes de la corriente principal. Se puede configurar para pérdidas de presión y temperatura.</p>
	<p>Scrubber: Produce una reducción de la temperatura del gas mediante la inyección del agua, además de eliminar impurezas.</p>
	<p>Heat Exchanger: Intercambiador de calor del aire de entrada al proceso de gasificación con el gas de salida del mismo. Produce un incremento del rendimiento.</p>

Tabla 4.11: Elementos explicados de Cycle-Tempo.

#### 4.2.1 Modelado del circuito de gasificación

La configuración del sistema constará de dos etapas principales: la gasificación y la purificación y tratamiento del Syngas.

En la primera ocurrirá todo el proceso físico-químico ya comentado, mientras que en la segunda tendremos que hacer que el combustible sea óptimo para su futura utilización en un motor. Para ello necesitaremos eliminar las partículas de cenizas e inquemados, que producen corrosión y bajan el rendimiento de la combustión, y la

humedad, que reduce el poder calorífico de un gas. Además de todo ello necesitamos bajar la temperatura del gas a temperatura ambiente para su posterior uso en motor o turbina.

En nuestro caso no utilizaremos equipo de extracción de óxidos de azufre o nitrógeno ya que el contenido de azufre de la biomasa es despreciable y la producción de  $\text{NO}_x$  es nula.

### Proceso de gasificación

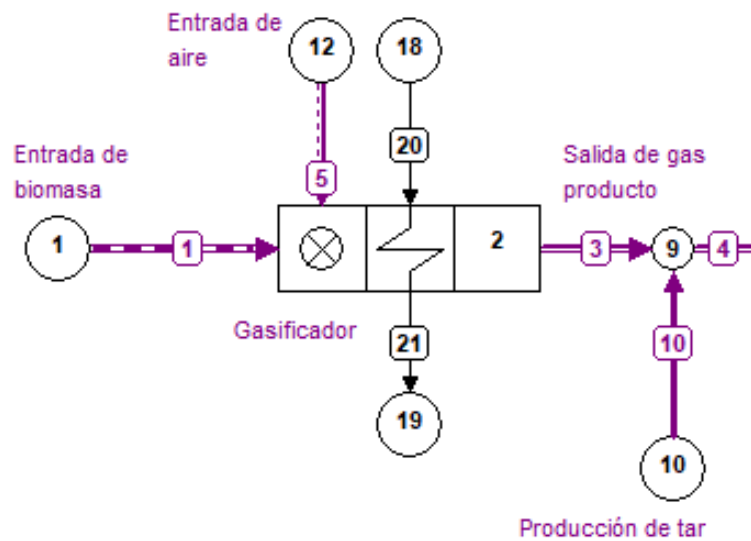


Figura 4.1: Esquema del módulo de gasificación del sistema.

Los flujos en **morado** son los involucrados en esta primera parte. Se trata de la entrada de biomasa, entrada de aire y gasificador, y la salida del gas sin tratar.

El Apparatus 1 es la entrada de biomasa en el gasificador. En él tendremos que introducir las características de entrada, que serán la temperatura ( $T_{OUT}$ ) y la presión ( $P_{OUT}$ ), y serán las atmosféricas. También introducimos un caudal de elección propia para el modelado de la planta, en nuestro caso  $0,0833 \text{ kg/s}$ , para conseguir los  $30 \text{ kg/h}$  de la hoja de características del gasificador. Multiplicando el caudal másico con el  $PCI$  el programa nos da los  $\text{kW}_t$  que entran ( $116,70$ ).

Apparatus 1 Sink/Source

Apparatus statistics

No.: 1

Name: Sink/Source

Additional input data

Geometry input data

Off-design input data

Input data

PIN		bar	XOUT		-
POUT	1.013	bar	PIPE		-
DELP		bar	ESTMAS		kg/s
TIN		°C	LHV		kJ/kg
TOUT	25	°C	SUBTYP		-
DELT		°C	DTSUBC		°C
DELE		kW	DTSUPH		°C
DELM	0.00833	kg/s	WFOT		-
HIN		kJ/kg	ESTTIN		°C
HOUT		kJ/kg	ESTTOU		°C
DELH		kJ/kg	DELV		m3/s
XIN		-	DELVN		nm3/s

OK Cancel Clear Help

Figura 4.2: Datos introducidos en el Apparatus 1 (condiciones de entrada)

En el flujo 1 introduciremos la composición y el poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa, la cascarilla de arroz mencionada en la tabla (tabla de la biomasa del arroz).

Fuel Composition (User defined)

Component	Mass %
C	40.95
H	4.69
H2O	7.40
N	0.46
O	35.93
S	0.47
SiO2	10.10

Total: 100.00 %

Delete

Component panel

Al2O3(l)	C	C5H
Al2O3(s)	C2H2	C6H
Ar	C2H4	CCl4
BCl3	C2H6	CH4
BF3	C3H8	Cl
Br2	C4H10	Cl2

Default compositions

Lower heating value: 14010.00 kJ/kg

OK Cancel Clear Load Save As Help

Figura 4.3: Composición de la biomasa (cascarilla de arroz).

Las cenizas presentes en el análisis último de la ceniza, las representamos como SiO<sub>2</sub>, el cual es un compuesto inorgánico mineral.

La entrada de aire al sistema se produce en el Apparatus 12. El flujo del mismo se transporta en los canales 12 y 2, pasando esta por un intercambiador el cual será analizado en la segunda parte del modelado.

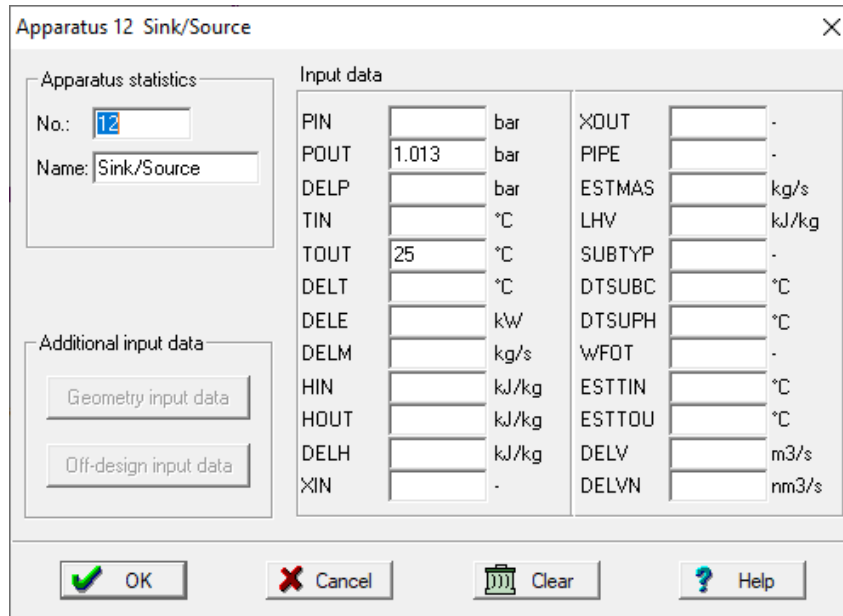


Figura 4.4: Condiciones de entrada del aire.

El flujo másico del aire no se introduce aún, ya que este dato será modificado más adelante en un parámetro del gasificador.

En el flujo 12 introduciremos la composición del aire, que Cycle-Tempo la tiene por defecto.

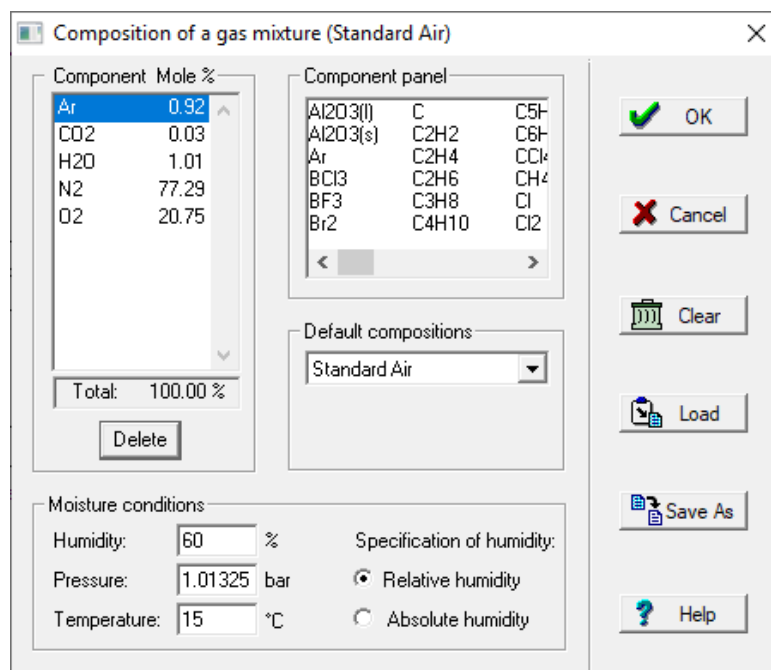


Figura 4.5: Composición del aire de entrada.

En el Apparatus 2, el gasificador, entran los flujos 1 (biomasa), 2 (aire calentado) y 20 (agua de refrigeración) la cual no será utilizada en nuestro proceso, por lo cual su flujo másico será igual a 0 kg/s.



*Figura 4.6: Gasificador del proyecto OLIVEN*

Los parámetros a modificar en el Apparatus 2 serán la presión, el ratio aire-combustible, las pérdidas de energía y las pérdidas por reacción.

- La presión POUT será, como en todo el proceso, la atmosférica.
- El incremento de presión DELP1 es igual a 0.
- EEQCOD: Valor igual a 2 porque el balance energético se realiza para calcular una temperatura.
- Ratio aire combustible OFRATI: este parámetro será modificado para buscar el equilibrio entre un mayor PCI del Syngas, la composición más parecida a la teórica de las características del gasificador para el rice husk.
- Pérdidas de energía en el proceso DELE, iguales a el 5% de la energía entrante de la biomasa, que supone 5.835 kW.
- Pérdidas por reacción incompleta de la biomasa, Bypass Components, que se traduce en un 5% del carbono entrante al reactor.

Apparatus 2 Gasifier

Apparatus statistics  
 No.: 2  
 Name: Gasifier

Additional input data  
 Separate components  
 Bypass components

Input data

EEQCOD	2	-	DTREAC		°C
PIN1		bar	SFRATI		kg/kg
POUT1	1.013	bar	OFRATI	1.888	kg/kg
DELP1	0	bar	ESTOFR		kg/kg
TIN1		°C	AFRATI		kg/kg
TOUT1		°C	POUT2		bar
DELT1		°C	TOUT2		°C
PIN2		bar	ESTPOU		bar
TIN2		°C	PASH		bar
DELE	5.835	kW	TASH		°C
PREACT	1.013	bar	DPASH		bar
TREACT		°C	DTASH		°C

OK Cancel Clear Help

Figura 4.7: Especificaciones del modelado del gasificador.

Apparatus 2 Gasifier

Apparatus statistics  
 No.: 2  
 Name: Gasifier

Additional input data  
 Separate components  
 Normal input data

Bypassing of non reacting components to product outlet

Component	Mass %	Component panel
C	5.00	Al2O3(l) C C5H
		Al2O3(s) C2H2 C6H
		Ar C2H4 CCl4
		BCl3 C2H6 CH4
		BF3 C3H8 Cl
		Br2 C4H10 Cl2

Delete

Mole or mass percentage  
 Mole %  
 Mass %

Average mass percentage: mass %

OK Cancel Clear Help

Figura 4.8: Bypass del carbono sin reaccionar.

La corriente del gas de salida del gasificador, el flujo 3, se trata del Syngas previo a ser purificado para su combustión, ya que tiene componentes que nos interesa eliminar, para evitar corrosión, mejorar el proceso de combustión y por tanto el rendimiento del motor.

Aquí, el alquitrán es un producto indeseable debido a la gasificación de biomasa debido a los diversos problemas de ensuciamiento y slugging en el equipo del proceso. Aunque hay cientos de especies en la muestra de alquitrán para simplificar el análisis,

todas las especies se tratan como un único compuesto. Actualmente, hay tres métodos disponibles para minimizar la formación de alquitrán: (I) diseño apropiado del gasificador, (II) control y operación adecuados y (III) aditivos / catalizadores. El alquitrán se modela como compuesto de benceno con la fórmula química  $C_6H_6$  (A. Abuadala, 2009).

$$\text{Alquitrán}(C_6H_6) = 35,98 e^{-0,0029 T} \text{ mg/Nm}^3 \quad (18)$$

La siguiente gráfica representa la curva exponencial de la fórmula del benceno, con un rango de temperaturas entre 800 y 1100 °C.

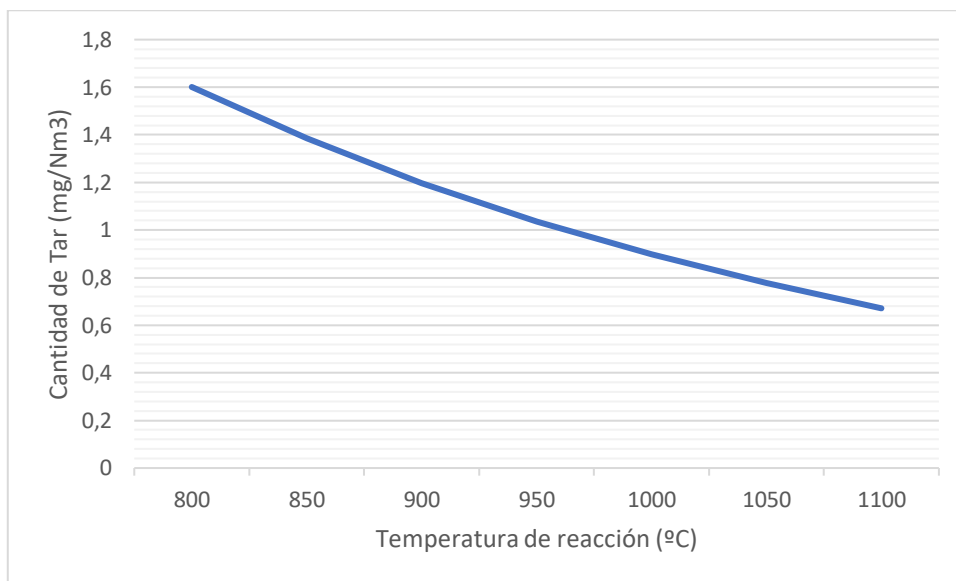


Figura 4.9: Formación de alquitrán respecto a la temperatura de reacción.

Se observa que la cantidad de alquitrán es inversamente proporcional a la variación de la temperatura del reactor. Si se desea diseñar un buen sistema de limpieza, este factor es clave para tener en cuenta ya que el alquitrán es muy perjudicial en las máquinas y equipos involucrados en el proceso (D. Vera, 2013).

Nuestra temperatura de reacción era 850 °C (1123,15 K), por lo que, utilizando la fórmula del benceno, calculamos la cantidad de alquitrán que entra en el sistema:

$$\text{Alquitrán}(C_6H_6) = 35,98 e^{-0,0029 \cdot 1123,15 K} \text{ mg/Nm}^3$$

$$\text{Alquitrán}(C_6H_6) = 1,385177 \text{ mg/Nm}^3$$

Para obtener la cantidad en kg/s que ha de entrar en la corriente a la salida del gasificador, debemos de realizar un factor de conversión:

$$\text{Alquitrán}(C_6H_6) \cdot \phi_V \cdot \frac{1kg}{10^6 mg}$$

Siendo  $\phi_m$  el flujo volumétrico en m<sup>3</sup>/s, calculado por Cycle Tempo con anterioridad, que es igual a 0,093177.

$$1,385177 \frac{mg}{Nm^3} \cdot 0,093177 \frac{Nm^3}{s} \cdot \frac{1kg}{10^6 mg} = 1,2907 \cdot 10^{-7} kg/s$$

Como se puede observar, la cantidad de tar producido es insignificante al ser un gasificador de tipo *downdraft*, por lo que se reflejará en los esquemas y en la explicación del sistema, pero no supondrá un porcentaje significativo en la composición final.

Este flujo lo introducimos en el gas mediante la corriente 10 y Apparatus 10.

Como el metano CH<sub>4</sub> no es formado en el gasificador modelo de Cycle Tempo, nosotros lo introduciremos como una corriente aparte, para que la composición sea lo más exacta posible a la hoja de características del equipo.

Apparatus statistics		Input data					
No.:	4	PIN		bar	XOUT		-
Name:	Sink/Source	POUT	1.013	bar	PIPE		-
		DELP		bar	ESTMAS		kg/s
		TIN		°C	LHV		kJ/kg
		TOUT	765	°C	SUBTYP		-
		DELT		°C	DTSUBC		°C
		DELE		kW	DTSUPH		°C
		DELM	0.0001249	kg/s	WFOT		-
		HIN		kJ/kg	ESTTIN		°C
		HOUT		kJ/kg	ESTTOU		°C
		DELH		kJ/kg	DELV		m3/s
		XIN		-	DELVN		nm3/s

Figura 4.10: Condiciones de entrada del metano.

Introducimos un caudal másico que suponga alrededor de un 2% del volumen de la corriente de Syngas.

Haciendo la simulación del programa obtenemos un gas en la corriente 4 de las siguientes características:

Compuesto	Composición molar %	Compuesto	Composición molar %
C (s)	3,53	Ar	0,51
H <sub>2</sub>	13,36	CO <sub>2</sub>	10,45
N <sub>2</sub>	43,07	CO	14,97
O <sub>2</sub>	-	CH <sub>4</sub>	2,23
SiO <sub>2</sub>	1,43	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-
H <sub>2</sub> O	10,32	H <sub>2</sub> S	0,12

Tabla 4.12: Composición volumétrica del gas a la salida del gasificador.

Flujo másico $\dot{m}$ (kg/h)	<b>87,048</b>
PCS (MJ/kg)	4,6229
<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>4,3057</b>

Tabla 4.13

### Proceso de limpieza/enfriamiento

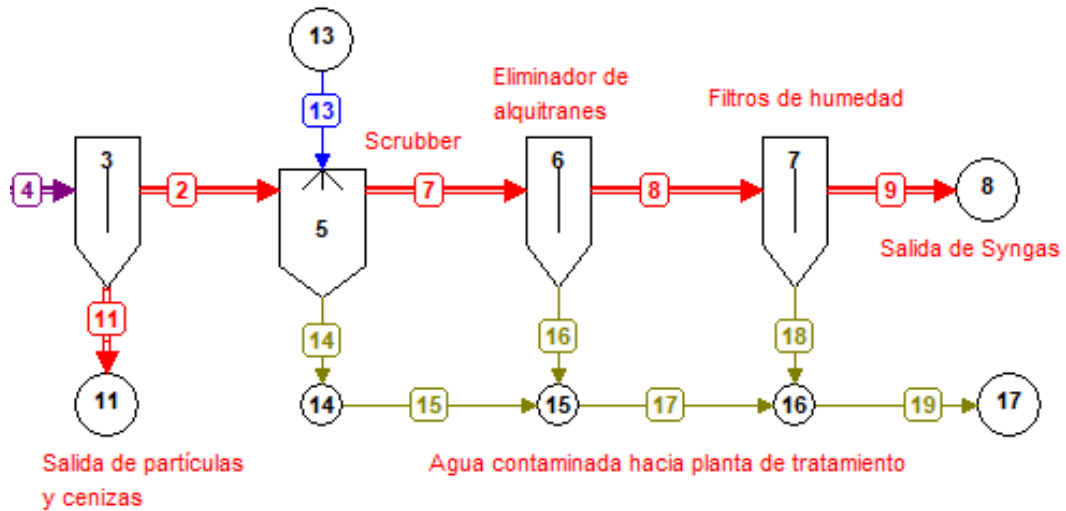


Figura 4.11: Esquema del módulo de limpieza y enfriado.

En esta serie de etapas, como se ha explicado anteriormente, se trata el gas salido del gasificado. Las etapas de las que consta nuestro modelo son, por orden de proceso: Ciclón, intercambiador de calor, scrubber, separador de alquitranes y filtro eliminador de humedad.



Figura 4.12: Filtros de finos y humedad del proyecto OLIVEN

Los flujos implicados en esta parte son los coloreados en **naranja**.

El gas producto ve reducida su temperatura hasta 763,59 °C, partiendo de la temperatura de reacción (850) y a la misma presión que hay en toda la instalación, que es la atmosférica. El flujo másico es 0,027 kg/s.

En primer lugar, el gas producto entra en el ciclón (Apparatus 3), el cual es un cilindro o cono donde el flujo gaseoso entra de forma tangencial, consiguiendo por rozamiento la eliminación de partículas sólidas contenidas en el gas, como cabrón y cenizas del proceso de gasificación. La pérdida de presión en el ciclón es estimada en 0,025 bares.

Las características que introducimos son las siguientes:

The dialog box 'Apparatus 3 Separator' contains the following input data fields:

Parameter	Value	Unit
PIN		bar
POUT5		bar
POUT6		bar
DELP5	-0.025	bar
DELP6	0	bar
TIN		°C
TOUT5		°C
TOUT6		°C
DELT5	-100	°C
DELT6	0	°C
DELE		kW
TEMDIF		°C

Additional input data buttons: Separate components, Bypass components.

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Clear, Help.

Figura 4.13: Especificaciones del ciclón.

Siendo DELP5 y DELP6 la diferencia de presión entre la entrada y las dos salidas. Tomamos una diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del gas en el flujo 2 de -100 °C, actuando de enfriador.

Tomaremos dos rendimientos para la eliminación de carbono sólido y cenizas que son ambos 95%.

The dialog box 'Apparatus 3 Separator' shows the 'Separation of non reacting components to ash outlet' section. It includes a table of components and their mass percentages:

Component	Mass %
C	95.00
SiO2	95.00

Component panel:

Al2O3(l)	C	C5F
Al2O3(s)	C2H2	C6F
Ar	C2H4	CCl
BCl3	C2H6	CH4
BF3	C3H8	Cl
Br2	C4H10	Cl2

Mole or mass percentage:  Mole %  Mass %

Average mass percentage:  mass %

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Clear, Help.

Figura 4.14: Especificaciones de separado del ciclón.

Compuesto	Composición másica (%)
C (s)	28,76
SiO <sub>2</sub>	71,24
Flujo másico (kg/h)	4,32

Tabla 4.14: Composición de la corriente de salida del ciclón (11).

El flujo saliente (2) sale a una temperatura de 663,21°C con un flujo másico de 0,026 kg/s.

La siguiente etapa es el Scrubber (Apparatus 5), que se encarga de enfriar el aire y eliminar el tar o alquitrán producido en la gasificación. No hay manera de unificar el proceso en Cycle Tempo, así que será dividido en dos subprocesos, el enfriamiento con una corriente de pulverización de agua y la separación del alquitrán en un separador (Apparatus 6).

Figura 4.15: Especificaciones del Scrubber.

La regulación de la salida de temperatura del gas se consigue modificando el caudal de agua en el flujo 13, que en nuestro caso es 0,00697 kg/s para que el gas baje hasta los 80 °C. En el eliminador de alquitranes eliminaremos un 95% del C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, el cual saldrá en el flujo 16. La última etapa del proceso de limpieza del gas son los filtros de humedad, los cuales reducen, con un rendimiento del 95%, toda la humedad; la producida por el proceso de gasificación y la adquirida en el Scrubber. Las pérdidas de carga en el Scrubber como en los filtros de humedad son de 0,025 bar.

The screenshot shows the 'Apparatus 7 Separator' dialog box. It has a title bar with a close button (X). The dialog is divided into several sections:

- Apparatus statistics:** Contains a 'No.' field with the value '7' and a 'Name' field with the value 'Separator'.
- Additional input data:** Contains two buttons: 'Separate components' and 'Bypass components'.
- Input data:** A table of input parameters:
 

PIN		bar
POUT5		bar
POUT6		bar
DELP5	-0.025	bar
DELP6	0	bar
TIN		°C
TOUT5		°C
TOUT6		°C
DELT5	-50	°C
DELT6	0	°C
DELE		kW
TEMDIF		°C

At the bottom, there are four buttons: 'OK' (with a green checkmark), 'Cancel' (with a red X), 'Clear' (with a trash icon), and 'Help' (with a question mark).

Figura 4.16: Especificaciones del filtro de humedad.

The screenshot shows the 'Apparatus 7 Separator' dialog box with the 'Separation of non reacting components to ash outlet' section active. It has a title bar with a close button (X). The dialog is divided into several sections:

- Apparatus statistics:** Contains a 'No.' field with the value '7' and a 'Name' field with the value 'Separator'.
- Additional input data:** Contains two buttons: 'Normal input data' and 'Bypass components'.
- Separation of non reacting components to ash outlet:**
  - A table with columns 'Component' and 'Mass %':
 

Component	Mass %
H2O	95.00
  - A 'Component panel' with a list of components: Al2O3(l), Al2O3(s), Ar, BCl3, BF3, Br2, C, C2H2, C2H4, C2H6, C3H8, C4H10, C5H, C6H, CCl4, CH4, Cl, Cl2.
  - A 'Mole or mass percentage' section with radio buttons for 'Mole %' and 'Mass %' (selected).
  - An 'Average mass percentage' field with a checkbox and a text input box.
  - A 'Delete' button below the component list.

At the bottom, there are four buttons: 'OK' (with a green checkmark), 'Cancel' (with a red X), 'Clear' (with a trash icon), and 'Help' (with a question mark).

Figura 4.17: Parámetro de separación del filtro de humedad.

Las corrientes de salida 14, 16 y 18 serán conducidas a una planta de tratamiento de aguas, para poder ser utilizada en los procesos del sistema, suponiendo un ahorro económico y medioambiental (Apparatus 17). Estas corrientes son llevadas a un depósito donde se produce el tratamiento y la eliminación de residuos y a una torre de refrigeración, para bajar la temperatura que adquiere en el scrubber.



Figura 4.18: Torre de refrigeración

El gas de la corriente 9 es finalmente el Syngas, sale a 25,01 °C y se utilizará para combustión en calderas, motores de combustión interna o turbinas de gas.

Compuesto	Composición volumétrica	Compuesto	Composición volumétrica
C (s)	0,20	Ar	0,58
H <sub>2</sub>	15,27	CO <sub>2</sub>	11,95
N <sub>2</sub>	49,25	CO	17,12
O <sub>2</sub>	-	CH <sub>4</sub>	2,55
SiO <sub>2</sub>	0,08	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-
H <sub>2</sub> O	2,85	H <sub>2</sub> S	0,14

Tabla 4.15: Composición final del syngas en la corriente 9.

<b><math>\dot{m}</math> (kg/h)</b>	<b>78,588</b>
PCS (MJ/kg)	4,5751
<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>4,2203</b>

*Tabla 4.16: Caudal másico, PCI y PCS del syngas.*

Justo a la salida del gas introduciremos un *blower* (*Apparatus 20*), que suplirá las pérdidas de potencia en el ciclón, el scrubber y el filtro de humedad para que entre al motor a presión atmosférica.



*Figura 4.19: Blower del proyecto OLIVEN*

Por último, vamos a obtener las potencias del sistema. Esto se realiza en el apartado *View; Energy and Exergy flows*. Nos aparecerá un listado de la energía en cada corriente, ya sea térmica o química.

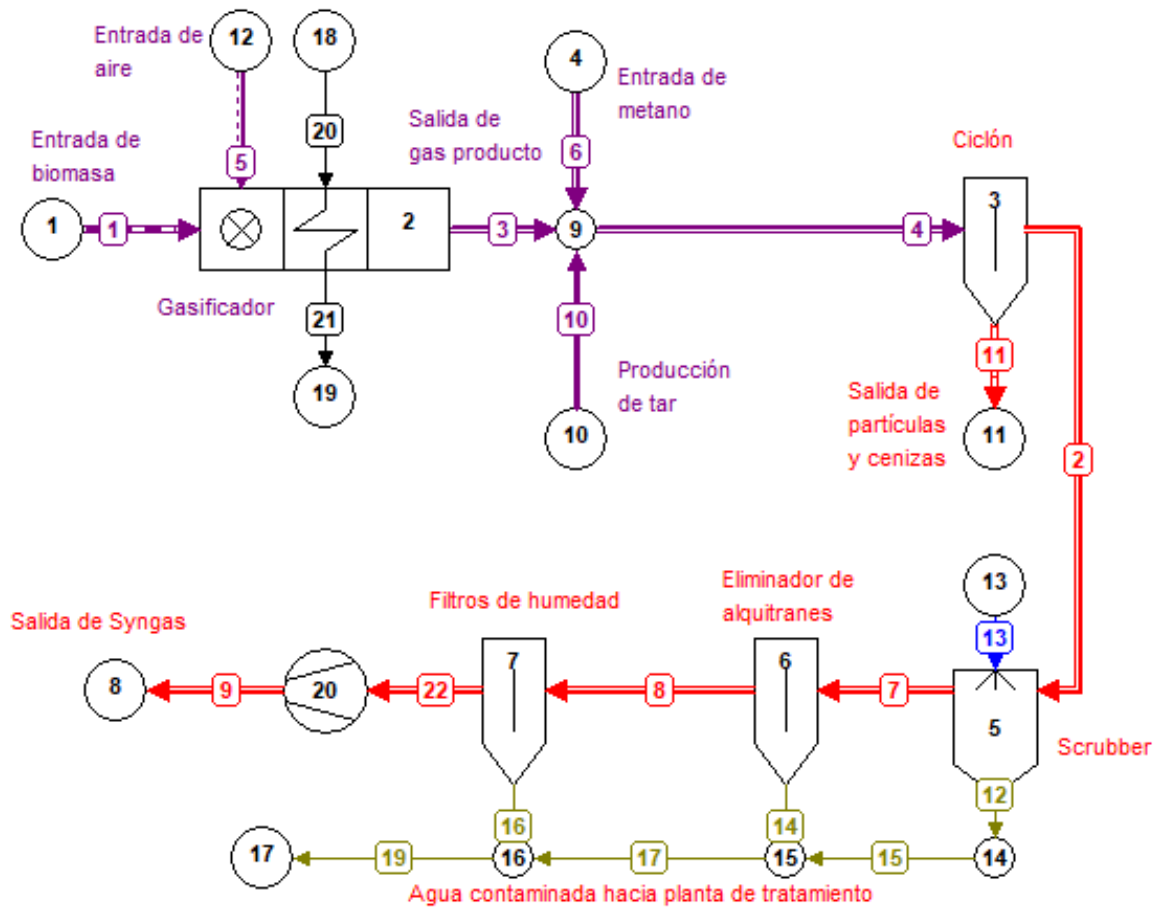


Figura 4.20: Esquema global del proceso en Cycle-Tempo.

## 5 Antecedentes

### 5.1 Legislación aplicable a la cogeneración

El RD 244/2019 se puede resumir en los siguientes puntos:

- Se tienen en cuenta tres modalidades de autoconsumo: 1. sin excedentes, 2. con excedentes acogidos a compensación y 3. con excedentes sin compensación.
- Reglamentación del autoconsumo colectivo.
- En instalaciones fotovoltaicas, la potencia instalada corresponde a la máxima del inversor.
- Se permitirá que el consumidor y el propietario de la instalación no sean el mismo.
- Simplificación de tramitación:
  - a) Las instalaciones sin excedentes o si tienen excedentes pero menos de 15 kW, no requieren de permisos.
  - b) Para instalaciones de hasta 100 kW en baja tensión, el contrato con la distribuidora se realizará por la misma empresa.
- En lo relacionado a los equipos de medida a instalar:
  - o Generalmente, hace falta solo un equipo de medida bidireccional en el punto frontera.
  - o En los autoconsumos colectivos, con excedentes sin compensación con varios contratos de suministro o tecnología no renovable contarán con 2 equipos.
  - o En casos puntuales, se permite que el contador de medida se ubique fuera del punto frontera.
- Establece el régimen económico. Estas serán las posibilidades según tipo de autoconsumo:
  - o Autoconsumo con excedentes con compensación: Pueden 1. vender la energía en el pool, o 2. compensar mensualmente excedentes.  
El importe compensado no debe superar el valor de energía consumida.
  - o Autoconsumo con excedentes sin compensación. Deben vender la energía sobrante.
- Inscripción automática en el Registro de Autoconsumo para ciertos casos.

#### *Modalidades de autoconsumo*

- Autoconsumo sin excedentes: se necesitará un mecanismo que impida la inyección de energía a red.

- Autoconsumo con excedentes: las que introducen energía en la red de transporte y distribución. Dos elementos: 1. Sujeto consumidor, 2. Sujeto productor. Se divide en dos clases:
  - a) Excedentes con compensación: si se cumplen varias condiciones entre ellas que sea energía renovable y de menos de 100 kW.
  - b) Excedentes sin compensación: si no se cumplen los requisitos del anterior apartado.

#### *Tipos de autoconsumidores*

##### *Autoconsumo individual*

- Posibilidad de acogerse a uno de los dos tipos de autoconsumo.
- Si el autoconsumo es mediante conexión a red, se considera con excedentes.

##### *Autoconsumo colectivo*

- Posibilidad de acogerse a uno de los dos tipos de autoconsumo.
- Si el autoconsumo es mediante res, se considera con excedentes.
- Todos los integrantes en una misma instalación, deben ser del mismo tipo de autoconsumo.
- Si es autoconsumo colectivo con venta de excedencia, el titular se considera consumidor respecto a los consumos auxiliares.

El consumidor y propietario pueden ser personas físicas o personas jurídicas.

#### *Régimen económico*

- a) En el autoconsumo, se pagará peaje de acceso correspondiente:
- b) Hay dos regímenes económicos:
  - Venta de energía a la red
  - Compensación simplificada de excedentes.

#### *Venta de energía a la red*

- a) Se podrán acoger todas las formas de autoconsumo. Es obligatorio para los que no estén acogidos a la compensación de excedentes.
- b) En este régimen, la energía horaria funciona como una instalación a red. Se tiene en cuenta el precio horario del pool.
- c) Los autoconsumidores operando en esta modalidad, se consideran productores, y cumplirán con lo establecido en la norma.

- d) La energía suministrada satisfará el peaje (0,5€/MWh) y su valoración económica tendrá un impuesto del 7 %.

## 5.2 Incentivos de la Junta de Andalucía al autoconsumo

El programa al que nos acogeremos será la actuación 22CS: A.4.2.c\_ Instalaciones singulares aisladas o conectadas avanzadas o con muy alto grado de autoconsumo:

Instalaciones de producción de energía eléctrica para autoconsumo, procedentes de fuentes renovables, y utilización de energía térmica y mecánica en un único proceso (cogeneración).

- Para instalaciones conectadas a red o aisladas, cuando no superen los 100 kW de potencia o si la instalación es de aprovechamiento de biomasa, no se superarán los 1000 kW.
- En el caso de cogeneración, se debe declarar un ahorro energético primario y una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera para la producción separada de calor y electricidad.
- No se contempla el uso de la electricidad producida para el bombeo de agua, excepto si es un servicio municipal de una población inferior a 20.000 habitantes.
- Las instalaciones incentivadas deben tener un sistema o sistemas de seguimiento de la energía producida y tener constancia de ello. No se incluyen instalaciones de mantenimiento o de sustitución.
- Se tienen en cuenta nuevas instalaciones y aquellas que su función sea sustituir a instalaciones convencionales no renovables.

Intensidades de incentivo:

<b>Generales</b>	Integración del edificio	Municipios <20.000	Uso de TIC	Programa NER300	Edificios locales	Rehabilitación de viviendas sociales
<b>45%</b>	45%	60%	45%	45%	80%	85%

*Tabla 5.1: Incentivos de la JA según instalación*

### 5.3 Análisis del consumo energético actual de la almazara

Los datos de partida para calcular el gasto producido por el consumo de energía eléctrica y térmica en la almazara tenidos en cuenta en este estudio son los siguientes:

La almazara se encuentra en funcionamiento los meses de la cosecha, de octubre a febrero, en turnos de 24 horas y dos paradas programadas al mes, de 24 horas cada una, para labores de mantenimiento de máquinas e instalaciones.

MES	Días producción	Horas producción
Octubre	29	696
Noviembre	28	672
Diciembre	29	696
Enero	29	696
Febrero	26	624
<b>TOTAL</b>	<b>141</b>	<b>3384</b>

*Tabla 5.2: Meses y horas de producción de la almazara*

La factura que adjunta la almazara con el consumo energético para la campaña 2018/2019 viene dada por la siguiente tabla:

MES	AÑO	kWh consumidos
Octubre	2018	21.657
Noviembre	2018	86.642
Diciembre	2018	360.217
Enero	2019	430.939
Febrero	2019	115.797
<b>TOTAL</b>		<b>1.015.252</b>

*Tabla 5.3: Consumo de energía de la planta*

Para calcular la potencia eléctrica suministrada por la compañía eléctrica, tendremos que dividir la energía que consume mensualmente entre las horas que tiene cada mes de la siguiente manera, debido a que no todos los meses se consume lo mismo:

MES	Horas producción	kWh consumidos	Potencia (kW)
Octubre	696	21.657	31,12
Noviembre	672	86.642	128,93
Diciembre	696	360.217	517,55
Enero	696	430.939	619,17
Febrero	624	115.797	185,57

Tabla 5.4: Potencia necesaria en los meses de producción

El proceso utilizado hasta ahora por la almazara para obtener agua caliente es mediante una caldera de hueso de aceituna, el cual viene determinado por los datos a continuación:

Parámetro	Datos del sistema
Consumo de biomasa	1,5 t/día
Días de funcionamiento/año	125
Rendimiento de caldera + intercambiador	80 %
PCI del hueso de aceituna	17.950 kJ/kg

Tabla 5.5: Características de la caldera de hueso de aceituna

La almazara nos da el consumo de hueso diario y los días al año que esta caldera es requerida, por lo que se obtiene la potencia térmica de la siguiente manera:

*Consumo anual de hueso = consumo diario x nº de días de funcionamiento*

$$\text{Consumo anual de hueso} = 1,5 \frac{t}{\text{día}} \times 125 \text{ días} = 187,5 \frac{t}{\text{año}}$$

*Potencia térmica teórica = consumo diario  $\left(\frac{kg}{s}\right)$  x PCI del hueso de aceituna*

$$\begin{aligned} \text{Potencia térmica teórica} &= 1,5 \frac{t}{\text{día}} \times 1000 \frac{kg}{t} \times \frac{\text{día}}{24 \text{ horas}} \times \frac{\text{hora}}{3600s} \times 17950 \frac{kJ}{kg} \\ &= 311,632 \text{ kW} \end{aligned}$$

*Potencia térmica real = Potencia térmica teórica x rendimiento caldera*

$$\text{Potencia térmica real} = 311,632 \text{ kW} \times 0,80 = 249,306 \text{ kW}$$

La almazara necesita un flujo de agua para el proceso de obtención del aceite aproximadamente de 40 °C, y la temperatura media para los meses de octubre a febrero en la provincia de Jaén es de 9,6 °C según CENSOLAR, por lo que el cálculo de caudal de agua será el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Potencia térmica real} &= P_{tr} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \\ \dot{m} &= \frac{P_{tr}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{249,306 \text{ kW}}{4,1813 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (40 - 9,6)^\circ\text{C}} = 1,9613 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 7,0607 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Características del Syngas

Una vez realizado el modelo de nuestra planta de gasificación mediante Cycle Tempo, ya explicada paso a paso en el apartado 4.2, procedemos al análisis de los tipos de biomasa estudiados en este TFG (pericarpio y cáscara de almendra, orujillo, hueso de dátil, poda de olivar y hueso de aceituna).

Para ello, como ya se realizó para la cascarilla de arroz, se introducen los resultados del análisis próximo y último de cada biomasa por la corriente de entrada 1, y creamos la hoja de datos en el programa.

Para cada biomasa necesitaremos una ratio aire-combustible ( $x_{OF}$ ) diferente, por lo que debemos variar este parámetro para conseguir la temperatura del gasificador estudiado que será de 850 °C. Dicha ratio depende fundamentalmente del poder calorífico de la muestra, siendo necesario menos aire cuanto mayor  $PCI$  tenga. Un uso mayor de aire lleva a su vez a una reducción del  $PCI$  del syngas, ya que el  $N_2$  y los demás gases inactivos en la combustión diluyen la energía por unidad de volumen. Para todos los casos la alimentación será de 30 kg/h.

A continuación, se dan los datos de los datos de  $x_{OF}$  y  $\phi_s$ , que es el caudal de agua del scrubber (L/h).

Compuesto	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$x_{OF}$	1,59	1.831	2,045	2,247	1,666	2,395
$\phi_s$	24,264	27,234	29,808	31,716	25,668	33,300

Tabla 6.1: Ratio aire combustible y caudal del Scrubber para cada muestra.

- (1) Pericarpio de almendra.
- (2) Poda de olivar.
- (3) Cáscara de almendra.
- (4) Orujillo.
- (5) Hueso de dátil.

Estos datos han sido obtenidos de manera experimental con el simulador, haciendo ensayos prueba y error modificando los dos parámetros.

Los datos de composición vienen dados en porcentaje volumétrico, caudal másico en kg/h, PCI y PCS en MJ/kg.

Compuesto	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
C (s)	0,21	0,19	0,18	0,16	0,19	0,16
H <sub>2</sub>	19,68	18,31	18,08	18,81	22,11	17,18
N <sub>2</sub>	42,92	44,95	46,61	47,65	41,24	49,66
O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	0,05	0,02	0,01	0,03	0,08	0,01
H <sub>2</sub> O	2,77	2,79	2,86	2,72	2,49	2,92
Ar	0,51	0,53	0,55	0,56	0,49	0,59
CO <sub>2</sub>	10,14	10,08	10,05	8,14	6,20	9,93
CO	21,10	20,71	19,42	19,85	24,57	17,51
H <sub>2</sub> S	0,01	0,01	-	0,02	0,22	0,01
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	-
CH <sub>4</sub>	2,63	2,40	2,23	2,06	2,41	2,03
<i>m</i>	71,748	79,956	86,148	91,764	74,556	95,724
PCS	5,8506	5,4694	5,2123	5,3844	6,8547	4,7640
<b>PCI</b>	<b>5,3927</b>	<b>5,0515</b>	<b>4,8060</b>	<b>4,9631</b>	<b>6,3307</b>	<b>4,3847</b>

Tabla 6.2: Composiciones, caudales másicos y poderes caloríficos para cada muestra.

- (1) Pericarpio de almendra.
- (2) Poda de olivar.
- (3) Cáscara de almendra.
- (4) Orujillo.
- (5) Hueso de dátil.
- (6) Hueso de aceituna.

## 6.2 Rendimientos del proceso de gasificación

### 6.2.1 Rendimiento del sistema según temperatura de reacción

Mediante las fórmulas del rendimiento en frío (8) y rendimiento en caliente (9) mencionadas en el apartado 4.3.3, hacemos el cálculo para distintas temperaturas de

reacción en el gasificador, en el rango de 700-1000 °C. Dicha temperatura varía, como se ha explicado con anterioridad, con el flujo de entrada del oxidante (aire en nuestro caso) y con la temperatura del mismo.

$$\eta_{g,hot} = \frac{PCI_g \cdot \dot{m}_g + c_{p,g} \cdot \dot{m}_g \cdot (T_g - T_0)}{PCI_b \cdot \dot{m}_b}$$

$$\eta_{g,cold} = \frac{PCI_g \cdot \dot{m}_g}{PCI_b \cdot \dot{m}_b}$$

$$Potencia\ de\ salida = P_g = PCI_g \cdot \dot{m}_g \quad (19)$$

$$Potencia\ total\ (t\acute{e}rmica + salida) = P_t = PCI_g \cdot \dot{m}_g + c_{p,g} \cdot \dot{m}_g \cdot (T_g - T_0) \quad (20)$$

$$Potencia\ biomasa = P_b = PCI_b \cdot \dot{m}_b \quad (21)$$

Los datos obtenidos son los siguientes:

- Cáscara de almendra ( $P_b = 156,35\ kW$ ):

T (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
700	149,41	134,11	95,561	85,776
800	149,43	128,66	95,574	82,290
900	149,45	123,07	95,587	78,714
1000	149,48	116,62	95,606	74,589

Tabla 6.3: Potencias y rendimientos para la cáscara de almendra.

- Pellet de orujillo ( $P_b = 170,94\ kW$ ):

T (°C)	$P_t$ (kW)	$P_g$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
700	163,32	147,00	95,542	85,995
800	163,34	141,43	95,554	82,737
900	163,37	135,47	95,572	79,250
1000	163,39	128,65	95,583	75,260

Tabla 6.4: Potencias y rendimientos para el pellet de orujillo.

- Poda de olivar ( $P_b = 150,19 \text{ kW}$ ):

T (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
700	143,49	130,15	95,539	86,657
800	143,51	125,22	95,552	83,374
900	143,53	119,9	95,566	79,832
1000	143,55	113,85	95,579	75,804

Tabla 6.5: Potencias y rendimientos para la poda de olivar.

- Pericarpio de almendra ( $P_b = 142,51 \text{ kW}$ ):

T (°C)	$P_t$ (kW)	$P_g$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
700	136,15	124,65	95,537	87,468
800	136,17	120,03	95,551	84,226
900	136,19	115,02	95,565	80,710
1000	136,21	109,48	95,579	76,823

Tabla 6.6: Potencias y rendimientos para el pericarpio de almendra.

- Hueso de dátil ( $P_b = 169,2 \text{ kW}$ ):

T (°C)	$P_t$ (kW)	$P_g$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
700	161,53	149,85	95,467	88,564
800	161,55	145,4	95,479	85,934
900	161,57	140,39	95,491	82,973
1000	161,58	134,99	95,496	79,781

Tabla 6.7: Potencias y rendimientos para el hueso de dátil.

- Hueso de aceituna ( $P_b = 162,49 \text{ kW}$ ):

T (°C)	$P_t$ (kW)	$P_g$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
700	155,31	137,34	95,581	84,522
800	155,35	131,57	95,606	80,971
900	155,38	125,29	95,624	77,106
1000	155,41	117,95	95,643	72,589

Tabla 6.8: Potencias y rendimientos del hueso de aceituna.

Se observa que la tendencia es negativa con el aumento de temperatura para el rendimiento en frío, esto se debe fundamentalmente a que el *PCI* del gas disminuye con el aumento del caudal másico del aire que entra en el gasificador. Este aire contiene sustancias como el  $N_2$  o el  $CO_2$  que son inertes al proceso de combustión. Para la biomasa con menor *PCI* ocurre el mismo fenómeno.

Otros factores que influyen en el rendimiento son la presencia de humedad en la biomasa o la utilización de elementos como intercambiadores.

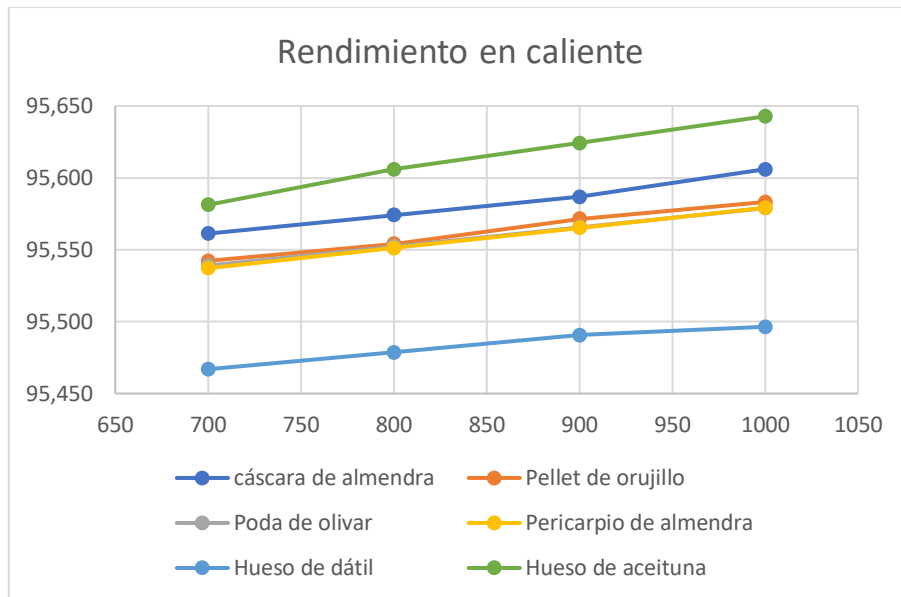


Figura 6.1: Rendimientos "hot" de las muestras.

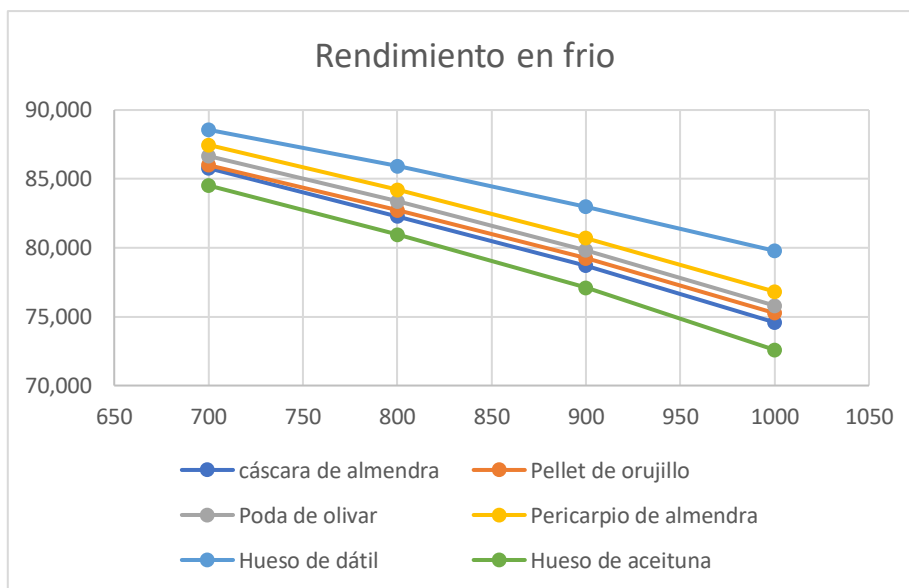


Figura 6.2: Rendimientos "cold" de las muestras.

### 6.2.2 Rendimiento del sistema según temperatura de intercambiador

En este caso estudiamos el sistema con un intercambiador de calor, el cual tiene la ventaja de aumentar el rendimiento del sistema global. Esto lo consigue precalentando el aire de gasificación, por lo que la temperatura de proceso se alcanza más fácilmente, necesitando menor cantidad de oxidante. El intercambiador será colocado en el sistema de la siguiente manera:

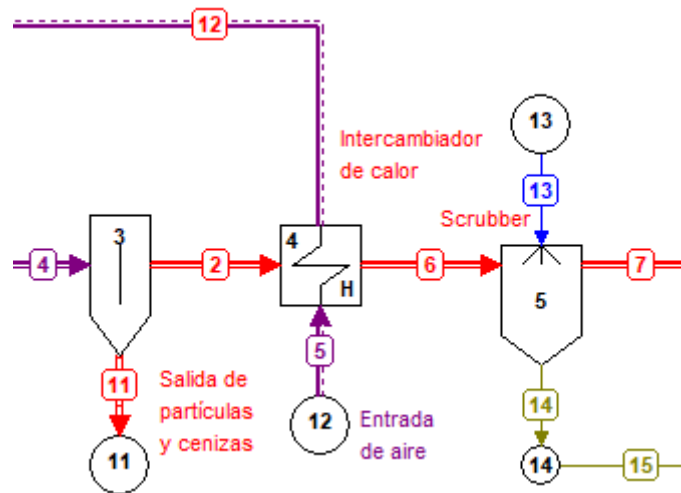


Figura 6.3: Localización del intercambiador en el modelado de Cycle-Tempo.

Esta disposición se debe a que aprovechará la corriente de gas a alta temperatura, pero con las cenizas y partículas extraídas para evitar corrosión y desgaste de las tuberías y placas del intercambiador.

Ya que el aire de entrada está a 25 °C, el intercambiador aportará para cada caso 0, 25, 75, 125 y 175 °C. Se supone un rendimiento del 90% en todas las configuraciones de intercambiador.

La diferencia con el apartado anterior es que la temperatura de reacción no varía, sino que es fijada en 820 °C. Los datos obtenidos para cada temperatura del aire de entrada ( $T_e$ ) son los siguientes:

- Cáscara de almendra (820 °C):

$T_e$ (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
25	108,84	149,92	95,887	82,072
50	109,33	150,33	96,150	82,386
100	110,34	151,13	96,661	83,032
150	111,27	151,91	97,160	83,626
200	112,22	152,67	97,646	84,234

Tabla 6.8: Rendimientos con intercambiador de la cáscara de almendra.

- Pellet de Orujillo (T= 820 °C):

$T_e$ (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
25	120,78	163,35	95,56	82,052
50	121,39	164,08	95,99	82,409
100	122,41	164,7	96,35	83,006
150	123,52	165,56	96,85	83,655
200	124,57	166,41	97,35	84,269

Tabla 6.9: Rendimientos con intercambiador del pellet de orujillo.

- Poda de olivar (T= 820 °C):

$T_e$ (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
25	105,29	143,99	95,872	83,075
50	105,75	144,36	96,118	83,381
100	106,68	145,08	96,598	84,000
150	107,46	145,78	97,064	84,520
200	108,32	146,46	97,516	85,092

Tabla 6.10: Rendimientos con intercambiador de la poda de olivar.

- Pericarpio de almendra (T= 820 °C):

$T_e$ (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
25	99,61	136,18	95,56	83,566
50	100,01	136,5	95,78	83,847
100	100,73	137,13	96,22	84,352
150	101,48	137,74	96,65	84,878
200	102,22	138,33	97,07	85,398

Tabla 6.11: Rendimientos con intercambiador del pericarpio de almendra.

- Hueso de dátil (T= 820 °C):

$T_e$ (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
25	124,97	161,55	95,48	85,372
50	125,36	161,89	95,68	85,603
100	126,13	162,55	96,07	86,058
150	126,9	163,19	96,45	86,513
200	127,64	163,82	96,82	86,950

Tabla 6.12: Rendimientos con intercambiador del hueso de dátil.

- Hueso de aceituna (T=820 °C):

$T_e$ (°C)	$P_g$ (kW)	$P_t$ (kW)	$\eta_{g,hot}$	$\eta_{g,cold}$
25	112,21	156,36	96,227	81,045
50	112,79	156,83	96,517	81,402
100	114,05	157,76	97,089	82,177
150	115,28	158,67	97,649	82,934
200	116,57	159,54	98,185	83,728

Tabla 6.13: Rendimientos con intercambiador del hueso de aceituna

Se observa que la tendencia en aumento de temperatura adquirida en el intercambiador es proporcional al rendimiento, ya que, además de reducir el aire de entrada necesario para alcanzar la temperatura (820 °C), hace necesario un menor caudal de agua en el scrubber, lo que supone menores costes de instalación y bombeo.

Al igual que en apartado anterior, se ve una clara correlación entre el *PCI* y el rendimiento, siendo mayor la del hueso de dátil y menor la de la cáscara de almendra de nuevo. A continuación, se ilustran los comportamientos en cada caso:

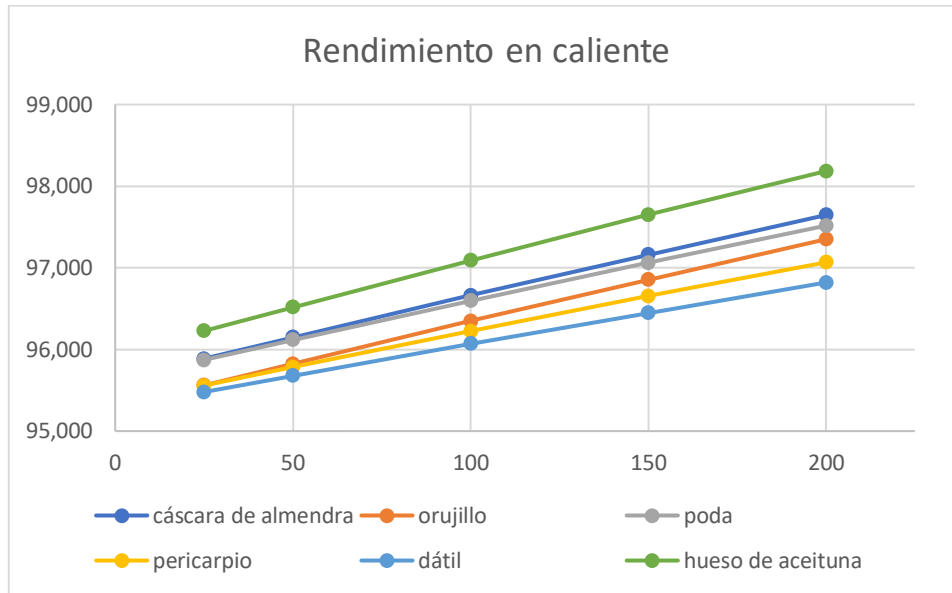


Figura 6.4: Rendimientos "hot" con los intercambiadores para las muestras.

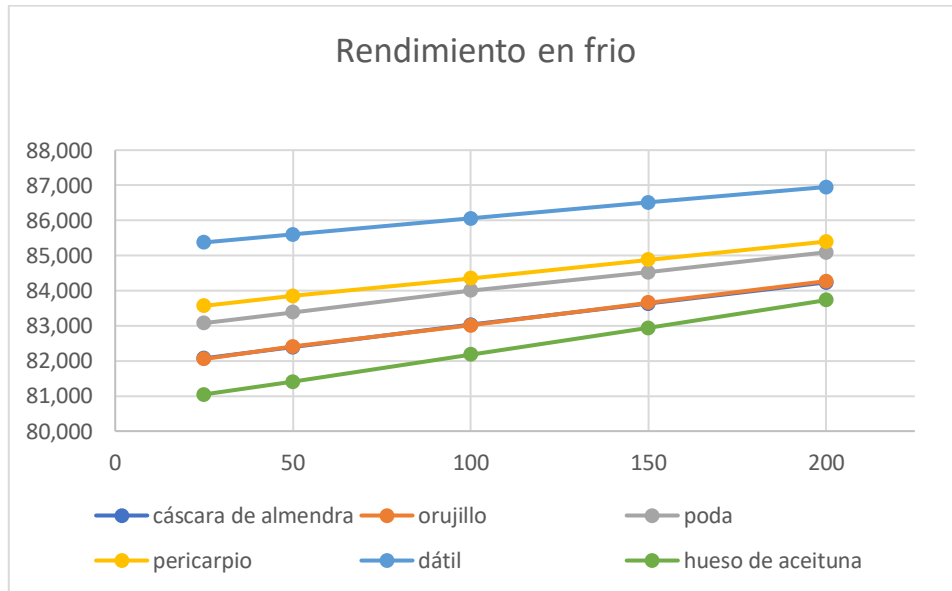


Figura 6.5: Rendimientos "cold" con los intercambiadores para las muestras.

## 6.3 Estudio tecno-económico del gasificador en una almazara

### 6.3.1 Introducción y consideraciones de la instalación

En este apartado estudiamos una planta de cogeneración alimentada por syngas producido en un gasificador de características similares al estudiado anteriormente, calcularemos la alimentación, los flujos de energía producidos, el coste y la amortización de los equipos aplicando la instalación a una empresa productora de aceite de oliva en la provincia de Jaén.

La materia prima que utilizaremos en este estudio será pellet de orujillo, hueso de aceituna y poda de olivar, ya que es una materia prima muy frecuente en Jaén y a fácil alcance de las almazaras, ya que suelen estar integradas o cerca de las plantas extractoras de aceite de orujo.

Para la instalación tendremos las siguientes consideraciones:

- El sistema de cogeneración será de 250 kW<sub>e</sub>.
- La legislación vigente para el estudio será el Real Decreto 5 de abril, 2019 (Autoconsumo).
- Los datos utilizados para los cálculos serán los obtenidos con nuestro modelo de simulación con Cycle-Tempo para el pellet de orujillo, el hueso de aceituna y la poda de olivar.
- El coste de la instalación se estima en 700.000 €, el cual se afrontará mediante crédito bancario.

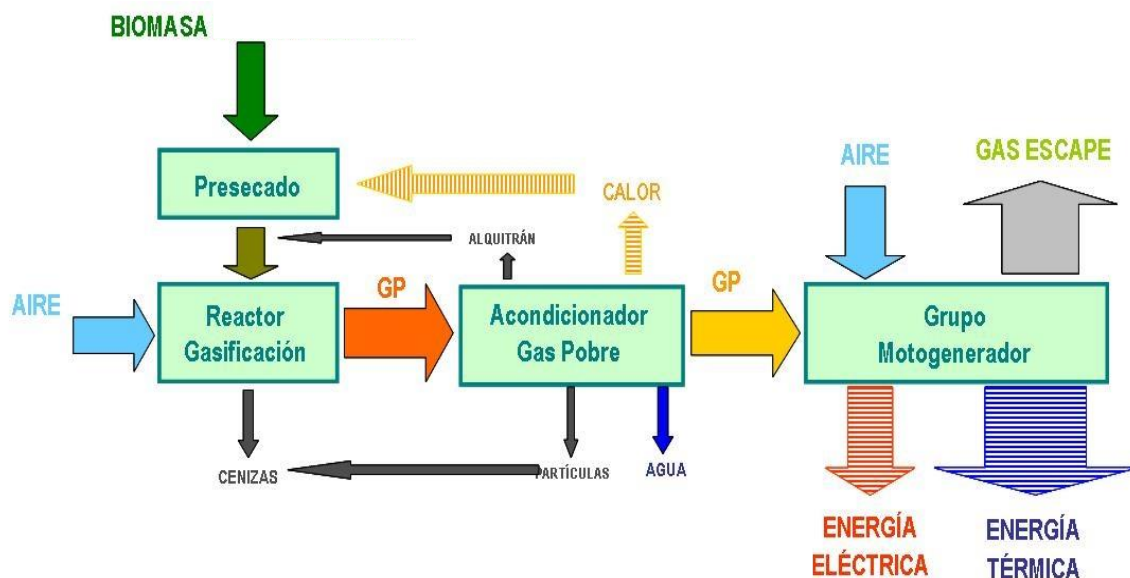


Figura 6.6: Esquema de la instalación de cogeneración

### 6.3.2 Estudio técnico de la cogeneración

En este estudio vamos a tener presente la instalación de los siguientes equipos:

- Reactor de gasificación alimentado con hueso de aceituna, poda de olivar y pellet de orujillo.
- Equipos de limpieza, purificación y enfriamiento del gas de síntesis.
- Motor generador de gas.
- Sistema CHP para el aprovechamiento de calor residual y de refrigeración del motor.

Se calculará para el caso de nuestra almazara la cantidad de biomasa que debemos alimentar al gasificador, la cantidad de agua que este necesitará para el tratamiento del gas y las pérdidas producidas. Las características del equipo de cogeneración que vamos a utilizar para la cogeneración son las siguientes:

Parámetro de operación	Datos del sistema
Modelo del motor	Cummins GTA 855E
Modelo del grupo generador	C250N6
Potencia eléctrica activa a 60 Hz	250 kW
Potencia eléctrica aparente (FP=0,8) 60 Hz	321 kVa
Regulación de frecuencia	Isócrono
Corriente de arranque	900 A (0°C)
Rendimiento eléctrico con syngas	19,5 %
Ratio aire combustible del motor	1,6 kg/kg
Cilindrada del motor	14 L
Número de cilindros	6 en línea
Frecuencia máxima del motor	2100 rpm
Consumo de combustible a plena carga (con gas natural)	94,66 m <sup>3</sup> /h

Tabla 6.13: Características del sistema de cogeneración

Los datos de la ratio de aire/combustible y del rendimiento eléctrico del motor utilizando syngas como combustible han sido obtenidos del artículo (Vera, 2010).



Figura 6.7: Motor Cummins aplicado a la cogeneración

Para calcular la cantidad de gas de síntesis que tiene que entrar al motor para producir 250 kW eléctricos y la biomasa alimentada al gasificador, utilizaremos los rendimientos obtenidos del proceso de gasificación más el proceso de tratamiento del gas, para una temperatura de reacción de 820 °C y la configuración de intercambiador de calor de 200 °C de entrada al gasificador del apartado 6.2.2 de este estudio y el PCI de los tres tipos de biomasa antes mencionados.

Biomasa	PCI biomasa (kJ/kg)	Rendimiento <i>cold</i>
Poda de olivar	16.700	85,092
Pellet de orujillo	19.020	84,269
Hueso de aceituna	17.950	83,728

Tabla 6.14: Características de gasificación de las biomásas

$$\text{Potencia del syngas} = P_s = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{250 \text{ kW}}{0,195} = 1282,05 \text{ kW}$$

$$\text{Potencia biomasa} = P_b = \frac{P_s}{\eta_{\text{cold}}}$$

$$\text{Consumo biomasa} = \dot{m} = \frac{P_b}{\text{PCI}}$$

Biomasa	Potencia biomasa (kW)	Consumo (kg/s)	Consumo (kg/h)	Consumo anual (t)
Poda de olivar	1506,66	0,090219	324,789	<b>1099,086</b>
Pellet de orujillo	1521,38	0,079988	287,958	<b>974,450</b>

Hueso de aceituna	1531,21	0,085304	307,095	<b>1039,209</b>
-------------------	---------	----------	---------	-----------------

Tabla 6.15: Consumo anual según biomasa utilizada

Para suplir las necesidades de agua caliente de la almazara para la obtención del aceite, que es de 249,306 kW<sub>t</sub>, se utilizará un equipo de recuperación del calor residual del motor mediante los gases de escape y con el circuito de refrigeración. Se trata de un sistema CHP el cual funciona de la siguiente manera:

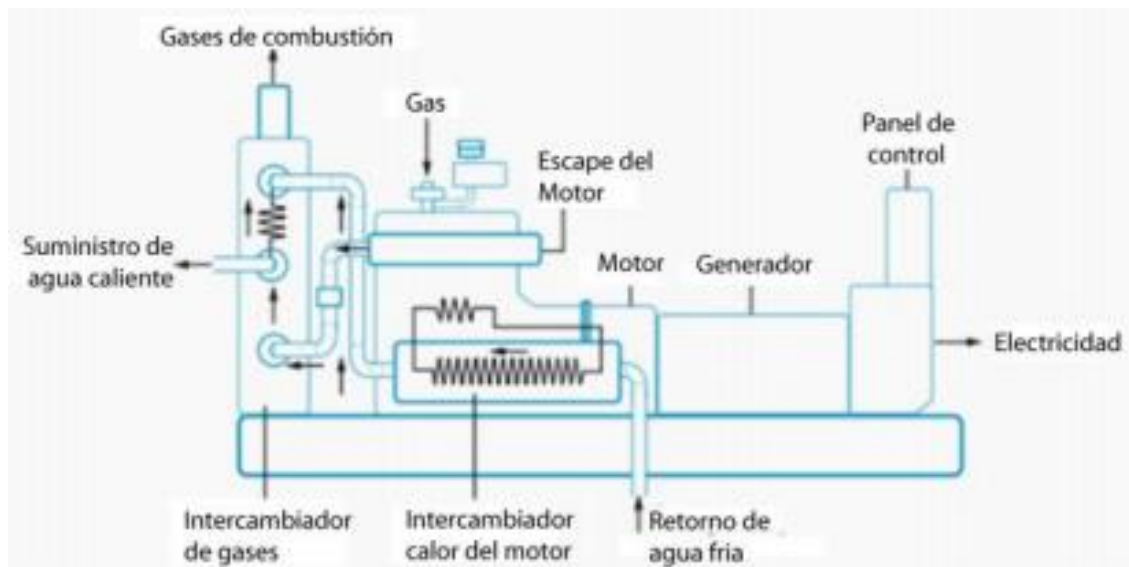


Figura 6.8: Esquema del sistema CHP

La hoja de características del sistema es la siguiente:

Parte del sistema	Descripción	Datos
Sistema de refrigeración	Potencia obtenida	184 kW
	T <sup>a</sup> entrada del agua	78 °C
	T <sup>a</sup> salida del agua	88 °C
	Caudal de agua	15,8 m <sup>3</sup> /h
Gases de escape	Potencia obtenida	163 kW
	T <sup>a</sup> gas entrada	505 °C
	T <sup>a</sup> gas salida	150 °C
Sistema CHP total	Potencia obtenida	347 kW
	T <sup>a</sup> de agua entrante	53 °C

	Tª de agua saliente	80 °C
	Caudal de agua	11 m³/h

Tabla 6.16: Características del sistema de producción de agua caliente

Partiendo de estas características, calcularemos el caudal disponible que nos podrá aportar el equipo de cogeneración con la potencia de la que dispone ( $P_{CHP}$ ) de la misma manera que se calculó en el apartado 5.3 de este proyecto para la caldera de hueso de aceituna.

$$\dot{m} = \frac{P_{CHP}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{347 \text{ kW}}{4,1813 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (40 - 9,6^\circ\text{C})} = 2,7299 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 9,8276 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

El caudal necesario es, como se vio en el apartado 5.3, de 7,0607 m³/h a 40°C, por lo que el sistema de captación de calor sería suficiente para la demanda térmica que tiene la planta (249,306 kW).

#### Rendimiento energético de la instalación

En el cálculo del rendimiento global de la instalación, se obtiene el aprovechamiento de la energía primaria entrante en forma de biomasa, la cual es transformada en energía eléctrica mediante el moto-generador de 250 kW<sub>e</sub> y en energía térmica en el sistema CHP de aprovechamiento de calor residual del motor de combustión interna. La fórmula para calcular el rendimiento CHP y el global es la siguiente:

$$\eta_{CHP} = \frac{P_e + P_{t,r}}{P_s}$$

$$\eta_t = \frac{P_e + P_{t,r}}{P_b}$$

Símbolo	Descripción	Poda olivar	Pellet de Orujillo	Hueso de aceituna
$P_b$	Potencia de biomasa (kW)	1506,66	1521,38	1531,21
$\eta_{cold}$	Rendimiento "cold" (%)	85,092	84,269	83,728
$P_s$	Potencia de syngas (kW)	1282,05	1282,05	1282,05
$\eta_e$	Rendimiento eléctrico (%)	19,5	19,5	19,5

$P_e$	Potencia eléctrica (kW)	250	250	250
$P_{t,r}$	Potencia térmica real (kW)	249,306	249,306	249,306
$\eta_{CHP}$	<b>Rendimiento CHP (%)</b>	<b>38,946</b>		
$\eta_t$	<b>Rendimiento global (%)</b>	<b>33,140</b>	<b>32,819</b>	<b>32,609</b>

Tabla 6.17: Rendimientos implicados en la cogeneración y gasificación

### 6.3.3 Balance económico de la instalación

Mediante el análisis económico de la planta se determinará el coste que tiene la empresa en energía de la forma convencional, mediante conexión a red y con hueso de aceituna como combustible, y usando cogeneración. Se tendrán en cuenta tarifas reales obtenidas de la web de la compañía eléctrica Endesa y de la Red Eléctrica de España.

El estudio se dividirá en cálculo de costes asociados al consumo eléctrico, el coste anual en hueso de aceituna para la caldera, el balance de consumo eléctrico de la cogeneración teniendo en cuenta la compra-venta de kWh producidos y consumidos y una comparación entre ambos sistemas en término de amortización de la instalación.

#### Costes de la almazara sin cogeneración

La empresa de referencia para el cálculo del coste de la electricidad es Endesa, y la tarifa será la Tempo Open 3.1A, para empresas con una necesidad de más de 100 kW, cuyos precios (precio unitario por potencia instalada mensual y precio por kWh consumido) vienen reflejados en la Tabla 4.18. Se considera una potencia instalada de 650 kW:

Término	Periodo	Precio
Término de potencia €/kW y año	Punta	59,475288
	Llano	36,676813
	Valle	8,410411
	<b>Media</b>	<b>34,854171</b>
Término de energía €/kWh	Punta	0,105386
	Llano	0,098599
	Valle	0,073071
	<b>Media</b>	<b>0,092352</b>

Tabla 6.18: Desglose de los costes de consumo de energía eléctrica

Teniendo en cuenta el impuesto a la electricidad (5,113 %) y el IVA (21%) el gasto total anual en electricidad que le supondría a la empresa viene reflejado en la siguiente tabla:

COSTE DE CONSUMO ELÉCTRICO ANUAL DE ALTA TENSIÓN			
	Facturación anual	Precio unitario €	TOTAL €
Consumo eléctrico	1.015.252 kWh	0,092352	93.760,55
Término de potencia	650 kW	34,854171	22.655,21
Impuesto eléctrico			5.952,34
IVA (21%)			24.447,31
<b>TOTAL</b>			<b>146.815,41</b>

Para la producción de agua caliente, la almazara utiliza una caldera de hueso de aceituna, el cual es un subproducto del aceite de oliva, con lo cual no se supone un coste económico a la empresa.

COSTES TOTALES DE LA ALMAZARA SIN COGENERACIÓN	
Coste electricidad	146.815,41 €
Coste de hueso	0 €
<b>TOTAL</b>	<b>146.815,41 €</b>

#### *Costes de la almazara con cogeneración*

La planta de cogeneración va a producir una energía que no será utilizada por completo en la campaña, por lo que desde el Real Decreto 244/2019 destinado al autoconsumo, es posible verter a la red el excedente a un precio fijado por las compañías eléctricas. Se calcula mediante la potencia del gasificador la energía que se produce al año, que se comparará con la energía que consume la almazara de la red eléctrica y se obtiene la diferencia, que será vendida a un precio de 0,05 €/kWh, según la Red Eléctrica de España. Se realizará un balance económico mensual, vendiendo la energía excedente a dicho precio y comprando la energía a 0,092352 €/kWh, como marca la tarifa.

Descripción	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Consumo mensual kWh	21.657	86.642	360.217	430.939	115.797
P. gasificador kW	250	250	250	250	250
Energía gasificador kWh/mes	174.000	168.000	174.000	174.000	156.000
Energía vendida kWh	152.343	81.358	-	-	40.203
Beneficio de venta €	7.617,15	4.067,90	-	-	2.010,15
kWh de red	-	-	186.000	256.939	-
Coste de consumo €	-	-	17.177,47	23.728,83	-
Balance económico	+7.617,15	+4.067,90	-17.177,47	-23.728,83	+2.010,15

Tabla 6.19: Gasto mensual de electricidad con el sistema de cogeneración

COSTE DE CONSUMO ELÉCTRICO ANUAL DE ALTA TENSIÓN CON CHP			
	Facturación anual	Precio unitario €	TOTAL €
Consumo de red	442.939 kWh	0,092352	40.906,30
Venta a red	273.904 kWh	0,05	-13.695,20
Término de potencia	650 kW	34,854171	22.655,21
Impuesto eléctrico			2.549,66
IVA (21%)			10.471,93
<b>TOTAL</b>			<b>62.887,90</b>

Para calcular el coste de la biomasa (poda y pellet de orujillo) tendremos en cuenta los precios que aparecen en IDAE, para cada biomasa, y actualizado al primer trimestre de 2020.

COSTE DE LA BIOMASA ANUAL			
	Poda de olivar	Pellet de orujillo	Hueso de aceituna
Consumo anual (ton)	1099,086	974,086	1039,209
Precio unitario €/ton	65	17,50	0
Precio Total €	71.440,59	17.046,51	0
IVA (21%)	15.002,52	3.579,77	0
<b>Precio Final</b>	<b>86.443,11</b>	<b>20.626,28</b>	<b>0</b>

COSTES DE OPERACIÓN	
Mantenimiento de la central	3.810 €
Suministros y materiales	420 €
<b>TOTAL</b>	<b>4.230 €</b>

COSTES TOTALES DE LA ALMAZARA CON COGENERACIÓN	
Costes de electricidad	62.887,90 €
Coste de biomasa	
Poda de olivar	86.443,11 €
Pellet de orujillo	20.626,28 €
Hueso de aceituna	0 €
Costes de operación	4.230 €
<b>TOTAL, poda</b>	<b>153.561,01 €</b>
<b>TOTAL, pellet</b>	<b>87.744,18 €</b>
<b>TOTAL, Hueso</b>	<b>67.117,90 €</b>

#### 6.3.4 Cálculo de la amortización

En este subapartado se analizará, en base a los cálculos realizados anteriormente del consumo de materias primas y electricidad de la almazara con y sin la central de gasificación y cogeneración, en cuantos años podría la central amortizarse teniendo en cuenta el ahorro anual que supone. Para hacer un análisis lo más realista posible se tendrán en cuenta los costes generados por el préstamo, la subvención de la que dispone

la almazara por mejora energética, y la suposición de la tendencia del precio de la electricidad y la biomasa en los futuros años.

La inversión inicial viene determinada por los siguientes conceptos:

COSTES DE INVERSIÓN INICIAL	
Almacenamiento y tratamiento de biomasa	72.000 €
Reactor gasificador	172.000 €
Limpieza y acondicionamiento	177.000 €
Sistemas auxiliares y mano de obra	204.000 €
Subsistema del producto final	75.000 €
TOTAL	700.000 €
Subvención J.A. (22CS: A.4.2.c)	45 %
TOTAL, con subvención	385.000 €

COSTES SIMULADOS DE PRÉSTAMO BANCARIO	
Años a pagar el préstamo	10
Cuota de préstamo anual	43,989,62 €
Cuota de intereses anual	1.072,92 €
TAE	2,62 %
TIN anual	2,50 %
Coste total	57.196,24 €
Comisiones	2.300
Intereses	54.896,24 €
Capital	385.000 €
TOTAL PAGOS	442.196,24 €

Para el calculo de la amortización supondremos una variación al alza del precio de la energía eléctrica del 5 % anual, y una disminución del 2% anual de la biomasa.

AMORTIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN	
Costes sin CHP	146.815,41 €
Costes con CHP	
Poda de olivar	153.561,01 €
Pellet de orujillo	87.744,18 €
Hueso de aceituna	67.117,90 €
Coste total inversión	442.196,24 €
Periodo de amortización	
Poda de olivar	Proyecto no viable
Pellet de orujillo	7 años
Hueso de aceituna	6 años

## 7 CONCLUSIONES

Ya se han mencionado con anterioridad las ventajas que conlleva la gasificación; es una tecnología con mucha proyección de futuro, sobre todo en la zona en la que nos encontramos, con una gran cantidad de actividad agrícola y forestal, de las que no aprovechamos todo el potencial que podríamos desarrollando técnica y logísticamente la utilización de la biomasa, ya que en España se generan millones de toneladas de biomasa al año, que en gran medida son desechadas o quemadas.

En primer lugar, haremos un análisis comparativo entre la cogeneración por gasificación y el sistema eléctrico tradicional. En España la producción de energía se basa en un mix eléctrico, el cual junta todas las formas de generación de energía disponibles y las simplifica para poder conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por unidad de energía consumida. Para 2019, el mix de la red eléctrica peninsular se estima en 241 gramos de CO<sub>2</sub> por kWh. En el caso de nuestra almazara, la cual tiene un consumo anual de 1.025.662 kWh, la emisión de dióxido de carbono asciende a 247,18 toneladas al año. Estas emisiones son producidas en gran medida por centrales que utilizan combustibles fósiles como diésel, carbón o gas. En el caso de la gasificación, este porcentaje de CO<sub>2</sub> es nulo, ya que ha sido absorbido por la fotosíntesis de las plantas de manera previa.

El sistema energético en España se basa en la generación centralizada, es decir, que hay centrales de generación de gran potencia, distribuidas por el territorio, las cuales están conectadas con los núcleos de consumo mediante líneas de gran longitud, lo que supone un coste elevado de instalación y pérdidas. En el caso de la cogeneración estas pérdidas son eliminadas, ya que esta energía se consume justo en el lugar donde se genera, ocurriendo lo mismo con las instalaciones fotovoltaicas, minieólica o minihidráulica. Este sistema más eficiente y limpio se llama generación distribuida.

En segundo lugar, hablar del aspecto socio-económico. El desarrollo de la generación distribuida como la cogeneración por gasificación, supone una posición privilegiada a un territorio, ya que disminuye los costes de producción por el menor coste de energía, y haciendo los productos más competitivos en el mercado, sobre todo hoy en día con la introducción de países del norte de África en el mercado del aceite de oliva. Esto mismo se puede extrapolar a cualquier tipo de empresa.

La generación distribuida también conlleva una mayor complejidad logística, ya que hace falta más mano de obra para las instalaciones, almacenes para abastecimiento de materias primas, y una red de transporte que pueda satisfacer la demanda.

Todos estos motivos son suficientes para hacer un proyecto como la gasificación en la almazara muy viable, ya que no existen inconvenientes reales como hemos podido

observar, más que la inversión inicial y la voluntad de cambio de sistema productivo que existe actualmente en nuestro país.

Respecto a la industria del aceite de oliva, está pasando por un momento delicado en nuestro país debido al auge de producción en países en vías de desarrollo, como el norte de África y oriente próximo, donde a pesar de contar con menor tecnología y peores infraestructuras, son capaces de producir aceite a un precio inferior del que producimos aquí. Por eso es una necesidad renovarse y mejorar todo el proceso desde la recogida hasta la venta, y por ello la gasificación es una buena opción, ya que además de reducir los costes como ya se ha estudiado, reduciría la huella de carbono de la producción del aceite de oliva, lo que se traduce en una mejor imagen en el mercado internacional.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- IDAE, 2007. Energía de la biomasa. *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*, octubre 2007, pp. 5-7. Madrid. ISBN: 97-8-84-96680-15-9.
- IDAE 2018. Biomasa: Un recurso para todos. *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*. Mayo 2018. Informe 027.
- SEE, 2018. Avance Sistema Eléctrico Español 2018. *Red Eléctrica de España*, enero 2019, pp. 15-16.
- PRODUCCIÓN OLIVAR. *Esencia de Olivo, zonas productoras en España*. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.esenciadeolivo.es/aceite-de-oliva/aceite-de-oliva-en-espana/zonas-productoras-en-espana/>
- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO. *Evaluación de la producción y usos de los subproductos de las agroindustrias del olivar en Andalucía*. Mayo, 2015. Versión 1, pp. 14-5, 18-19.
- ORUJILLO, ORUJO Y HUESO DE ACEITUNA. *Revista Almaceite*. Agosto, 2017.
- AGENCIA EXTREMEÑA DE LA ENERGÍA. *Los residuos agrícolas de poda*. 2007, pp.14-15.
- DAWSON, CAROLINA. *Tunisian Dates*, FruitTop Magazine nº 239. Abril 2016, pp. 26-31.
- MINISTERIO AGRICULTURA Y PESCA. *Superficies y poblaciones anuales, avance frutales no cítricos y secos*. 2018.
- ESPINOSA, Jonathan. Evaluación de la cadena de productiva para la potencial implementación y fabricación de sistemas de gasificación de carbón a escala industrial en Colombia. *Facultad de Minas*.
- JENKINS, Steve. Environmental advantages of gasification: public and agency awareness. *Colorado Springs, GTC, Colorado*, 2015.
- MOVIALSA, EQTEC; *Integrated Biomass Gasification Cogeneration Power Plant*, Ciudad Real, 2011.
- ITAGRA. Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. *Bloque I*. pp. 4-12. ISBN: 978-84-931891-5-0
- MELISSARI, Blas. Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 2012, no 10, p. 69-82.
- ÁLVAREZ, R. A.; PIZARRO, G. C.; FOLGUERAS, D. M. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico [Tesis M. Sc. Ingeniería Energética]. *Oviedo (España): Universidad de Oviedo, Departamento de Energía*, 2012, pp. 4-6.

- CANDEAS, DAVID VERA; MELGUIZO, DR D. FRANCISCO JURADO. *Generación eléctrica distribuida y aprovechamiento de los residuos de la industria del Olivar*. 2013. Tesis Doctoral. Tesis doctoral, Escuela politécnica superior de JAEN, departamento de ingeniería Eléctrica, pp 94-96, 100, 120-122.
- AAE 2011: Agencia Andaluza de la Energía, *La biomasa en Andalucía*, 2011. Disponible en: <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es>
- REMÓN, Javier, et al. Producción de bio-combustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotermal de pericarpios de almendra. 2019.
- SUÁREZ-GARCIA, F., et al. Inorganic matter characterization in vegetable biomass feedstocks. *Fuel*, 2002, vol. 81, no 9, p. 1161-1169.
- CANALES IZQUIERDO, Isabel, et al. Valorización de biocarbones obtenidos mediante pirólisis de residuos orgánicos. 2017 pp. 35-38.
- MIRANDA, T., et al. Emissions from thermal degradation of pellets with different contents of olive waste and forest residues. *Fuel Processing Technology*, 2010, vol. 91, no 11, p. 1459-1463.
- SAIT, Hani H., et al. Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 118, p. 382-389.
- RUGELES HERNANDEZ, Bianka Gaetana. *Balance Energetico Y Caracterizacion Del Proceso De Gasificacion En La Finca Ecologica Tosoly Ubicada En Socorro, Santander*. 2007. Tesis Doctoral. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones pp. 19-23.
- CARRASCO VENEGAS, Luis Américo. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis. 2015, pp. 38-49.
- CHEJNE JANNA, Farid, et al. Biomasa y carbón: Una alternativa energética para Colombia, pp 15-21.
- SÁNCHEZ, A. Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial Universidad Politécnica de Madrid. Trabajo Final de Grado. Tutor: Teodoro Adrada Guerra*, 2017.
- SHEN, Jianfeng, et al. Measurement of heating value of rice husk by using oxygen bomb calorimeter with benzoic acid as combustion adjuvant. *Energy Procedia*, 2012, vol. 17, p. 208-213.
- ABUADALA, A.; DINCER, I.; NATERER, G. F. Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, no 10, p. 4981-4990.

- VERA, David, et al. Study of a downdraft gasifier and gas engine fueled with olive oil industry wastes. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 51, no 1-2, p. 119-129.
- MILES, T. R., et al. *Alkali deposits found in biomass power plants: A preliminary investigation of their extent and nature. Volume 1*. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States); Miles (Thomas R.), Portland, OR (United States); Sandia National Labs., Livermore, CA (United States); Foster Wheeler Development Corp., Livingston, NJ (United States); California Univ., Davis, CA (United States); Bureau of Mines, Albany, OR (United States). Albany Research Center, 1995.
- DIRZO, Rafael Sánchez; CASARÍN, Rodolfo Silva. Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine. *Educación química*, 2009, vol. 20, no 2, p. 176-181.
- URIS MAS, María. Viabilidad técnico-económica de la cogeneración para el sector residencial en España a partir de biomasa mediante ciclo de Rankine orgánico. 2017.
- LESME-JAÉN, René, et al. Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso. *Tecnología Química*, 2016, vol. 36, no 2, p. 133-144.
- NEGRETE GOMEZ, Edwin Daniel, et al. Implementación de un prototipo para la microgeneración de potencia eléctrica empleando gas pobre en motores de combustión interna de encendido por chispa. 2017.
- A. Algieri, P. Morrone, Comparative energetic analysis of high temperature subcritical and transcritical Organic Rankine Cycle (ORC). A biomass application in the Sibari district, *Applied Thermal Engineering*, 36 (2012) 236-244
- ARTEAGA-PÉREZ, Luis Ernesto, et al. Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. *Afinidad*, 2015, vol. 72, no 570.
- CHAPARRO BONILLA, Faver Adrian; SANCHEZ FORERO, Diana Isabel. *Simulación Del Sistema De Generación De Energía Eléctrica Pila De Combustible-Turbina De Gas, Alimentado Con Gas Rico En Hidrógeno Producido Por Gasificación De Carbon*. 2007. Tesis Doctoral. Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Química.