



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE EMISIÓN DE GASES PROCEDENTES DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA

Alumno: Manuel Germán Galiano

Tutores: David Vera Candeas y Antonio Ortiz
Hernández

Depto.: Ingeniería Eléctrica y Química Inorgánica
y Orgánica

Septiembre, 2017



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE EMISIÓN DE GASES PROCEDENTES DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA

Alumno: Manuel Germán Galiano

Tutores: David Vera Candeas y Antonio Ortiz Hernández

Depto.: Ingeniería Eléctrica y Química Orgánica e Inorgánica

Septiembre, 2017

Los/ as Tutores/as dan el Visto Bueno para entregar y defender su Trabajo Fin de Grado.

Firma del autor:

Firma del Tutor/a

ORTIZ
HERNANDEZ
ANTONIO JOSE
- 52550569P

Firmado digitalmente
Por ORTIZ
HERNANDEZ
ANTONIO JOSE -
52550569P
Fecha: 2017.08.31
07:01:07 +02'00'

NOMBRE VERA
CANDEAS
DAVID - NIF
26240417Q

Firmado digitalmente por
NOMBRE VERA CANDEAS DAVID
- NIF 26240417Q
Nombre de reconocimiento
(DN): c=es, o=FNMT, ou=fnmt
clase 2 ca, ou=703001765,
cn=NOMBRE VERA CANDEAS
DAVID - NIF 26240417Q
Fecha: 2017.08.31 12:44:36
+02'00'

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	4
2	INTRODUCCIÓN	5
2.1	Estado actual de la biomasa	5
2.1.1	Importancia de la biomasa para el desarrollo de países	5
2.1.2	Origen	5
2.1.3	Producción y Consumo	6
2.2	Tecnologías de valoración energética de biomasa.....	8
2.2.1	Combustión.....	8
2.2.2	Pirólisis	9
2.2.3	Gasificación	10
2.2.4	Digestión anaerobia	17
2.3	Tecnologías de producción eléctrica – térmica.....	19
2.3.1	Ciclo Rankine (turbina de vapor)	19
2.3.2	Motores de combustión	20
2.3.3	Microturbina de gas.....	21
2.4	Ejemplos de instalaciones reales	22
2.4.1	Plantas Biomasa en España	22
2.4.2	Principales tecnologías españolas de gasificación.....	25
2.4.3	Otras plantas de gasificación en el mundo.....	26
3	OBJETIVOS.....	29
4	MATERIALES Y MÉTODOS	30
4.1	Caracterización de la biomasa	30
4.1.1	Hidrodestilación	30
4.1.2	Caracterización contenido en humedad	34
4.1.3	Tamaño de partículas	36
4.1.4	Contenido graso.....	37
4.2	Análisis CHONSK de la biomasa	39
4.3	Medida de la composición del syngas	40

4.4	Componentes del Gasificador	44
4.5	Propuestas de medición de gases	53
5	DISCUSIÓN	54
5.1	Primer día de arranque	54
5.2	Segundo día de arranque.....	55
5.3	Tercer día de arranque	56
5.4	Limpieza del gasificador.....	58
5.5	Cuarto día de arranque	61
5.6	Modelado y simulación con el software cycle tempo	64
5.6.1	Modelado y simulación poda de olivar	64
5.6.2	Modelado y simulación pellets	74
5.6.3	Resultados simulación poda olivar y pellets	84
6	CONCLUSIONES	88
6.1	Principales conclusiones.....	88
6.2	Propuestas de mejora	89
6.2.1	Propuesta de mejora 1.....	89
6.2.2	Propuesta de mejora 2.....	91
7	BIBLIOGRAFÍA	92

1 RESUMEN

Este proyecto tiene por objeto el estudio de la composición de los gases procedentes de un sistema de aprovechamiento de biomasa. Como sistema de aprovechamiento el departamento de ingeniería eléctrica dispone de un gasificador de biomasa.

Una de las tecnologías que presenta mayores ventajas de carácter energético y medioambiental, y esta menos desarrollada es la gasificación. El proceso consiste en la oxidación parcial a elevada temperatura de la biomasa a partir de la cual se obtiene un gas sintético, denominado syngas, que puede ser utilizado, previo tratamiento, como combustible en un motor de combustión interna alternativo o en una turbina de gas, para la producción simultánea de energía eléctrica y térmica.

La biomasa utilizada ha sido poda de olivar a la cual se le han realizado diferentes ensayos para caracterizarla física y químicamente. Además, durante la puesta en marcha del gasificador también se ha utilizado como biomasa pellets, la procedencia de la madera de los pellets, normalmente suelen ser de pino.

Es importante destacar que antes de realizar el estudio de la composición de los gases, es necesario que el gasificador se ponga a punto para poder realizar estos procesos. De ahí, que previa a la medición de los gases, ha sido necesaria la optimización del régimen del gasificador para que la emisión de cenizas y alquitranes permitiera la medición posterior de los gases. En cualquier caso, hemos iniciado el estudio de dos procedimientos uno en discontinuo y otro on-line para la medición de gases. Se presentan ambas alternativas y su posible aplicación a nuestro gasificador.

De forma paralela, se procedió a realizar simulaciones mediante un software de simulación energética denominado Cycle-Tempo desarrollado por la universidad Holandesa TU-Delft para ver los parámetros más significativos del proceso.

La puesta en marcha del gasificador para procesos posteriores se ha completado con éxito.

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Estado actual de la biomasa

2.1.1 Importancia de la biomasa para el desarrollo de países

Las fluctuaciones de los precios de los combustibles en el mercado mundial causaron una tensión financiera para todos los países, especialmente muchos países en desarrollo. El potencial de las energías renovables para satisfacer la demanda mundial de energía ha sido ampliamente reconocido. Una de las fuentes de energía renovable más viable es la biomasa de los residuos agrícolas. Es la tercera fuente de energía primaria más grande después del carbón y el petróleo. El uso de la biomasa como fuente alternativa de energía es especialmente importante para la mayoría de los países en desarrollo, donde sus economías se basan principalmente en los sectores agrícolas y forestales (Chouchene, 2010).

La biomasa está disponible en varias formas como residuos forestales (corteza, ramas, hojas y madera), residuos agrícolas (cáscara, paja y hojalata) (Kumar, 2008) residuos de plantaciones (coco, café y té), desechos de animales (purines, desechos de gallinas), residuos industriales (residuos sólidos de oliva, astillas de madera, serrín y bagazo) y cultivos energéticos (*Miscanthus*, *Arundo*) (Jeguirim & Trouvé, 2009). La biomasa puede convertirse en sólidos, líquidos y gaseosos mediante procesos de conversión termoquímica y biológica (Bridgewater, 1995).

2.1.2 Origen

Es la energía solar almacenada en los seres vivos, vegetales o animales por medio del proceso de fotosíntesis y la digestión de estos vegetales por los animales. Por tanto se hace referencia a un pequeño porcentaje de la energía solar que llega a la Tierra (Carta González et al, 2009).

La biomasa puede encontrarse en distintas fuentes de energía:

- De origen vegetal: biomasa natural, cultivos energéticos.
- De origen animal: residuos de animales (excrementos y purines).
- De origen humano: los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), procedentes de viviendas, comercios, fábricas, etc.

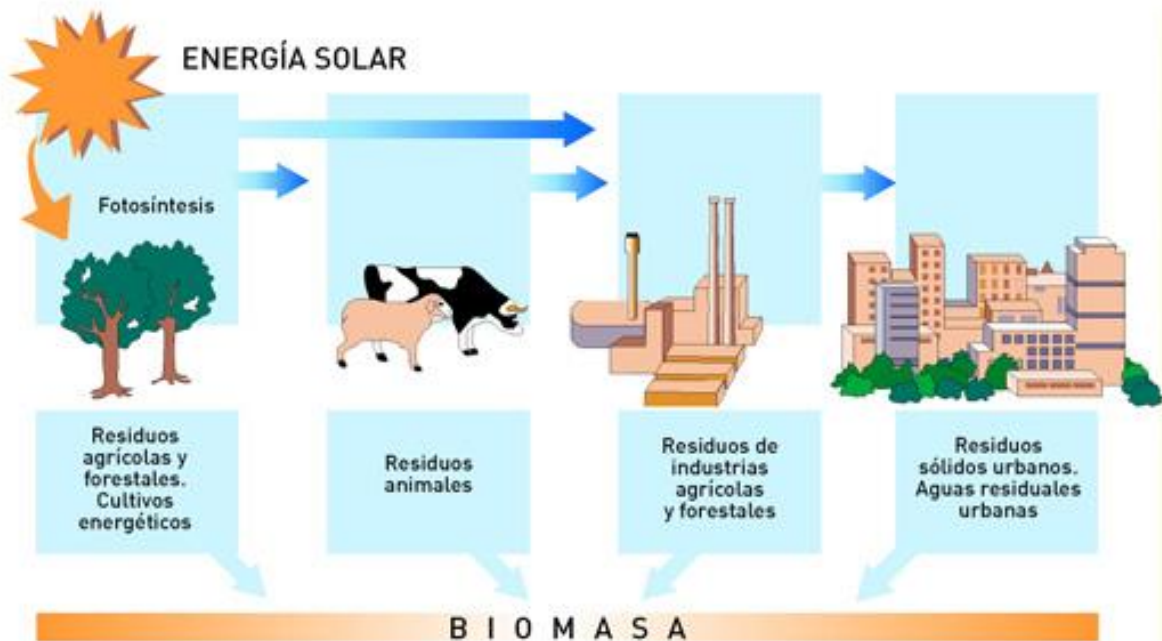


Figura 2.1 Ciclo Biomasa. Fuente:
<https://heuramedioambiente.wordpress.com/2012/04/23/que-es-la-biomasa/>

2.1.3 Producción y Consumo

La energía de la biomasa posee unas características que la hacen no almacenable (en grandes cantidades) y no transportable, por lo que la producción y el consumo coinciden en el tiempo y en el espacio.

Las previsiones establecidas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático establecen que antes del año 2.100 la cuota de participación de la biomasa en la producción mundial de energía debería estar entre el 25 y el 46%.

Según la publicación “2013 Survey of Energy Resources” del World Energy Council en el año 2011 la contribución de la biomasa a nivel mundial alcanzaban los 1.227 Mtep. Para el año 2020 se prevé una contribución de la biomasa de 1.323 Mtep.

En términos energéticos, el consumo de energía procedente de la biomasa en los últimos años ha ido aumentando como podemos observar en las siguientes gráficas.

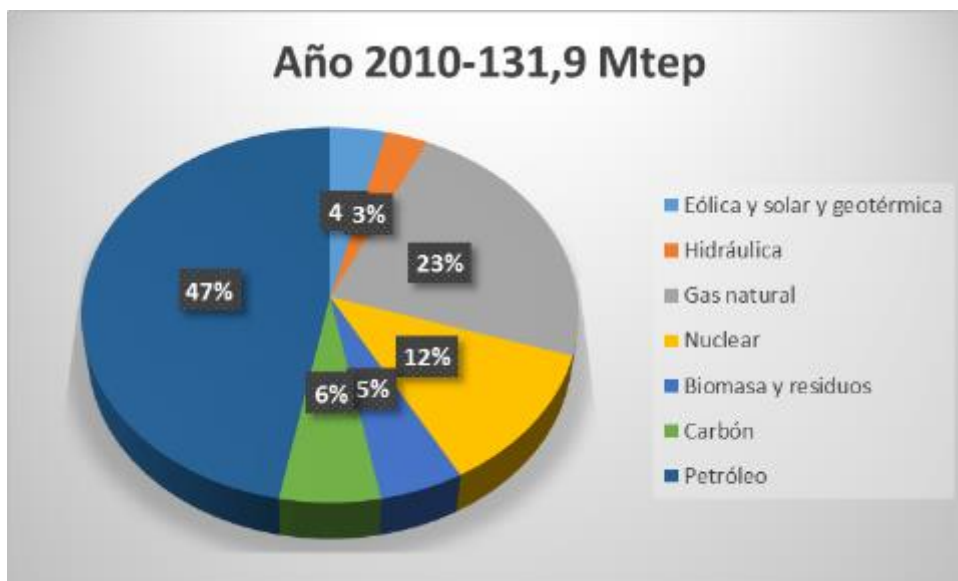


Figura 2.2 Producción de energía a partir de fuentes fósiles y renovables en España.
Fuente: Ministerio de industria. IDAE.

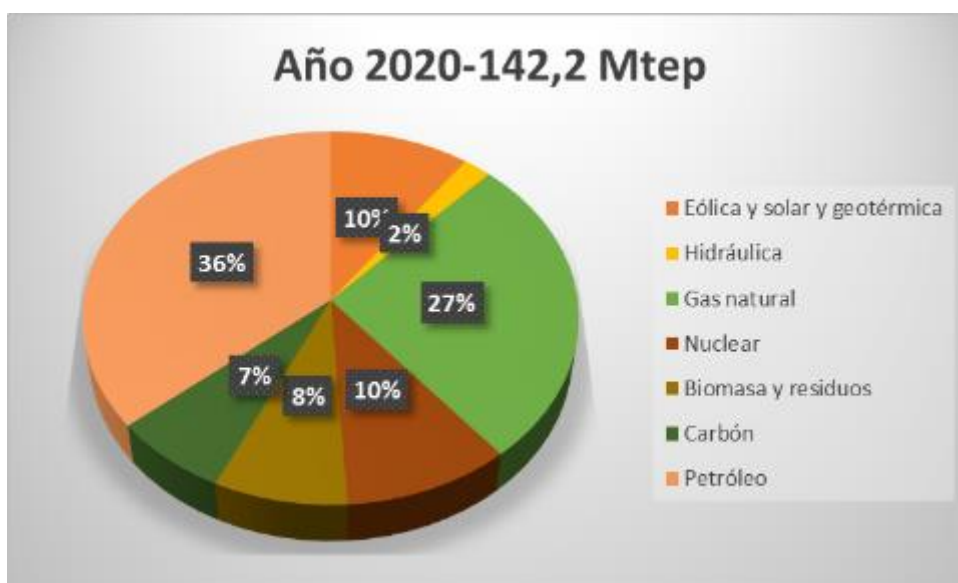


Figura 2.3 Producción de energía a partir de fuentes fósiles y renovables en España.
Fuente: Ministerio de industria. IDAE.

Se puede observar que la tendencia de las energías renovables es aumentar. Se prevé que en 2020 que aumente alrededor de un 12 % de la producción de energía en España.

En la Unión Europea, cinco países aportan el 56,7% de la energía primaria producida con biomasa, Francia, Suecia, Alemania, Finlandia y Polonia. Los principales consumidores de biomasa (consumo per cápita) son los países nórdicos y bálticos, junto con Austria, y encabezados por Finlandia. Por otro lado, la producción eléctrica con

biomasa se sitúa en torno a los 60 TWh en la Europa de los 28, lo que supone alrededor del 2% de la producción eléctrica europea (Fuente: <http://www.energiza.org/eolica/20-biomasa/939-biomasa-en-la-uni%C3%B3n-europea>)

2.2 Tecnologías de valoración energética de biomasa

2.2.1 Combustión

La combustión representa quizás el medio más antiguo de utilización de la biomasa, dado que la civilización comenzó con el descubrimiento del fuego. La quema de madera forestal enseñó a los seres humanos cómo cocinar y cómo mantenerse calientes. Químicamente, la combustión es una reacción exotérmica entre el oxígeno y el hidrocarburo en la biomasa. Aquí, la biomasa se oxida liberando agua y dióxido de carbono. (Basu, 2011). Como subproductos del proceso se obtienen cenizas formadas por componentes no combustibles y por productos de la combustión incompleta o inquemados.

Mediante el proceso de combustión, el calor de reacción liberado es actualmente la mayor fuente de consumo de energía humana, representando más del 90% de la energía procedente de la biomasa.

Existen diversos factores que influyen en la combustión de la biomasa como son: características físicas, químicas y energéticas de la biomasa (combustible), el porcentaje de oxígeno y la temperatura (entre 600 °C y 1300 °C) (Madrid, 2012)

Entre las características físicas de la biomasa sobresale el grado de humedad de la misma. Se aconseja que el grado de humedad sea inferior a 15% (biomasa seca), ya que en la evaporación del agua contenida en la biomasa se consume parte de la energía liberada en la combustión. Si se utiliza biomasa seca pueden lograrse rendimientos del orden del 80%. En cambio, si utilizamos biomasa húmeda (humedad >50%) pueden lograrse rendimientos del orden del 60%. Además, el tamaño de partículas de la biomasa y su densidad son características que influyen en la duración del proceso de combustión y en los equipos utilizados en el tratamiento y en la propia combustión (Carta González et al, 2009).

En cuanto a las características químicas, es importante destacar que la biomasa vegetal no posee cantidades de azufre elevadas. Por tanto, prácticamente no se producen emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre.

El calor generado al quemar la biomasa se puede usar en plantas industriales para calefacción y producir vapor, para finalmente generar electricidad.

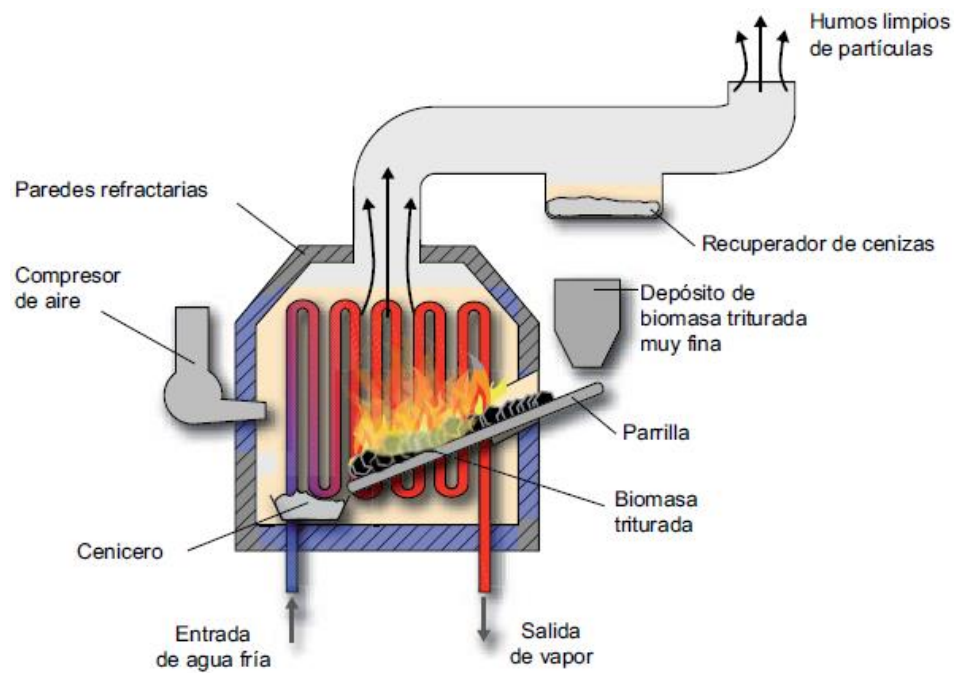


Figura 2.4 Generación directa por combustión directa. Fuente: Libro Centrales de Energías Renovables, Madrid. 2009.

2.2.2 Pirólisis

2.2.2.1 Introducción

La pirólisis es una descomposición de la materia orgánica por medio de la aportación de energía en forma de calor en una atmósfera inerte o en el vacío. Esta reacción lleva consigo la producción de un residuo carbonoso, gases condensables y productos gaseosos. Las fracciones obtenidas serán distintas en función de cómo se realice el proceso.

La pirólisis tiene similitud o superposición con procesos como craqueo, devolatilización, carbonización, torrefacción, destilación seca, destilación destructiva y termólisis, pero no tiene similitud con el proceso de gasificación, que implica reacciones químicas con un agente externo conocido como medio de gasificación. La pirólisis de biomasa se lleva a cabo en un intervalo de temperaturas de 300 - 650 ° C en comparación con 800 - 1000 ° C para gasificación y 200 - 300 ° C para torrefacción (Basu, 2011).

2.2.2.2 Productos de pirólisis

La pirólisis implica un desglose de moléculas complejas grandes en varias moléculas más pequeñas. Su producto se pueden presentar como líquido (alquitranes, hidrocarburos más pesados y agua), sólido (sobre todo char o carbón) y gases (por ejemplo, CO₂, H₂O, CO, etc...) (Damien, 2010).

La finalidad de estos productos es la de utilizarlos posteriormente para fines térmicos, eléctricos, o incluso, de producción de biocarburantes.

Las cantidades relativas de estos productos dependen de varios factores incluyendo la velocidad de calentamiento y la temperatura final alcanzada por la biomasa.

2.2.3 Gasificación

2.2.3.1 Introducción

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas que se producen en ambientes pobres en oxígeno, transformando un sólido una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados. Normalmente esta combustión incompleta se produce al someter a la biomasa a temperaturas elevadas (del orden de 800-1000 °C). Como resultado se obtiene un gas sintético, o también llamado syngas, el cual está compuesto por dióxido y monóxido de carbono, metano, hidrógeno y otros hidrocarburos, y un subproducto sólido carbonoso. En nuestro caso, es la celulosa el componente principal de la biomasa que al transformarse en hidrocarburos más ligeros, nos genera el syngas. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. En la mayoría de los casos, la mezcla de gases llamada gas sintético o “syngas”, tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante y en general la baja eficiencia energética se debe a la relativamente baja conversión del combustible. En la mayoría de las situaciones se suelen formar como subproductos alquitranes y agua (Basu, 2011).

La gasificación y la combustión son dos procesos termoquímicos estrechamente relacionados, pero existe una diferencia importante entre ellos. La gasificación contiene energía en los enlaces químicos del gas producto. Sin embargo, en la combustión se rompen esos enlaces para liberar la energía. El proceso de gasificación añade hidrógeno y separa el carbono de la carga de hidrocarburos para producir gases con una mayor relación hidrógeno-carbono (H/C), mientras que la combustión oxida el hidrógeno y el carbono.

Un proceso típico de gasificación de biomasa puede incluir las siguientes etapas:

- Secado
- Descomposición térmica o pirolisis
- Combustión parcial de algunos gases, vapores y carbón
- Gasificación de productos descompuestos

La gasificación requiere un medio de gasificación como vapor, aire u oxígeno para reorganizar la estructura molecular de la materia prima para convertir la materia prima sólida en gases o líquidos. También se puede añadir hidrógeno al producto. El uso de un medio es esencial para el proceso de gasificación, lo que no es el caso de la pirólisis o torrefacción.

Además del medio de gasificación que se utilice, otros factores, como el tipo de reactor (gasificador) elegido o el sistema de acondicionamiento y limpieza del gas, son determinantes en el proceso de gasificación y condicionan la calidad final del gas producido y su aplicación. Dependiendo del medio de gasificación que se utilice, del tipo de gasificador o reactor así como del sistema de acondicionamiento y limpieza del gas condicionarán la calidad final del gas producido y su aplicación.

2.2.3.2 Procesos de gasificación

El proceso de gasificación típico generalmente sigue la secuencia de etapas enumerada a continuación (ilustrada esquemáticamente en la figura 2.2).

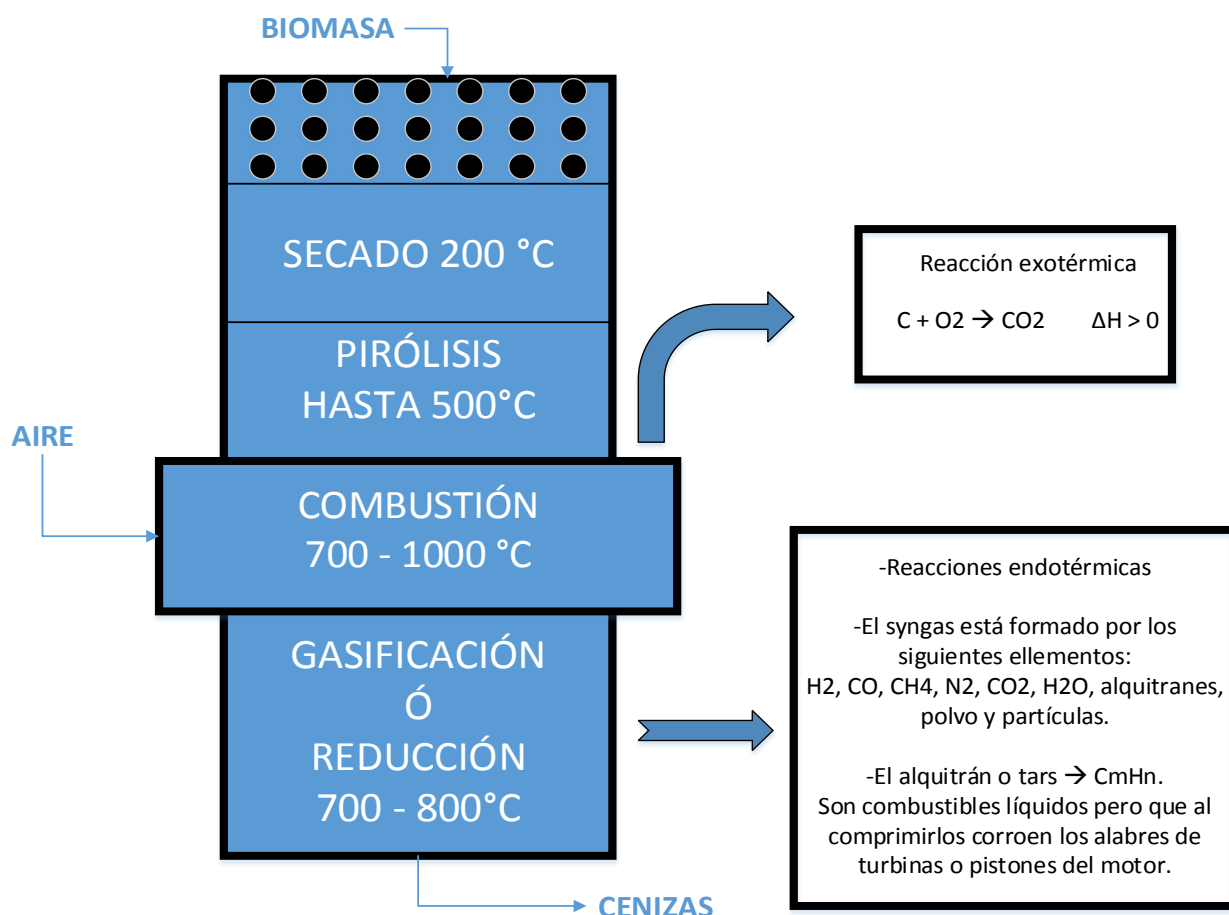


Figura 2.5 Etapas y características principales en el proceso de gasificación. Fuente: (Canzana, 2011)

Las etapas características de la gasificación son las siguientes:

- Precalentamiento y secado
- Pirólisis y / o combustión
- Gasificación del carbón

2.2.3.2.1 Secado

El contenido de humedad típico de las maderas recién cortadas oscila entre el 30% y el 60%, y para alguna biomasa puede superar el 90%. Cada kilogramo de humedad en la biomasa quita un mínimo de 2242 kJ de energía adicional del gasificador para vaporizar el agua, y esa energía no es recuperable (Basu, 2011).

Por lo tanto, es necesaria una cierta cantidad de presecado para eliminar la mayor cantidad de humedad posible de la biomasa antes de que se introduzca en el gasificador. Para la producción de un gas combustible con un valor de calentamiento razonablemente alto, la mayoría de los sistemas de gasificación utilizan biomasa seca con un contenido de humedad de 10-20%.

2.2.3.2.2 Pirólisis

La pirólisis implica la descomposición térmica de las moléculas de hidrocarburos más grandes de la biomasa en moléculas de gas más pequeñas (condensables e incondensables) sin reacción química importante con aire, gas o cualquier otro medio de gasificación. Esta reacción generalmente precede a la etapa de gasificación.

Un producto importante de la pirólisis es el alquitrán formado a través de la condensación del vapor condensable producido en el proceso. Al ser un líquido pegajoso, el alquitrán crea una gran dificultad en el uso industrial del producto de gasificación.

2.2.3.2.3 Gasificación del carbón

La etapa de gasificación implica reacciones químicas entre los hidrocarburos en el combustible, vapor, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno en el reactor, así como reacciones químicas entre los gases desarrollados. De éstos, la gasificación del carbón es la más importante. El carbón de biomasa producido mediante la pirólisis de la biomasa no es necesariamente carbono puro. Contiene una cierta cantidad de hidrocarburo que comprende hidrógeno y oxígeno.

El carbón de la biomasa es generalmente más poroso y reactivo que el coque producido a través de la carbonización a alta temperatura del carbón. La porosidad del carbón de la biomasa está en el intervalo de 40 - 50% mientras que la del carbón es de 2-

18%. Los poros de carbón de la biomasa son mucho más grandes (20 - 30 μm) que los de carbón de carbón ($\sim 5 \text{ \AA}$) (Encinar et al., 2001). Por lo tanto, su comportamiento de reacción es diferente del de los carbonos derivados del carbón, el lignito o la turba.

2.2.3.3 Tipos gasificadores

Existen distintos tipos de gasificadores, los cuales se clasifican en función de cómo se relacionan en el interior del gasificador el flujo del agente gasificante y los sólidos, con tres configuraciones típicas: updraft, downdraft y lecho fluidizado.

2.2.3.3.1 Configuración updraft

El sólido y el gas producido se mueven en el interior del lecho en contracorriente, normalmente el sólido en sentido descendente y el gas en sentido ascendente (Basu, 2011).

Las principales ventajas de este tipo de gasificadores radican en su sencillez de construcción y operación y su elevada eficacia térmica.

Esta tecnología es aplicable a pequeñas potencias.

2.2.3.3.2 Configuración downdraft

Este gasificador se caracteriza porque la biomasa y el gas se desplazan en el mismo sentido, normalmente descendente.

La principal ventaja de este gasificador es la obtención de un gas producto de bajo contenido en alquitranes, puesto que éstos son obligados a atravesar la zona de altas temperaturas en la que son craqueados o quemados, reduciendo así su proporción final en el syngas.

El principal inconveniente es la baja eficiencia global del proceso. Esto se debe a la elevada temperatura de salida del syngas (del orden de 400-700 $^{\circ}\text{C}$).

2.2.3.3.3 Configuración lecho fluidizado

En este tipo de gasificadores el secado, la gasificación, la oxidación y la pirolisis tiene lugar simultáneamente en todos los puntos del reactor. Se obtiene un gas con bajos contenidos en tars y grandes cantidades de partículas y cenizas, a una temperatura que puede oscilar entre los 800 y 1000 $^{\circ}\text{C}$.

Esta tecnología, a diferencia de las anteriores, presenta una elevada velocidad de transferencia de calor y materia, y una buena mezcla de la fase sólida. Esto hace que las reacciones se produzcan a gran velocidad y a una temperatura uniforme en todos los puntos del lecho.

Los reactores de lecho fluidizado pueden ser de dos tipos:

- Burbujeante. Son simples en operación y control. Los costes de inversión no son muy elevados. Son sencillos y fiables.
- Circulante. La velocidad de fluidización es alta para arrastrar grandes cantidades de sólidos con el gas. La fluidización, se mejora la transmisión de calor y la transferencia de materia, por tanto, la rapidez del proceso de gasificación.

2.2.3.4 Gasificadores en Thrive Off Grid

Thrive Off Grid es una tienda online donde encontrar sistemas de gasificación de biomasa y otros productos para soluciones fuera de la red, es muy fácil. Ofrecen una amplia variedad de tecnologías de gasificación, las cuales se ampliarán a otras tecnologías renovables para satisfacer todas nuestras necesidades energéticas fuera de la red.

A continuación se van a mostrar una serie de productos que pueden ser interesantes:

- *Evolution Power System*

El Evolution Power System convierte la biomasa de madera astillada en combustible de combustión limpia que funciona con una unidad integrada de generador a bordo de 8 kW. Las unidades son una solución totalmente integrada, que combina la planta de gasificación directamente en los sistemas de motor / generador. Aprovechando el calor residual del motor junto con el intercambio de calor de enfriamiento de gas para calefacción combinada y agua caliente. El resultado es un sistema limpio y compacto que durará años en venir proporcionando electricidad y calor de residuos de madera. Las máquinas también son una solución apilable, se pueden apilar varias unidades juntas para satisfacer las demandas comerciales de alto rendimiento. Usted puede comenzar con una sola unidad y si sus demandas se hacen mayores puede agregar simplemente en una máquina o varias máquinas para satisfacer la demanda hasta 102 kW. Esto también hace que los sistemas más prácticos que una sola unidad y las máquinas son de servicio sin perder potencia.



Figura 2.6 Equipo Evolution Power System

- TOG Utility Gasifier

El Utility Gasifier se deriva de los sistemas de embalaje de diseño premium, tomamos el diseño del núcleo de Flex R1 y lo adaptamos a esta plataforma innovadora que permite al usuario la flexibilidad de agregar esta máquina a muchas aplicaciones diferentes. El resultado es una unidad de gasificación muy avanzada, que puede adaptarse a cualquier necesidad. Puedes elegir cualquier opción del generador y hacerla llave en mano y listo para funcionar apagado el carro de la entrega. El adaptador de alimentación de barrena ahora es estándar en la Utilidad, por lo que la actualización a la tolva de alimentación de barrena es fácil y se puede agregar posteriormente.



Figura 2.7 Equipo TOG Utility Gasifier

2.2.4 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia consiste en la conversión bioquímica de materia orgánica en un gas combustible formado principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e impurezas (H_2S). Este gas combustible recibe el nombre de biogás. Mediante una acción bacteriana, la biomasa es convertida a biogás dentro de un ambiente anaerobio (ausencia de oxígeno). Los tipos de biomasa que se someten a procesos de digestión anaerobia son aquellas con alto contenido en humedad y sustancias orgánicas: lodos de depuradoras (EDAR), purines de cerdo y vaca, residuos de empresas de licores, residuos alimenticios, algas, alperujo, etc (Madrid, 2012).

Una planta de biomasa, basada en digestión anaerobia, para generación de energía eléctrica y térmica (CHP) consta de las siguientes partes: unidad de pre-tratamiento de biomasa, digester anaerobio y almacenamiento de biogás, unidad de potencia (microturbina o motor de gas), sistema de control y conexión a red.

El proceso de producción de biogás se desarrolla en tres etapas. En la primera etapa (hidrólisis), las bacterias descomponen la materia orgánica en azúcares. En la segunda etapa (acetogénica), los azúcares se transforman en ácidos orgánicos. En la tercera etapa (metanogénica), se produce la transformación de las sustancias anteriormente obtenidas en metano (CH_4) y gases ácidos (SH_2 , CO_2) (Carta González, 2009).

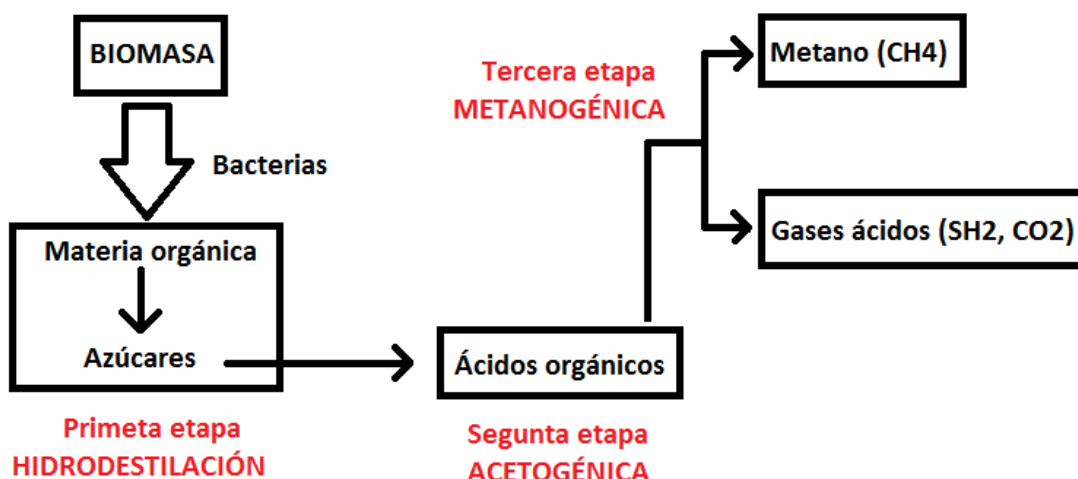


Figura 2.8 Etapas para la producción de biogás. Fuente: elaboración propia.

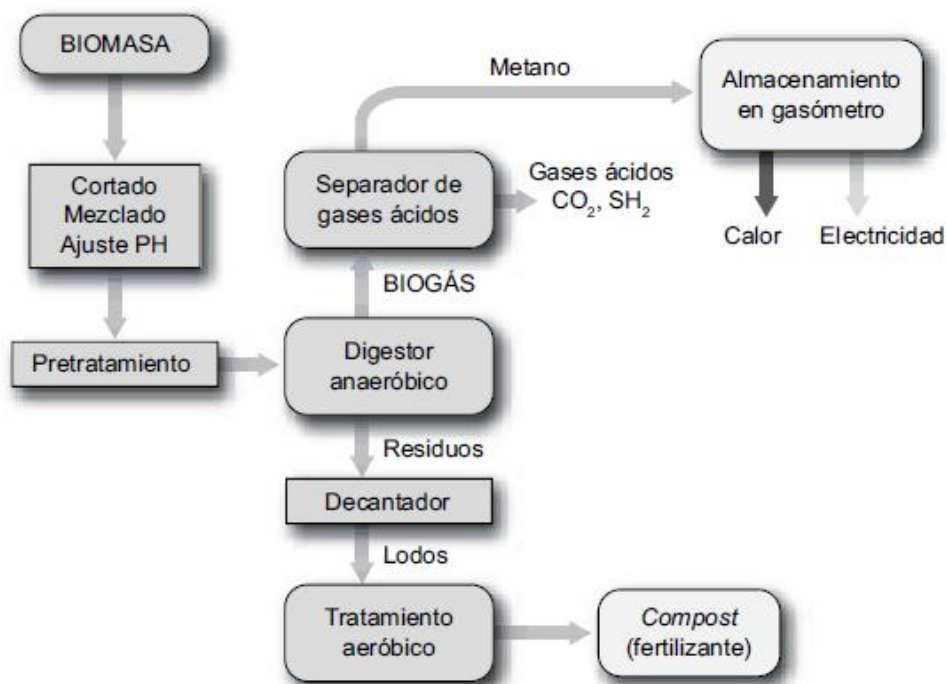


Figura 2.9 Esquema conceptual del proceso de digestión anaeróbica. Fuente: Libro Centrales de Energías Renovables, Madrid. 2009.

Los principales factores que afectan al proceso son: tipo de biomasa y su composición. Además, podemos destacar la importancia de la temperatura del proceso, la acidez (esta determina la producción de biogás y el porcentaje de metano), el contenido en sólidos (no debe ser muy líquido ya que los microorganismos se tienen que alimentar y tampoco muy espeso para que se puedan mover) y el tiempo de retención (normalmente se encuentra entre 10 días y un mes, dependiendo del tipo de biomasa).

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo en digestores. Estos pueden clasificarse en:

- Digestores discontinuos, el proceso se lleva a cabo de forma discontinua, son procesos que no se están utilizando en la actualidad.
- Digestores continuos, trabajan a un régimen continuo, es decir, en ningún momento cesa la actividad. Se distinguen los digestores de mezcla completa, digestores de contacto (para mejorar la flora bacteriana mediante sistemas de realimentación) y digestores de filtro anaerobio (retiene a las bacterias responsables del proceso mediante filtros inertes).

Las aplicaciones más usuales del biogás son: calentamiento, combustión de calderas de vapor convencionales y como combustible de motores de combustión interna destinados a la generación de electricidad.

Por otra parte, los residuos de la digestión se pueden destinar a la alimentación de animales y a la fertilización de terrenos.

2.3 Tecnologías de producción eléctrica – térmica

2.3.1 Ciclo Rankine (turbina de vapor)

El ciclo de Rankine es el ciclo ideal que sirve de base al funcionamiento de las centrales térmicas, las cuales, producen actualmente la mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo. La evolución de las centrales térmicas ha estado condicionada por la búsqueda de mejoras en el rendimiento térmico del ciclo termodinámico, ya que incluso pequeñas mejoras en el rendimiento significan grandes ahorros en los requerimientos de combustible. La idea básica detrás de todas las modificaciones para incrementar el rendimiento de un ciclo de potencia es aumentar la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la cual el fluido de trabajo cede calor al condensador. Esto se consigue con una selección cuidadosa de las condiciones de operación de la caldera (presión y temperatura a la que genera el vapor), y del condensador (presión de operación), así como con la incorporación de recalentamientos entre diferentes etapas de expansión y calentamientos regenerativos del agua de alimentación (Sánchez-Junco, 2012).

2.3.1.1 Funcionamiento

Es mucho más práctico que el ciclo de Carnot con gases pues la capacidad de transporte de energía del vapor con cambio de fase es mucho más grande que en un gas. El esquema de bloques de ciclo de vapor de Rankine se muestra en la siguiente figura.

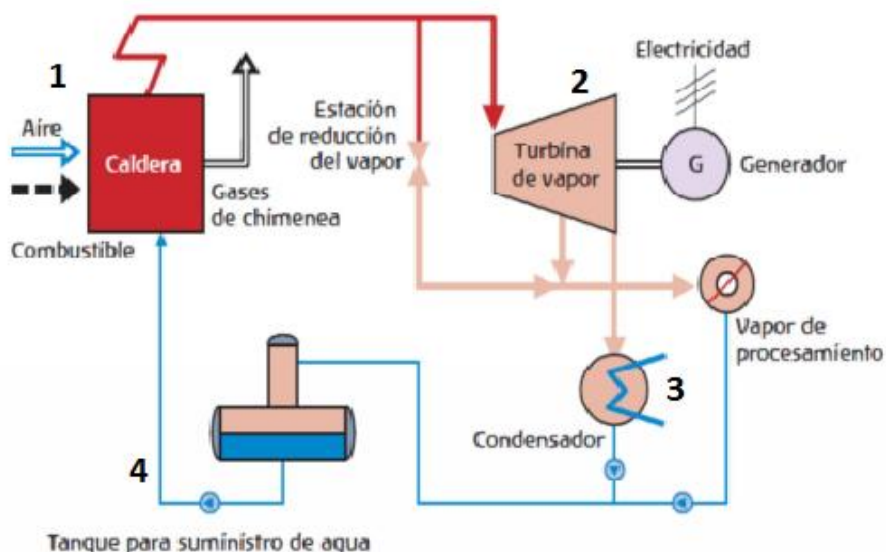


Figura 2.10 Ciclo de vapor de Rankine. Fuente: Manual de Estadísticas Energéticas. Agencia Internacional de la Energía.

La bomba recolecta el condensado a baja presión y temperatura. Típicamente una presión menor a la atmosférica, estado (3) y comprime el agua hasta la presión de la caldera (4).

El condensado a menor temperatura, de la temperatura de saturación en la caldera es inyectada a la caldera. En la caldera primero se calienta, alcanzando la saturación y luego se inicia la ebullición del líquido.

En (1) se extrae el vapor de la caldera (con un valor muy cercano a 1) y luego se conduce el vapor a la turbina. Allí se expande, recuperando trabajo, en la turbina, hasta la presión asociada a la temperatura de condensación (2).

El vapor que descarga la maquina entra al condensador donde se convierte en agua al entrar en contacto con las paredes de los tubos que están refrigerados en su interior (por agua). El condensado se recolecta al fondo del condensador, donde se extra (3) prácticamente como liquido saturado.

Allí la bomba comprime el condensado y se repite el ciclo.

2.3.2 Motores de combustión

Los primeros motores de combustión interna alternativos de gasolina que sentaron las bases de los que conocemos hoy fueron contruidos casi a la vez por Karl Benz y Gottlieb Daimler. Los intentos anteriores de motores de combustión interna no tenían la fase de compresión, sino que funcionaban con una mezcla de aire y combustible aspirada o soplada dentro durante la primera parte del movimiento del sistema. La distinción más significativa entre los motores de combustión interna modernos y los diseños antiguos es el uso de la compresión (Diacosa, 1970).

2.3.2.1 Motor de combustión OTTO

El motor convencional del tipo Otto es de cuatro tiempos (4T), aunque en fuera borda y vehículos de dos ruedas hasta una cierta cilindrada se utilizó mucho el motor de dos tiempos (2T). El rendimiento térmico de los motores Otto modernos se ve limitado por varios factores, entre otros la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

La termodinámica nos dice que el rendimiento de un motor alternativo depende en primera aproximación del grado de compresión. Esta relación suele ser de 8 a 1 o 10 a 1 en la mayoría de los motores Otto modernos. Se pueden utilizar proporciones mayores, como de 12 a 1, aumentando así la eficiencia del motor, pero este diseño requiere la utilización de combustibles de alto índice de octano para evitar el fenómeno de la detonación, que puede producir graves daños en el motor. La eficiencia o rendimiento medio de un buen

motor Otto es de un 20 a un 25%: sólo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica (Diacosa, 1970).

2.3.2.1.1 Funcionamiento

El funcionamiento del motor Otto se muestra en la siguiente figura (Arias, 2004).

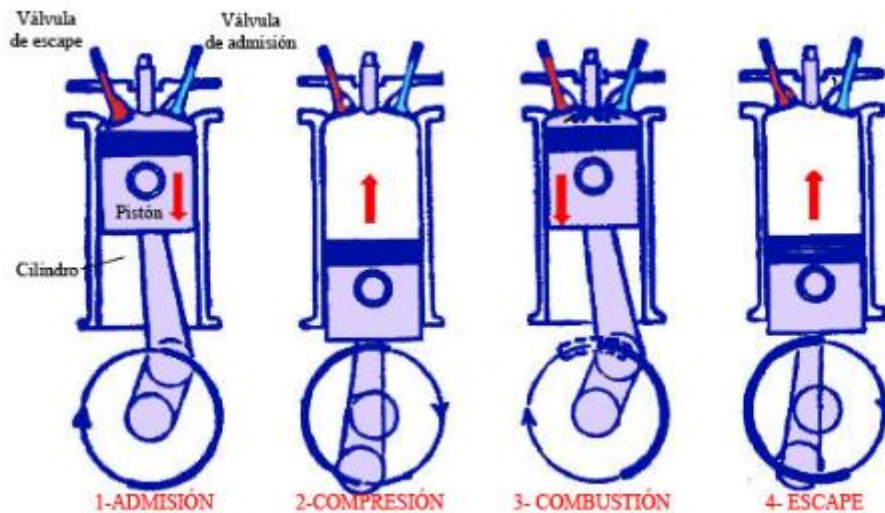


Figura 2.11 Motor Otto de 4 tiempos. Fuente: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/02/12/motor-de-combustion-interna-ciclo-de-cuatro-tiempos/>

1. Tiempo de admisión - El aire y el combustible mezclados entran por la válvula de admisión
2. Tiempo de compresión - La mezcla aire/combustible es comprimida y encendida mediante la bujía.
3. Tiempo de combustión - El combustible se inflama y el pistón es empujado hacia abajo.
4. Tiempo de escape - Los gases de escape se conducen hacia fuera a través de la válvula de escape.

2.3.3 Microturbina de gas

Micro-turbinas generalmente se refiere a unidades de menos de 350 kW. Estas unidades suelen ser alimentadas por gasóleo o gas natural. Utilizan tecnología ya desarrollada. Las micro-turbinas pueden ser unidades de flujo axial o centrífugas. El costo inicial, la eficiencia y las emisiones serán los tres criterios más importantes en el diseño de estas unidades.

Las micro-turbinas, para tener éxito, deben ser de tamaño compacto, tener bajo costo de fabricación, altas eficiencias, operación silenciosa, arranques rápidos y emisiones mínimas. Estas características, si se logran, harían que las micro-turbinas fueran excelentes candidatos para suministrar energía de base y de cogeneración a una variedad de clientes comerciales. Las micro-turbinas van a ser en gran parte una colección de tecnologías que ya han sido desarrolladas. Los retos están en empaquetar económicamente estas tecnologías.

Las micro-turbinas en el mercado hoy en día van de unos 20-350 kW. Hoy en día, la micro-turbina utiliza turbinas de flujo radial y compresores, como se ve en la figura 1-15. Para mejorar el rendimiento térmico global se utilizan regeneradores en el diseño de microturbinas y en combinación con enfriadores de absorción u otras cargas térmicas pueden obtenerse eficiencias muy altas (Boyce, 2006).

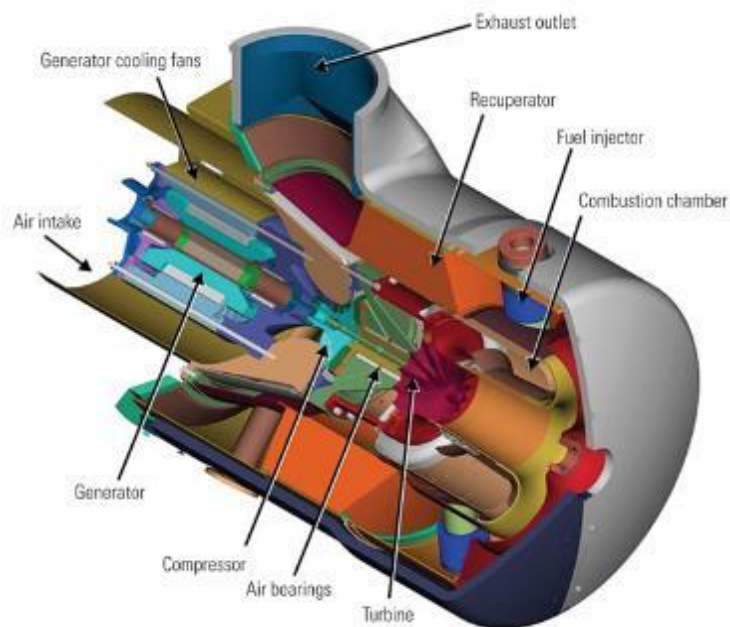


Figura 2.12 Esquema compacto de una micro-turbina. Fuente: Libro Gas Turbine Engineering Handbook (Third Edition), Meherwan P. Boyce, 2006)

2.4 Ejemplos de instalaciones reales

Una planta de biomasa es una instalación industrial diseñada para generar energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la biomasa.

2.4.1 Plantas Biomasa en España

2.4.1.1 Planta Ence, Huelva

Ence es referente en la producción de celulosa y energía con biomasa cultivada como ejemplo de actividad comprometida con el desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático.

La actividad del Grupo se basa en el cultivo, cuidado, promoción y aprovechamiento de especies forestales para la producción y extracción de madera y biomasa y su transformación en celulosa y energía. La compañía gestiona aproximadamente 116.000 hectáreas forestales en España, Portugal y Uruguay, cumpliendo los más exigentes requisitos internacionales en materia de Gestión Forestal Sostenible. Ence cuenta con tres complejos industriales en España (Huelva, Navia en Asturias y Pontevedra) con capacidad para producir 1,3 millones de toneladas de pasta de papel y 1,7 millones de MW h de energía eléctrica renovable.

La fábrica de Ence en Huelva ocupa una extensión de 40 hectáreas de terrenos industriales, rodeadas de otras 32 hectáreas disponibles para una eventual expansión. La potencia de generación eléctrica renovable instalada en la planta de Huelva es de 117 MW año: 68 MW producidos mediante biomasa y 49 MW mediante cogeneración por Gas.

La planta de Ence en Huelva produce la energía que consume. Genera más de 690.000 MWh de energía renovable, equivalentes al consumo eléctrico de más de 210.000 hogares.

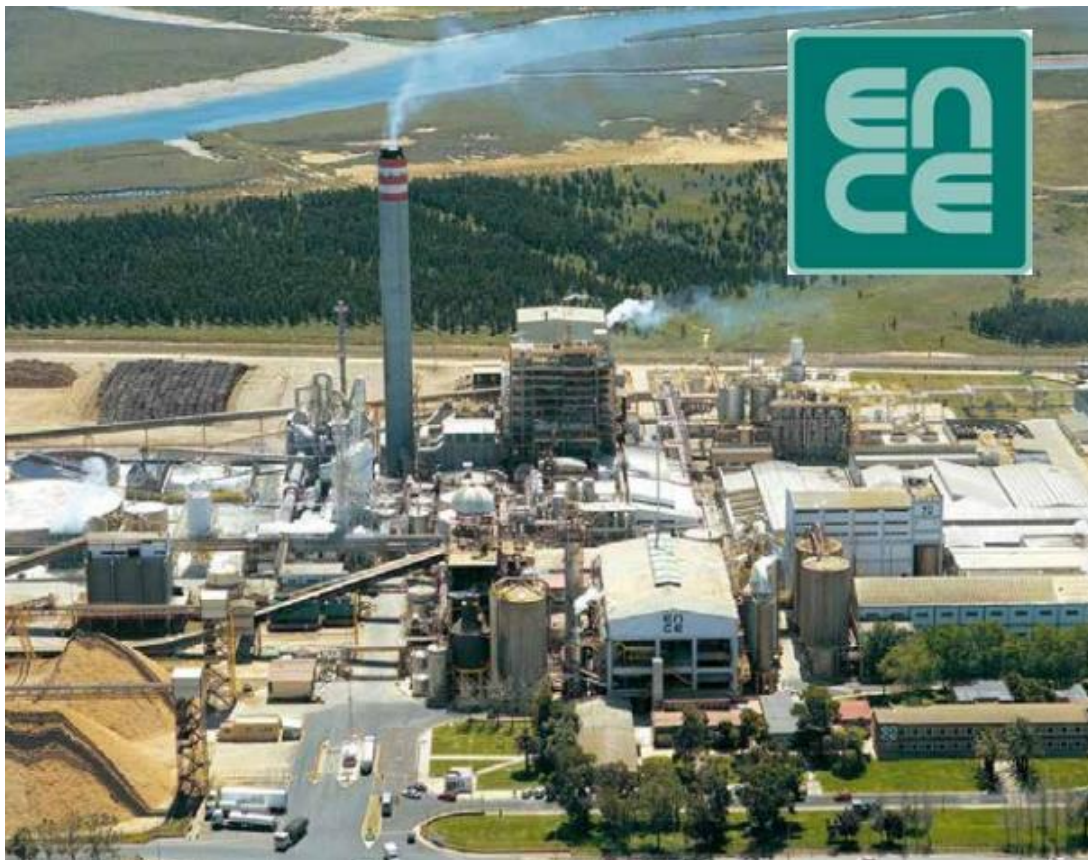


Figura 2.13 Planta Ence, Huelva. Fuente:
http://www.saidi.es/PDF/Project_Profiles/Project_profile_BIOMASA_ENCE.pdf

2.4.1.2 Planta Sangüesa, Navarra

La planta de biomasa de Sangüesa fue pionera en el sur de Europa y ha constituido, desde su puesta en marcha en 2002, una referencia internacional sobre las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa para la generación de electricidad.

La planta tiene una potencia de 30,2 Mw y la tecnología empleada es la generación térmica a partir de paja de cereal. Esta planta es propiedad de ACCIONA Energía. Posee una producción media anual de 200 GWh, equivalente a la demanda de unos 60000 hogares. Se consumen 160000 toneladas de paja de cereal al año.



Figura 2.14 Planta Sagüesa, Navarra. Fuente: <http://www.accion-energy.com/es/areas-de-actividad/otras-tecnologias/biomasa/instalaciones-destacadas/planta-de-biomasa-de-sanguesa/>.



Figura 2.15 Esquema de la planta Sangüesa, Navarra. Fuente: <https://venzario.com/2009/03/07/plantas-de-biomasa-sanguesa/>.

2.4.2 Principales tecnologías españolas de gasificación.

Los principales desarrollos tecnológicos nacionales son los siguientes:

- Tecnología “Enamora” promovida por la empresa vasca GUASCOR BIOENERGÍA.

La principal fortaleza de esta tecnología es la baja concentración de alquitranes presentes en el syngas, debido a que se encuentran tan craqueados que condensan a bajas temperaturas (por debajo de 200 °C), de forma que pueden usarse tecnologías convencionales de extracción del material particulado como ciclones o filtros de mangas, sin el problema asociado a la condensación de estos compuestos.

Una vez eliminadas las cenizas en suspensión, se consigue condensar los alquitranes generados en el mismo punto en que se produce la condensación del vapor de agua que inevitablemente forma parte del proceso, arrastrando de esta forma la corriente de agua los alquitranes del syngas.

Parámetro	Valor
Energía eléctrica generada	14.985 MWh/año
Autoconsumo eléctrico en gasificación	1.100 MWh/año
Consumo de biomasa (10% humedad)	13.036 t/año
Tipo de biomasa (madera)	13.300 Tm

Tabla 2.1 Parámetros básicos de la planta de gasificación de enamora-guascor. Fuente: GUASCOR BIOENERGÍA, S.L.

- Tecnología “TAIM WESER”, compañía zaragozana.

Es una compañía líder mundial en los sectores de manutención, elevación, plantas de tratamiento de residuos y energías renovables.

Ha desarrollado un sistema de gasificación para astillas de biomasa lignocelulósica basado en la tecnología de corrientes paralelas o “drown draft”, de lecho móvil en corrientes descendentes.

Parámetro	Valor
Capacidad de la planta	8.400 t/año
Disponibilidad	7.500 h/año
Potencia eléctrica nominal	1.224 kW
Autoconsumo	12%

Tabla 2.2 parámetros básicos de la planta de gasificación de Taim Weser. Fuente: TAIM WESER.

- Tecnología "INERCO", empresa sevillana de ingeniería.

Se ha desarrollado un gasificador de 3MWt de potencia basado en la tecnología de lecho fluido burbujeante, para su empleo asociado a calderas de combustible de origen fósil, bien para usos térmicos o para generación eléctrica.

Los distintos tipos de biomasa probados en la instalación han sido pellets de madera, hueso y orujillo de aceituna, fracción orgánica de residuos urbanos y lodos de depuradora.

- Tecnología "CIDAUT", Fundación ubicada en Valladolid y muy vinculada al sector de la automoción y el transporte.

Compacto sistema para la valorización energética de la biomasa lignocelulósica aplicada a la cogeneración distribuida. No existe nada igual en el mercado, tanto por la tecnología de pequeño tamaño y concepción molecular.

El proceso de gasificación está basado en la tecnología de lecho fijo y corrientes paralelas constituidas por cuatro procesos básicos: secado, pirólisis, oxidación y reducción.

Existe un subsistema de limpieza que permite eliminar todas las impurezas contenidas en la corriente de gas previo a su alimentación a los motores (partículas, agua y otros compuestos nocivos para los motores).

2.4.3 Otras plantas de gasificación en el mundo.

2.4.3.1 Covanta- CLEERGAS

Covanta Energy es propietaria y operadora líder de instalaciones de WTE y actualmente posee y opera más de 40 instalaciones de WTE que procesan aproximadamente 20 millones de toneladas de residuos en 9 millones de megavatios / hora de energía cada año.

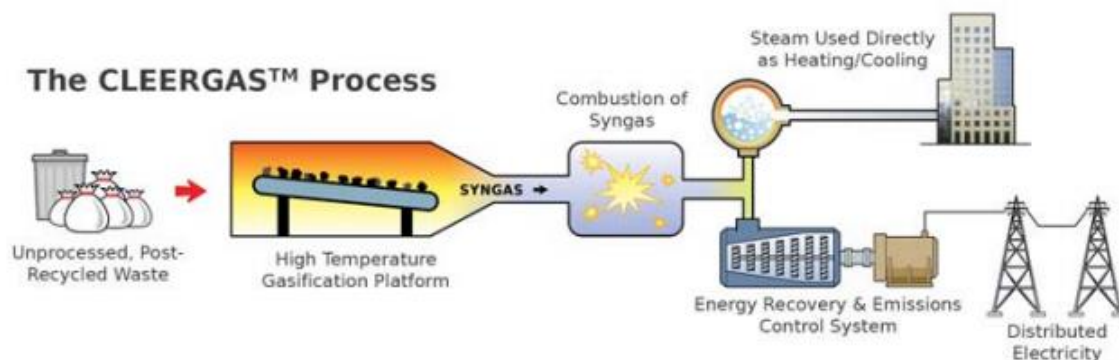


Figura 2.16 Diagrama del proceso CLEERGAS

Actualmente Covanta comercializa esta tecnología como un sistema modular de 300 toneladas por día, ha probado su tecnología en su sitio de instalaciones de WTE en Tulsa, Oklahoma y ha seleccionado recientemente a St. Lucie, Florida como un sitio para la instalación futura del sistema.

2.4.3.2 Enerkem

Con sede en Montreal, Canadá, esta empresa ha desarrollado un proceso termoquímico patentado para la producción comercial de etanol. Enerkem se ha clasificado el número 7 de las 50 compañías más calientes en Bioenergy 2011-2012 por Biofuel Digest.

El proceso de Enerkem implica la preparación de materia prima, gasificación, limpieza y acondicionamiento de gas de síntesis, y síntesis catalítica.



Figura 2.17 Planta Enerkem. Fuente: http://enerkem.com/wp-content/uploads/2014/10/Nouv-logo_D3S8151_369-2.jpg

Actualmente, Enerkem opera dos instalaciones de investigación y desarrollo:

- Sherbrook, Quebec (Canadá) - Planta piloto que opera desde 2003
- Westbury, Quebec (Canadá) - Instalación de demostración que funciona desde 2009 con

Capacidad de procesamiento de 1,3 millones de galones de etanol anualmente.

2.4.3.3 Coaltec Energy, Orleans

El principal componente de la tecnología de gasificación de Coaltec es un gasificador de lecho fijo de down-draft. Este diseño patentado es generacionalmente por delante de los sistemas alimentados con leña y está diseñado para soportar una variedad de combustibles, incluyendo estiércol y otras biomásas. La instalación de prueba a escala comercial, así como la experiencia que Coaltec ha ganado con el tiempo trabajando con una amplia variedad de combustibles y parámetros operativos, los distingue en la industria. Esta experiencia ha llevado al desarrollo de un nuevo y mejorado diseño patentado. La capacidad de controlar los parámetros operativos de la tecnología les permite formular diversos grados de biochar, lo que ofrece un valor económico y ambiental significativo a los proyectos. El proceso de gasificación tiene lugar en la unidad primaria, en un ambiente carente de oxígeno, controlando así la formación de óxido nitroso (NOx). El sistema de baja presión permite la gasificación sin ninguna o mínima cantidad de material particulado de la mayoría de los combustibles. El principal producto de la gasificación es el monóxido de carbono (CO), con algunos gases de hidrógeno y metano.



Figura 2.18 Vista lateral del gasificador y depósito de combustible. Fuente: COALTEC ENERGY

Una ventaja de esta tecnología en comparación con las alternativas es el rango aceptable de variaciones en la calidad y variedades de combustibles. El sistema funcionará fácilmente con combustibles que contienen 4.000 BTU / libra, y ha funcionado con combustibles que contienen más del 60% de humedad. Los sistemas de alimentación de combustible y de eliminación de cenizas del gasificador permiten el uso de combustibles con un tamaño de partícula de hasta 6 pulgadas.

3 OBJETIVOS

Los objetivos presentes en siguiente trabajo fin de grado son los siguientes:

- Caracterización físico-química de los residuos utilizados como biomasa.
- Análisis CHONSK de los residuos.
- Pretratamiento del residuo para experiencias de devolatilización.
- Estudio de la composición de los gases procedentes de un sistema de aprovechamiento de biomasa.
- Procedimiento para la determinación cuali-cuantitativa de los gases emitidos.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Caracterización de la biomasa

4.1.1 Hidrodestilación

En nuestro proceso se va adoptar el término de hidrodestilación, para definir el proceso para obtener el aceite esencial de la poda del olivar, mediante el uso del vapor saturado a presión atmosférica. El generador de vapor no forma parte del recipiente donde se almacena la materia prima, es externo y suministra un flujo constante de vapor. Su presión es superior a la atmosférica, pero el vapor efluente, que extrae al aceite esencial está a la presión atmosférica. La materia prima forma un lecho compacto y se desprecia el reflujo interno de agua debido a la condensación del vapor circundante.

El proceso de hidrodestilación se describe de la siguiente manera: la materia prima vegetal es cargada en una hoyo a presión, de manera que forme un lecho fijo compactado. El estado de la biomasa es cortado. El vapor de agua es inyectado mediante un distribuidor interno, próximo a su base y con la presión suficiente para vencer la resistencia hidráulica del lecho. La generación del vapor se realiza en una manta térmica. Conforme el vapor entra en contacto con el lecho, la materia prima se calienta y va liberando el aceite esencial contenido y éste, a su vez, debido a su alta volatilidad se va evaporando. Al ser soluble en el vapor circundante, es “arrastrado” hacia arriba.

El equipo está lleno de agua fría al inicio de la operación y el aceite esencial se va acumulando, debido a su casi miscibilidad en el agua y a la diferencia de densidad y viscosidad con el agua. Posee un ramal lateral, por el cual, el agua es desplazada para favorecer la acumulación del aceite.

El vapor condensado acompañante del aceite esencial es recogido en un matraz de fondo redondo, pasadas 7 horas. Posee una pequeña concentración de los compuestos químicos solubles del aceite esencial, lo cual le otorga un ligero aroma, semejante al aceite obtenido.



Figura 4.1 Proceso hidrodestilación poda del olivar

Una vez recogido la muestra que contiene hexano, agua y el aceite esencial, debemos añadir sulfato de magnesio anhydrous en una cantidad en la cual al agitarlo, la sal quede disuelta y la mezcla aparece un poco traslúcida.

Después vertemos la mezcla en un matraz de fondo redondo y lo introducimos en un rotovapor, para que se elimine el disolvente y nos quede solamente el aceite.

Para ver lo que ha ganado o perdido al eliminarse se tara previamente el matraz, el cual posee un peso de 51,65 g, y después de eliminarse el disolvente en el rotovapor se vuelve a pesar, el cual pesa 51,77 g. Por lo tanto podemos decir que ha ganado 0,12 g.

Para conocer el contenido en volátiles de la muestra tratada, con la cantidad de poda de olivar introducida en la hoyo y la cantidad ganada en el proceso anterior:

$$\text{Contenido en volátiles} = \frac{0,12 \text{ g}}{607,18 \text{ g}} \times 100 = 0,019 \%$$

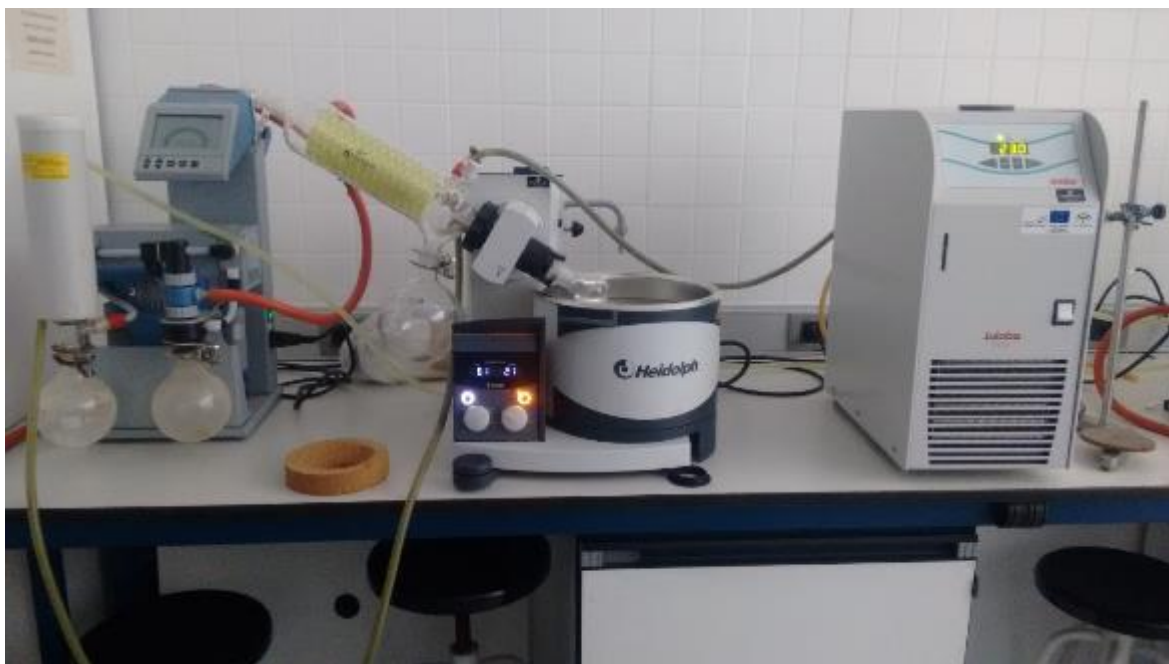


Figura 4.2 Rotovapor

4.1.1.1 Identificación componentes del aceite

La determinación del aceite esencial destilado se hizo mediante cromatografía de gases acoplada con espectrometría de masas (GC-MS).

El equipo utilizado fue un Focus GC-DSQ II GC-MS Thermo Scientific. El equipo consta de un cromatógrafo Focus II (Thermo Scientific) acoplado a un espectrómetro de masas DSQ II de cuadrupolo simple (Thermo Scientific). El cromatógrafo está equipado con un inyector split-splitless y una columna capilar DB-5 (30 m x 0.25mm, 0.25 µm film). El programa de temperaturas utilizado fue 100 °C (1 min) hasta 250 °C a 5°C/min. La temperatura del inyector a 280 °C y la línea de transferencia a 280°C. Las condiciones del espectrómetro de masas fueron: Impacto electrónico con una energía de ionización de 70 eV, temperatura de 200°C, un barrido de scan de 0.6 s (tiempo de ciclo 0.2s) y con un rango de masas de 40 a 450 amu. La identificación se hizo mediante su coincidencia con las bases de datos NIST y Wiley 275L, además de, en algunos casos, la coinyección con patrones.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1.

RESULTADOS COMPUESTOS DEL ACEITE, OBTENIDO MEDIANTE HIDRODESTILACIÓN, POR CROMATOGRAFÍA	
Nombre	% Abundancia
Pyridine, 4-ethenyl	1,14
5-ETHYL-2-METHYL-PYRIDIN-4-YLAMINE	2,07
DELTA.3-Carene	1,87
Nonanal	5,65
trans-p-Mentha-1(7),8-dien-2-ol	1,22
TRANS-2-CAREN-4-OL	1,36
cis-Carveol	1,7
Bicyclo[3.1.1]hept-2-en-6-ol, 2,7,7-trimethyl-, acetate	3,02
trimethyl-tetrahydronaphthalene	1,42
2,9-Heptadecadiene-4,6-diyn-8-ol, (Z,E)	2,89
Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-1,5,7-trimethyl-	3,8
1,4,4,7a-Tetramethyl-2,4,5,6,7,7a-hexahydro-1H- indene-1,7-diol	1,65
trimethyl-tetrahydronaphthalene	1,12
1H-Indene, 2,3-dihydro-1,1,5,6-tetramethyl	2,51
7,7-D2-ANDROST-5-EN-3á-OL	4,23
p-Carbomethoxy benzaldehyde	4,14
2-BUTEN-1-ONE, 1-(2,6,6-TRIMETHYL-1,3- CYCLOHEXADIEN-1-YL)-	16,43
Naphthalene, 1,2-dihydro-2,5,8-trimethyl-	1,25
Naphthalene, 1,2-dihydro-1,4,6-trimethyl-	2,51
á-Damascone	6,64
cis-(-)-2,4a,5,6,9a-Hexahydro-3,5,5,9- tetramethyl(1H)benzocycloheptene	8,53
à-Humulene	2,31
trans-á-Ionone	1,41
methyl 4,4,7-trimethyl-4,7-dihydroindan-6- carboxylate	9,24
Nerolidol	4,38
Isoelemicin	1,22
Hexadecanoic acid	2,01
Tetratriacontane	1,06
Triacontane	1,12
9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	2,1
TOTAL % ABUNDANCIA	100

Tabla 4.1 Compuestos mayoritarios aceite esencial

4.1.2 Caracterización contenido en humedad

En cuanto a la humedad de la materia a gasificar, valores del 10 al 15% son los más adecuados. En general, la humedad facilita la formación de hidrógeno, pero reduce la eficiencia térmica.

A la muestra a tratar se le ha determinado el contenido en humedad, debido a la importancia de contenido en agua para procesos posteriores. Esta característica influye sobre el balance térmico del proceso y la composición del gas de salida.

Es importante destacar que la poda de olivar estaba muy seca, por lo que los contenidos en humedad no han sido muy elevados. Una biomasa muy seca es más costosa en términos energéticos y económicos. Se van a realizar diferentes medidas hasta que el porcentaje en pérdidas de humedad se estabilice.

En primer lugar se pesan 100 g de poda en un vaso de precipitado. Esta poda se introduce en una estufa a 80 °C, y se dejan durante 24 horas. Se introducen tres muestras individualmente en la misma estufa.



Figura 4.3 Muestra poda olivar



Figura 4.4 Estufa

Al cabo de este tiempo se vuelve a pesar la muestra para ver qué % de humedad se ha perdido. Durante estas 24 horas las muestras no estaban estabilizadas, por lo que se vuelven a dejar en la estufa y pasadas 72 horas se vuelven a pesar. Pasado este tiempo, vemos que los datos obtenidos de la primera medida y de la segunda medida eran prácticamente iguales. Por lo tanto, la poda de olivar ya no va a perder humedad. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.2.

Humedad poda olivar			
1ª Medida		2ª Medida	
Pasadas 24 h		Pasadas 72 h	
Número Muestra	% Pérdidas	Número Muestra	% Pérdidas
1	8,46	1	9
2	9	2	9
3	8,5	3	8,55
Media % Pérdidas	8,65	Media % Pérdidas	8,85

Tabla 4.2 Tabla % pérdidas humedad poda olivar

4.1.3 Tamaño de partículas

El tamaño y homogeneidad del lecho es una variable crucial para que la cinética química sea la adecuada. Un tamaño de partícula pequeño permite aumentar la calidad del syngas, trabajar con reactores más pequeños o por ejemplo, aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas como son los alquitranes. Si el tamaño es excesivamente pequeño, aumenta la densidad y puede originar la obstrucción de los conductos o su migración con las cenizas al exterior antes de tiempo.

Se han realizado tres medidas para caracterizar el tamaño de partícula de la poda del olivar. En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos por los diferentes tamices, en los cuales se puede observar una media de la cantidad de biomasa retenida en cada luz de malla, así como el %. Las medidas se han realizado con muestras de 100 g, las cuales han sido cribadas manualmente por la batería de tamices cuya luz de malla se muestra en la tabla 4.3.

Tamaño de partículas biomasa							
1º Medida		2º Medida		3º Medida		Media cada tamiz (g)	%
Luz (mm)	Medida (g)	Luz (mm)	Medida (g)	Luz (mm)	Medida(g)		
50	0,44	50	0	50	1,2	0,55	0,55
40	0,15	40	6,83	40	4,85	3,94	3,95
32	2,55	32	10,78	32	4,7	6,01	6,01
25	1,93	25	3,72	25	5,8	3,82	3,82
20	2,85	20	4,26	20	6,2	4,44	4,44
12,5	12,36	12,5	9,55	12,5	26,03	15,98	15,99
10	11,94	10	9,25	10	11,43	10,87	10,88
6,3	21,42	6,3	21,04	6,3	16,93	19,80	19,81
5	20,16	5	16,59	5	10,36	15,70	15,71
< 5	25,99	< 5	18	< 5	12,56	18,85	18,86
Total medida (g)	99,79	Total medida (g)	100,02	Total medida (g)	100,06		
TOTAL MEDIA						99,96	100

Tabla 4.3 Tamaño partículas biomasa

Como vemos el tamaño medio está entorno al 100 μm , tendremos que arrancar el sistema para ver si es el adecuado para nuestro diseño de gasificador. Los datos bibliográficos apuntan a un tamaño mínimo de 2-4 μm , pero no hay un máximo descrito.

4.1.4 *Contenido graso*

La presencia de grasas en la biomasa condiciona la composición y cantidad total de cenizas así como a la posible emisión de alquitranes. En nuestro caso, estudiamos cualitativamente su composición con el objetivo de conocer si era necesaria una extracción previa. La presencia de unas concentraciones elevadas de cenizas implica una pérdida de PCI por absorción de calor, además de obstrucción de filtros o erosión de las conducciones.

La determinación del contenido graso de nuestra biomasa se ha realizado mediante extracción con Soxhlet. En este procedimiento la muestra sólida de biomasa, con un peso de 65,15 gramos, se coloca en un cartucho de material poroso (papel de filtro) que se sitúa en la cámara del extractor soxhlet. Como disolvente se ha utilizado hexano. Se calienta el disolvente extractante, situado en el matraz, se condensan sus vapores que caen, gota a gota, sobre el cartucho que contiene la muestra, extrayendo los analitos solubles. Cuando el nivel del disolvente condensado en la cámara alcanza la parte superior del sifón lateral, el disolvente, con los analitos disueltos, asciende por el sifón y retorna al matraz de ebullición. Este proceso se repite hasta que se completa la extracción de los analitos de la muestra y se concentran en el disolvente. El proceso estuvo en funcionamiento durante 4 horas.

Por último, una vez que se ha procedido a la extracción con soxhlet, introducimos el matraz de fondo redondo en un roto-vapor para eliminar el disolvente y obtener el graso contenido en la biomasa. El graso contenido en una muestra de 65,15 gramos es de 0,39 gramos. Por lo tanto podemos obtener el porcentaje característico del graso de nuestra biomasa:

$$\text{Contenido graso} = \frac{0,39 \text{ gramos de graso}}{65,15 \text{ gramos muestra de biomasa}} \times 100 = 0,599 \%$$



Figura 4.5 Procedimiento mediante extracción con soxhlet.

Con los datos obtenidos, ($<1\%$ p/p) indican que la biomasa procedente de poda de olivar es óptima en cuanto a la prevención de impurezas post-combustión (alquitranes).

4.2 Análisis CHONSK de la biomasa

Un análisis elemental de la biomasa permite optimizar cantidad de aire u oxígeno que es necesario introducir como primera aproximación que se contrastará en la práctica.

El análisis elemental de la biomasa se ha realizado a través de los Servicios Técnicos de la Universidad de Jaén. Los resultados de la muestra de poda de olivar se muestran en la siguiente tabla:

Sample Name:	Nitrogen %	Carbon %	Hydrogen %	Sulphur %	Water %	Oxygen %
PODA OLIVAR	1,3408	45,0895	6,4941	0,0000	8,6500	38,4256
	1,3735	45,4028	6,4874	0,0000	8,8500	37,8863
MEDIA %	1,3572	45,2461	6,4908	0,0000	8,7500	38,1560

Tabla 4.4 Resultados Análisis Elemental biomasa.

Los resultados han sido obtenidos mediante un analizador elemental automático CHNS-O.



Figura 4.6 Analizador elemental automático CHNS-O.

Es un Analizador Elemental modelo Flash EA1112 CHNS-O de Thermo Finnigan que permite el análisis químico cuantitativo de Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno, Azufre y

Oxígeno en muestras sólidas o líquidas, en un rango de concentraciones que abarca desde el 0.01% (100 ppm) al 100% del contenido total del elemento presente en la muestra.

El equipo dispone de dos canales, uno para la determinación NCHS y otro para la determinación de O, por los que, de forma continua y prefijada, pasa un flujo de He que actúa como gas portador. En cualquier configuración del equipo, uno de los canales actúa como canal analítico y el otro como canal de referencia. El canal analítico está conectado a un reactor de cuarzo, relleno de un material apropiado para cada tipo de determinación, que queda alojado dentro de un horno. Para la separación de los compuestos gaseosos resultantes, el equipo está dotado de columnas cromatográficas específicas para la determinación NCHS y O, alojadas en un horno a una temperatura de unos 65°C, cada una de las cuales a su vez está conectada a uno de los canales del detector de conductividad térmica.

El recurso está dotado del software necesario (software de interface de usuario Eager 300) para la selección de las condiciones de análisis y para la adquisición, tratamiento y evaluación de los datos obtenidos.

El equipo dispone de un muestreador para la introducción automatizada de muestras y para la pesada de muestras el recurso cuenta con una microbalanza electrónica Mettler Toledo MX5 con un rango de pesada hasta 5,1 gramos y una precisión de +/- 1µgramos.

4.3 Medida de la composición del syngas

La composición del syngas, determina la viabilidad global del gasificador ya que condiciona su poder calorífico. De ahí que determinar la composición del gas generado en el proceso es una prioridad.

En nuestro caso al gasificar con aire parte de la biomasa sufre combustión por la presencia de oxígeno y el resto se reduce para obtener el combustible deseado (H₂). La presencia de humedad en la biomasa aporta vapor de agua al sistema mejorando la proporción de hidrógeno en el syngas y por tanto del poder calorífico. En general, cuando se utiliza aire como gasificante, el 50% del syngas es nitrógeno y, en términos de poder calorífico, el gas ronda los 5,5 MJ/Nm³. Los valores estándares para gasificación mediante aire oscilan entre los siguientes rangos:

Compuesto	Composición %
N_2	50 - 55
H_2	12 - 15
CO	15 - 20
CO_2	8 - 15
CH_4	2 - 5
C_2H_6	1

Tabla 4.5 Valores estándar para gasificación

En principio este era el objetivo del proyecto, pero la excesiva emisión de alquitrán en el gas final, causando ensuciamiento y corrosión en todo el sistema (Devi, 2003) nos hizo imposible hacer las mediciones. Se denominan alquitranes a los compuestos orgánicos que se forman durante la etapa de devolatilización en el proceso de gasificación. Se generan como productos de pirolisis y reacciones secundarias tales como craqueo, polimerización, etc. Básicamente están formados por aromáticos (benceno, naftaleno,...), heterociclos, hidrocarburos poliaromáticos, etc. En nuestro caso, al no estar el sistema apunto, ni optimizada la alimentación de aire, la variabilidad de los compuestos nos hace que tanto la fracción a estudio (hidrógeno, monóxido carbono, agua, metano,...) como la propia composición de alquitranes está muy condicionada a su puesta a punto y ajuste de las temperatura, ya que el craqueo aumenta a temperaturas superiores (700-800°C)

En cualquier caso hemos propuesto dos vías alternativas para hacer las medidas.

También es importante tener en cuenta que esta biomasa procedente de la poda, presentan bajas cantidades de material inorgánico, aunque después de los primeros ensayos, si aparecen cantidades importantes de cenizas en las que es interesante medir su composición ya que se pueden transformar en contaminantes (partículas, HCl, SOx y NOx), durante el proceso de combustión.

Nuestra propuesta para la medición de la composición incluye tanto un procedimiento en discontinuo como otro on-line. Éste último mediante el uso de un equipo portátil para la medición del metano, dióxido de carbono y monóxido.

El sistema discontinuo nos va a permitir medir tanto los componentes volátiles como otros más complejos tales como alquitranes, partículas y otros contaminantes que pueden formar parte del gas como son el amoníaco, el ácido cianhídrico, el ácido sulfhídrico y el ácido clorhídrico, pensamos en un sistema discontinuo.

A. Sistema discontinuo

La toma de muestra (Figura 4.7) se hará a través del mecanismo que se muestra en la imagen. Es posible conectar dos salidas independientes una para el muestreo de alquitranes y partículas y otra tanto para gases como para sustancias inorgánicas (NH_3 , HCN , SH_2 y ClH) e hidrocarburos de bajo peso molecular.

La sonda de muestreo está diseñada y construida como se recomienda en la especificación técnica de toma de muestra de alquitranes y partículas [CEN/TS, 2006].

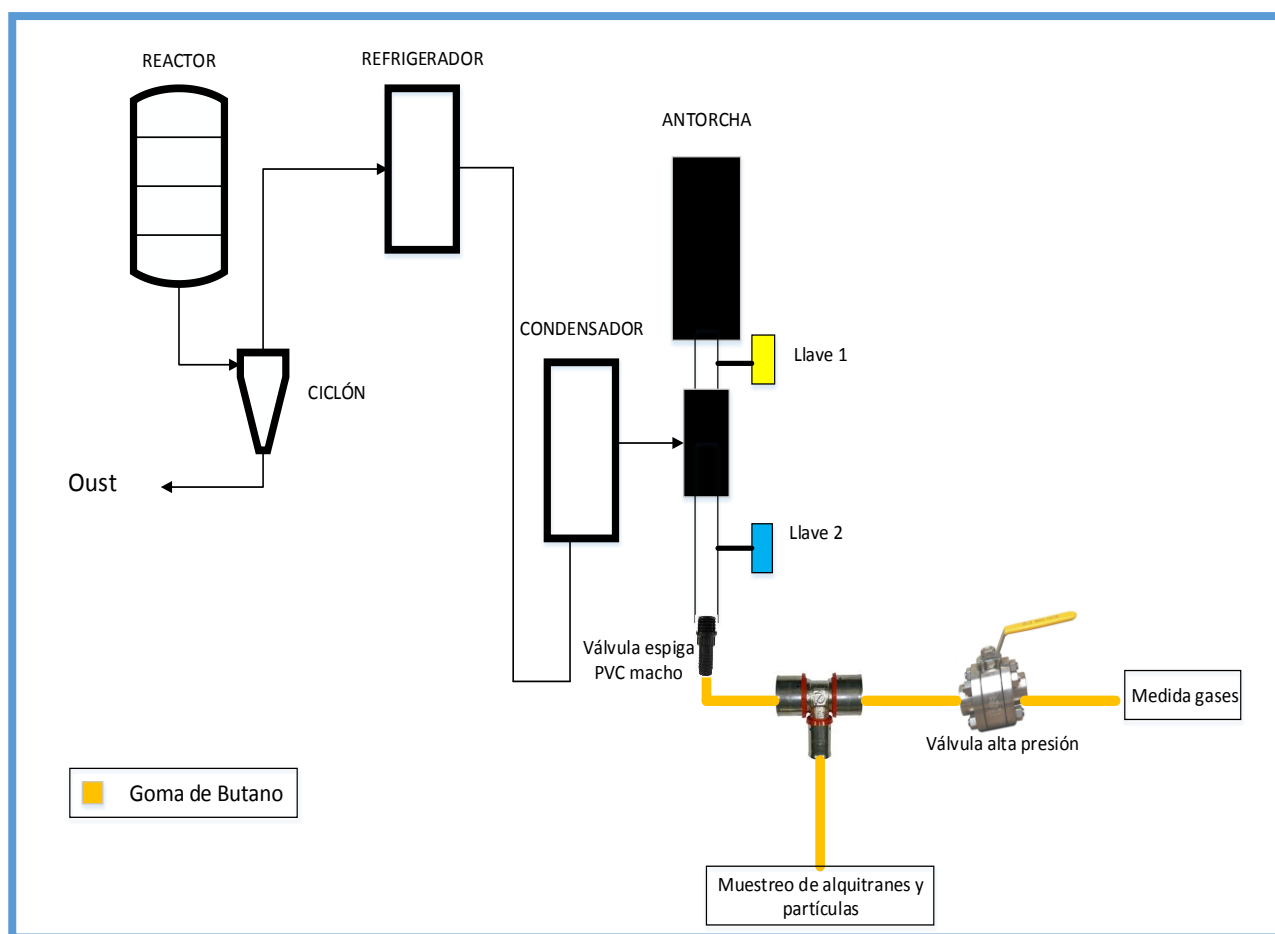


Figura 4.7 Sistema medición de gases

La conexión entre la sonda de muestreo y el desgasificador se hace mediante un tubo flexible, capaz de soportar la temperatura de trabajo. El gas pasa en primer lugar por un condensador que opera con agua de red, en el que se realiza una condensación previa del gas, recogiendo parte de la humedad y de los alquitranes condensables. A la salida del condensador, el gas pasa a través de tres borboteadores que contienen isopropanol

(50 ml). Los dos primeros sumergidos en un baño de agua con hielo (0 °C) y el siguiente están en un baño con anticongelante y una máquina de refrigeración (unos -20 °C). La instalación continua con el paso del gas a través de un lecho de Tenax GC (para la de metano y VOC's además de trazas de alquitrán no capturadas) y de la unidad de control. En el extremo del sistema se instala una bomba de vacío para evitar la estanqueidad del sistema.

Al final de la serie se van a introducir bolsas de teflón de 25 l que una vez llenas, se cierran herméticamente para su posterior análisis mediante GC-FID y GC-ECD. Para ello utilizaremos una macrojeringa (10 ml) con adaptador de microjeringa, para su inyección en el bloque de inyección de un cromatógrafo de gases con inyector split-splitless. En nuestro caso se hará mediante la inyección directa en un GC Varian 3500 CX, equipado con una columna de 0,53 mm HP-1 megabore. En el detector de conductividad (ECD) se determinan gases como el CO , H_2 , CO_2 , CH_4 y N_2 , entre otros. En el detector FID se caracterizan el resto de hidrocarburos no condensables, tales como C_2H_4 , C_2H_6 y C_3H_6 .

B. Sistema on-line

La segunda propuesta es utilizar un sistema de medida y cuantificación de gases. DX4040. El equipo pertenece al grupo de investigación de J. Ramón Verdú, del CIBIO de la Universidad de Alicante, que se ha ofrecido para hacer la calibración del equipo (mediante N_2) y que nosotros hagamos las medidas.



Figura 4.8 Equipo medida y cuantificación de gases.

El proceso de medición no requiere más que introducir a través de la válvula de la zona de toma de muestras de los gases, un tubo de Tycon que mediante una bomba incorporada a través de un filtro de partículas se introduce los gases en el analizador. El

analizador opera en modo continuo, entregando promedios ponderados en el tiempo de duración definibles por el usuario entre un segundo a cinco minutos. Simultáneamente podemos medir CO_2 , CH_4 , CO y H_2O y mediante un consumible aún no incorporado, el H_2 procedente de la gasificación.

El equipo posee un software Calcmeter-Pro, que mediante un algoritmo matemático y un software de refinado permite la cuantificación en tiempo real de estos y hasta un total de 50 gases distintos.

4.4 Componentes del Gasificador

En primer lugar, vamos a mostrar un esquema gráfico del gasificador con el objetivo de situar la zona de toma de muestras de los gases. La medida de los gases se va a realizar después del sistema de limpieza (ciclón, refrigerador y condensador).

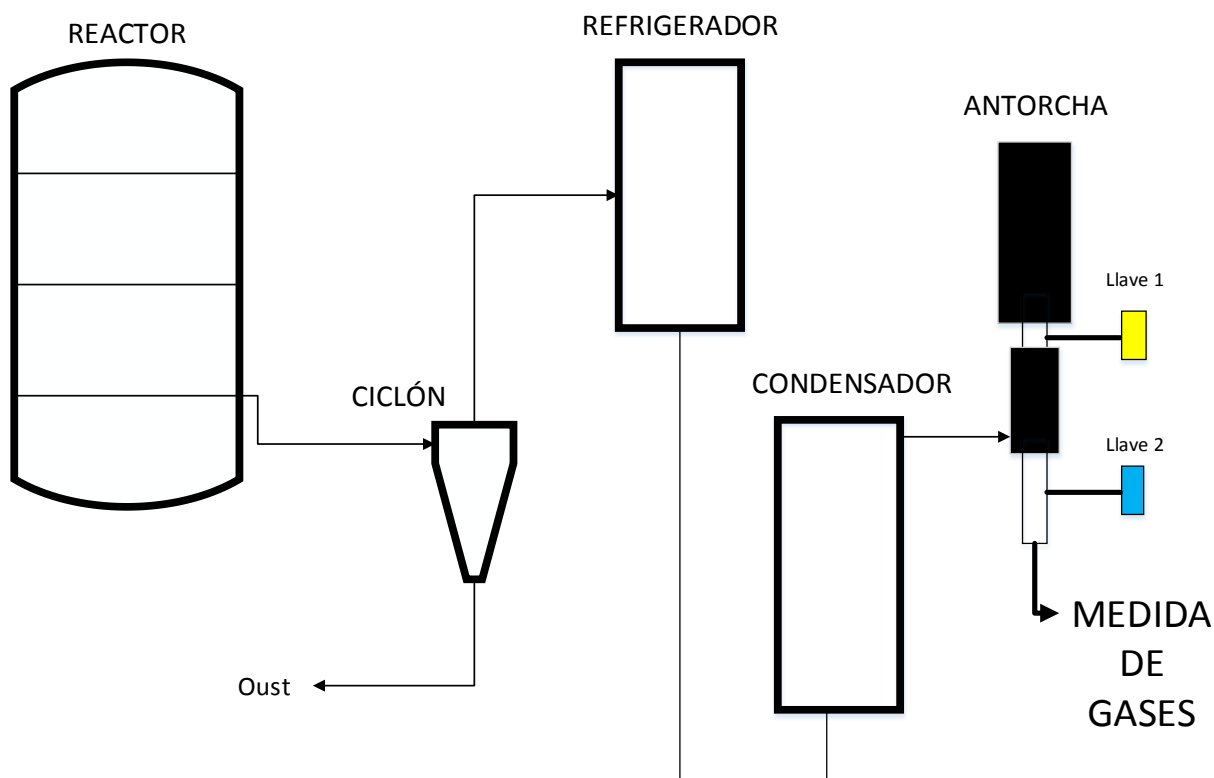


Figura 4.9 Esquema gráfico del gasificador para la medida de gases

A continuación vemos una serie de imágenes correspondientes a las diferentes partes que posee el gasificador.



Figura 4.10 Imagen principal gasificador

El gasificador que nos ocupa es un equipo robusto y de tecnología Downdraft o de flujo descendente. Cabe destacar que este equipo está diseñado para usos didácticos. Existen varias partes muy significativas, las cuáles se van a mostrar en las siguientes imágenes.



Figura 4.11 Exterior e interior del Hopper.

En la parte superior de esta imagen se encuentra el Hopper. Esta zona está diseñada para introducir la biomasa. Está prevista de una compuerta superior de entrada de biomasa, la cual debe estar cerrada durante su encendido para evitar la entrada de aire.

Por otro lado, en la zona inferior al Hopper nos encontramos con el lecho fijo. Está provisto de un orificio por el cual introducimos la llama de nuestro soplete para que se produzca la ignición de la biomasa que contiene el Hopper.

Por último, la zona inmediatamente por debajo del lecho, está constituida por un tamiz en el cual se van cribando las cenizas y van descendiendo las cenizas sobrantes tras el proceso de gasificación.

El compartimiento para cenizas se muestra en la imagen 4.12, el cual también debe estar cerrado durante el encendido del gasificador y deberá vaciarse cuando sea oportuno.



Figura 4.12 Compartimiento para cenizas cerrado.



Figura 4.13 Compartimiento para cenizas abierto.

Por la parte trasera del Hopper se encuentra un pequeño motor, figura 4.14. Este es el encargado de agitar la biomasa contenida dentro del Hopper.



Figura 4.14 Motor para agitar biomasa Hopper.



Figura 4.15 Ciclón y depósito de cenizas.

Los ciclones son separadores inerciales formados en su cuerpo por un tubo cilíndrico, en el que entran los gases a depurar de forma tangencial por un conducto en forma de voluta. Debido a la trayectoria que se ve obligado a seguir el gas, las partículas se ven sometidas a una fuerza centrífuga que, al cabo de un cierto número de vueltas, las hacen chocar contra las paredes y depositarse en la parte inferior. Esta es la zona inferior de la imagen, donde tenemos el depósito de cenizas procedentes del ciclón.



Figura 4.16 Interior depósito cenizas del ciclón.

Junto al ciclón nos encontramos una sopladora o soplante. Ésta es la encargada de suministrar el aire necesario al Hopper para que se produzca la gasificación. Es importante destacar que en función de la cantidad de aire suministrada por la soplante se podrán producir tanto combustión, como gasificación o pirólisis.



Figura 4.17 Sopladora o soplante.



Figura 4.18 Interior zona refrigeración

El gasificador consta con un intercambiador con una refrigeración por tubos con aire. En esta zona el gas producido en la gasificación de la biomasa reduce su temperatura. Este gas después de ser refrigerado pasa a un condensador mostrado en la figura 4.19. Se denomina condensador porque el syngas disminuye su temperatura hasta valores

inferiores a 100 °C y se producen precipitados en forma líquida llamados también condensados.



Figura 4.19 Refrigerador o condensador

Por último, hay dos zonas por donde puede salir el syngas. En primer lugar la imagen 4.21 corresponde a la antorcha. Por aquí es donde salen los humos con partículas combustibles. La segunda zona es utilizada para medir los gases además de ser la tubería de entrada al motor de gas. El motor de gas o grupo electrógeno es capaz de generar 3-3,5 kW de potencia eléctrica pico continua en modo syngas.



Figura 4.20 Grupo electrógeno o motor de gas



Figura 4.21 Antorcha

4.5 Propuestas de medición de gases

En la salida de medida de gases (figura 4.9), después del sistema de limpieza, con el gas con el menor número de partículas y alquitranes, vamos a ubicar la toma de muestras tanto del análisis on-line de H_2 , CH_4 , H_2O , CO y CO_2 , como las discontinuo de contaminantes inorgánicos (NH_3) y gases permanentes no medidos on-line (C_2H_4 , y C_2H_6 principalmente).

El analizador de gases consta de una secuencia de borboteadores con agua para eliminar potenciales sustancias que puedan afectar a la medida y acondicionar los gases a temperaturas admisibles para los distintos módulos de análisis de los que consta. Se utiliza medida mediante infrarrojo no dispersivo para el CH_4 , CO y CO_2 , conductividad térmica para el H_2 y una célula electroquímica para el O_2 . Tras la medida de la composición de gases, se procede a la monitorización y registro del caudal por medio de un rotámetro

5 DISCUSIÓN

5.1 Primer día de arranque

En el primer día de arranque se ha utilizado como biomasa poda de olivar. Se han introducido en el hopper 4,80 kg de poda. Durante el arranque surgieron diversos problemas que desconocíamos.

En primer lugar, durante el proceso de encendido en el Hopper, el tiempo para que se produjera la ignición fue muy elevado del orden de 30 minutos. En condiciones normales debería haberse producido la ignición en 5 minutos. Una vez producida la ignición, el gas sale por la antorcha. Para que el proceso sea correcto este gas de salida de la antorcha debería encenderse con facilidad mediante un soplete. En nuestro caso no podíamos encender la llama. Esto fue debido a que por la antorcha solo salía humo y nada de combustible. La temperatura de salida del gas fue de 40 °C.

Al cabo de 30 minutos del encendido del gasificador, como consecuencia del tamaño de partícula de la biomasa y que la cantidad de aire no era la adecuada la temperatura en el reactor (heart zone) no era lo suficiente y los productos de la llama han sido más de pirólisis que de gasificación.



Figura 5.1 Salida gases por la antorcha

5.2 Segundo día de arranque

En el segundo día de arranque, la poda de olivar del día anterior solo se había reducido en 1 kg. Por tanto el gasificador poseía una cantidad de biomasa de 3,80 kg.

Se procedió al encendido del gasificador con la biomasa que contenía el Hopper. La situación era prácticamente igual al día anterior. El motivo de arrancar el gasificador con menos cantidad de poda fue para que la ignición se produjera con mayor cantidad de oxígeno y no produjera tanto alquitrán.

Una vez arrancado el gasificador, la llama no se podía encender y la cantidad de humos fue mayor. La temperatura de salida del gas por la antorcha fue de 47 °C.

Se decidió vaciar el Hopper y solo había hoja. Ese fue el motivo principal por el que no podíamos encender la llama, técnicamente el gasificador creaba un gas demasiado pobre.

Por lo tanto, para obtener una mayor cantidad de astillas de poda olivar se realizó una clasificación de nuestras y prepararlas para el siguiente día de arranque.



Figura 5.2 Pesada astillas poda olivar



Figura 5.3 Tamaño partículas poda olivar

5.3 Tercer día de arranque

En el tercer día de arranque se utilizó como biomasa la madera o astillas anteriormente clasificadas. Se introdujeron 5, 20 kg en el Hopper.

Se procedió al encendido del gasificador y teníamos los mismos problemas, la ignición tardaba mucho en producirse. Se llegó a la conclusión de apagar la soplante durante el encendido con la soplante, después de 5 minutos se activó la soplante y el gasificador arrancó.

Por la antorcha los humos eran menos densos que en días anteriores y el olor era distinto a los primeros días. Pasados los 10 minutos empezó a desprender alquitrán y la temperatura de salida fue de 50 °C.



Figura 5.4 Salida gases antorcha

Hay que introducir una soplante que introduzca mayor cantidad de aire ya que este gasificador está diseñado para otro tipo de tamaño de partícula. El tamaño de partícula debe ser similar al del pellets de madera o chips.

Después de estos tres días de arranque con poda de olivar se va a proceder a la limpieza del gasificador para introducir otro tipo de combustible para ver si podemos lograr el proceso de gasificación. La limpieza es importante por la cantidad de alquitrán que se ha desprendido durante los días de arranque.

5.4 Limpieza del gasificador

El hopper del gasificador se ha desmontado para limpiar de cenizas y alquitrán y poder introducir otro combustible. A continuación se van a mostrar una serie de imágenes correspondientes a las distintas partes que posee la parte del Hopper del gasificador.



Figura 5.5 Gasificador sin Hopper



Figura 5.6 Zona de combustión e inyectores cubierta de cenizas



Figura 5.7 Tamiz giratorio cubierto de cenizas



Figura 5.8 Depósito cenizas del ciclón



Figura 5.9 Total de cenizas recogidas

Como podemos observar la cantidad de cenizas es elevada. En este equipo de gasificación didáctico, si se logra la gasificación, las cenizas serán más escasas a las mostradas en la imagen.

Aprovechando que desmontamos el gasificador, para asegurar el proceso de ignición en el encendido, hemos introducido un lecho de briquetas de carbón vegetal, alrededor de unos 11 kg. En las siguientes imágenes podemos observar el tamaño de partículas para que el carbón actúe como lecho fijo.



Figura 5.10 Tamaño partículas carbón vegetal



Figura 5.11 Lecho de carbón vegetal

En esta imagen es importante destacar que faltan otros 2 kg de carbón vegetal ya que el carbón debe estar por encima de los colectores, donde entra la llama del soplete para la ignición. El motivo de visualizar así el lecho es para observar la cantidad de colectores ya que estos también pueden ser modificados.

5.5 Cuarto día de arranque

En el cuarto día de arranque se utilizó como biomasa pellets. Debido a que la poda debe ser picada a chips de madera y no teníamos picadora de ese tamaño. Por ello, si la poda no se picaba a este tamaño el reactor producía mucho alquitrán. Se introdujeron 10 kg de pellets sobre un lecho de carbón vegetal, adicionado durante la limpieza del gasificador.

Para el arranque el flower se desconectó, se introdujo el soplete por el orificio de la zona de reducción. El gasificador arrancó como se muestra en la siguiente figura.

La cantidad de alquitranes se redujeron respecto a los demás días de arranque. Los humos poseían un color y olor distintos, eran más propios de un proceso de gasificación. Es importante destacar que durante los primeros 40 minutos solo se apreciaban humos

blancos y la antorcha no encendía ya que no salían combustible. Pasada una hora la antorcha encendió correctamente. Tardó demasiado tiempo en encenderse porque en la zona de llama de soplete estaba el lecho de carbón vegetal. La combustión se produjo primero en el lecho de carbón vegetal, a medida que éste se iba convirtiendo en cenizas la biomasa iba disminuyendo y entrando en la zona de pirólisis y combustión.



Figura 5.12 Salida de gases por la antorcha

La temperatura de salida de los gases se midió mediante una sonda de temperatura. La temperatura alcanzada por los gases fue de 44 °C.



Figura 5.13 Medida de la temperatura de los gases

A continuación se va a mostrar un gráfico temperatura-días de arranque para todas las medidas de puesta en marcha anteriores:

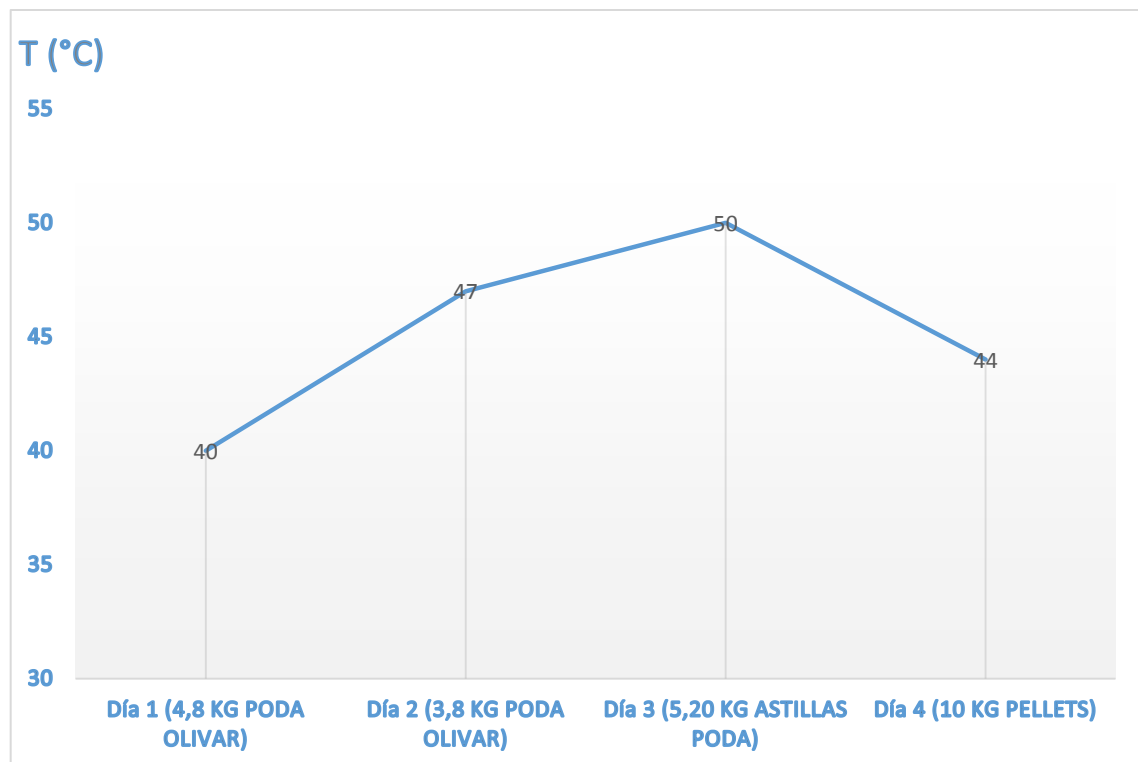


Figura 5.14 Temperaturas de salida del gas producto

Según el fabricante del gasificador, la temperatura del gas producto debe estar en torno a 40 – 50 °C. Por lo tanto, podemos decir que durante los ensayos de arranque se ha cumplido con las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante.

5.6 Modelado y simulación con el software cycle tempo

5.6.1 Modelado y simulación poda de olivar

Durante los primeros arranques del gasificador se ha observado la gran cantidad de alquitrán que se genera. Estas partículas de alquitrán son muy perjudiciales para los motores y cualquier aparato de medida ya que causa corrosión.

Esto se debe a dos motivos principales:

- 1- La cantidad de aire que introduce el soplador en el reactor no es la suficiente.
- 2- La biomasa no reúne las condiciones de tamaño adecuadas.

Por tanto lo que se produce es una pirólisis y el producto resultante mayoritario es alquitrán. Por tanto se va a realizar una simulación para ver la cantidad de aire necesaria para que se produzca el proceso de gasificación correctamente. Lo importante es que el reactor en el anillo, en su zona de combustión, alcance una temperatura mínima de 800 °C para que el contenido en alquitrán se minimice (Vera et al., 2011) (Vera, 2013).

A continuación se va a exponer la simulación cycle tempo y se van a explicar cada uno de los elementos que constituyen el reactor.

Es importante destacar que el fabricante del gasificador, lo ha fabricado para que produzca 3kW eléctricos. De acuerdo con el artículo “Study of a downdraft gasifier and externally fired gas turbine for olive industry wastes”, en el cual se obtendrán datos para la posterior simulación y calcular los kW de entrada (biomasa).

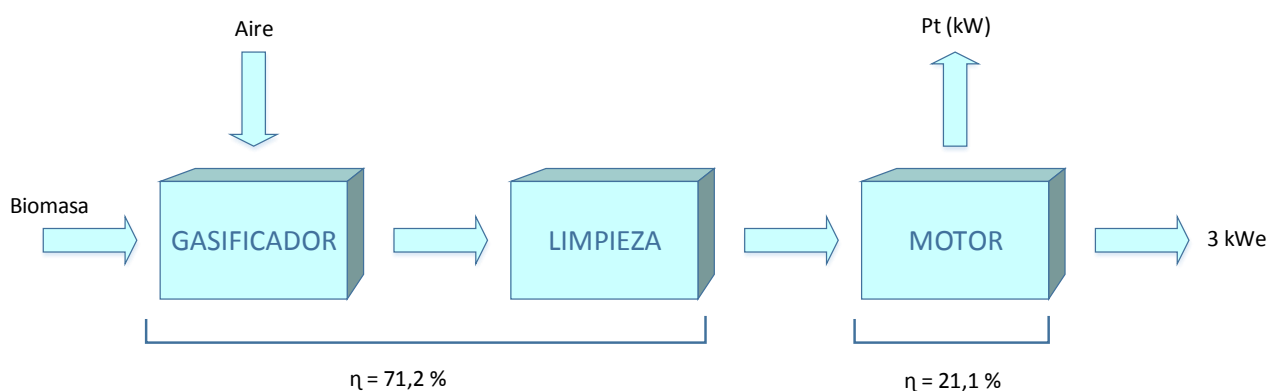


Figura 5.15 Diagrama bloques para simulación gasificador. Fuente: (Vera, 2011)

De acuerdo con los datos reales obtenidos a partir del artículo (Vera et al., 2013) la potencia térmica de entrada en la biomasa se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$P_t = \frac{P_e}{\eta_{motor} \times \eta_{limpieza} \times \eta_{gasificador}}$$

Donde el valor del rendimiento del motor de gas funcionando con gas de gasificación se ha estimado en un 21,1% y el rendimiento conjunto del gasificador mas el sistema el limpieza en un 71,2% (Vera et al., 2013).

$$P_t = \frac{3 \text{ kWe}}{0,211 \times 0,712} = 19.97 \text{ kW}$$

Una vez calculados los datos anteriores procedemos a realizar y a exponer la simulación y los datos de entrada obtenidos. En la siguiente imagen podemos observar el entorno de simulación del reactor con todos sus elementos. Con posterioridad se comentaran específicamente cada uno de ellos.

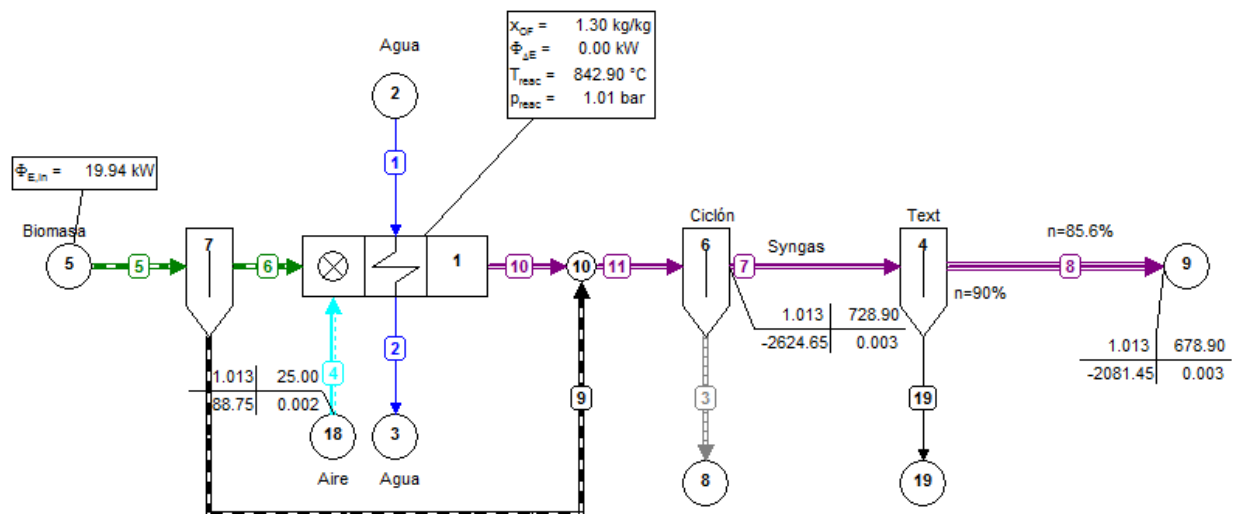


Figura 5.16 Entorno simulación reactor desarrollado en software cycle-tempo.

5.6.1.1 Modelado y simulación del reactor

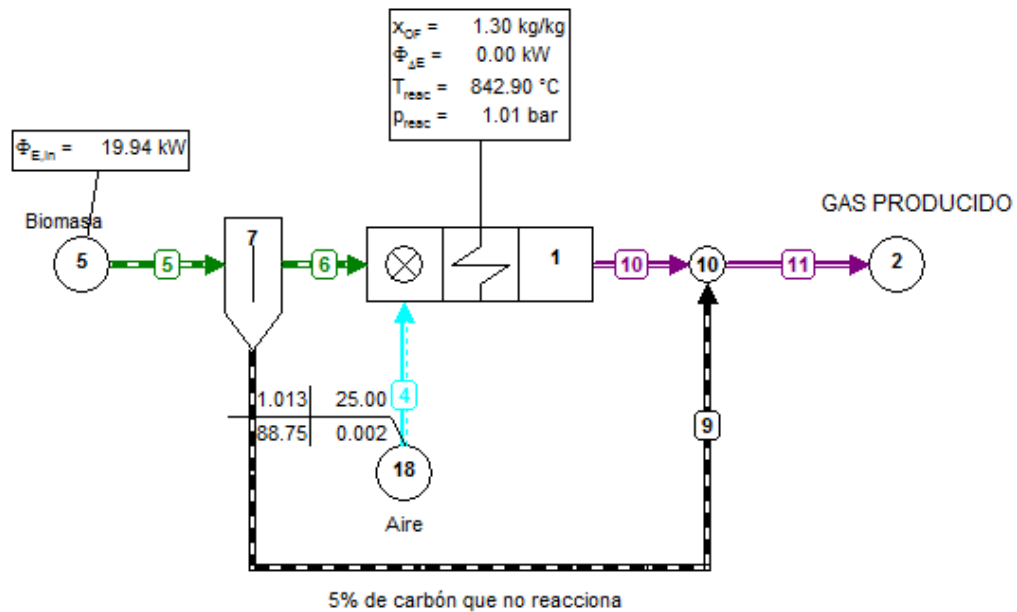
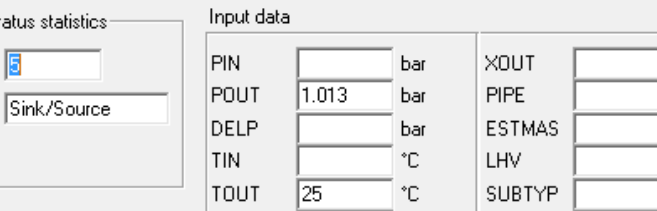


Figura 5.17 Modelado en cycle tempo del reactor de gasificación drowndraft.

- ENTRADA BIOMASA Y CAUDAL MÁSIKO AL GASIFICADOR

La entrada de biomasa al gasificador estar caracterizada por las condiciones ambientales y el caudal másico. Ambas condiciones se introducen a través del denominado Apparatus. POUT es la presión atmosférica, TOUT es la temperatura y DELM es el caudal másico de biomasa proporcionado al sistema.



Apparatus 5 Sink/Source

Apparatus statistics

No.:

Name:

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	0.0011	kg/s	WFOT		-
HIN		kJ/kg	ESTTIN		°C
HOUT		kJ/kg	ESTTOU		°C
DELH		kJ/kg	DELV		m3/s
XIN		-	DELVN		nm3/s

Additional input data

Figura 5.18 Apparatus de la biomasa

- ENTRADA DE AIRE AL GASIFICADOR

Estas condiciones se introducen a través del denominado Apparatus. POUT es la presión que es la atmosférica, TOUT es la temperatura que es la temperatura ambiente y DELM es el caudal másico (los kilogramos introducidos por segundo de aire) que en este caso no ponemos su valor ya que vendrá referido por el dato denominado OFRATI en el gasificador, que es el ratio aire/combustible (poda).

Apparatus statistics		Input data	
No.:	18	PIN	bar
Name:	Sink/Source	POUT	1.013 bar
		DELP	bar
		TIN	°C
		TOUT	25 °C
		DELT	°C
		DELE	kW
		DELM	kg/s
		HIN	kJ/kg
		HOUT	kJ/kg
		DELH	kJ/kg
		XIN	-
		XOUT	-
		PIPE	-
		ESTMAS	kg/s
		LHV	kJ/kg
		SUBTYP	-
		DTSUBC	°C
		DTSUPH	°C
		WFOT	-
		ESTTIN	°C
		ESTTOU	°C
		DELV	m3/s
		DELVN	nm3/s

Figura 5.19 Apparatus aire

Para la composición del aire se debe escoger la composición estándar. La composición se muestra en la siguiente figura.

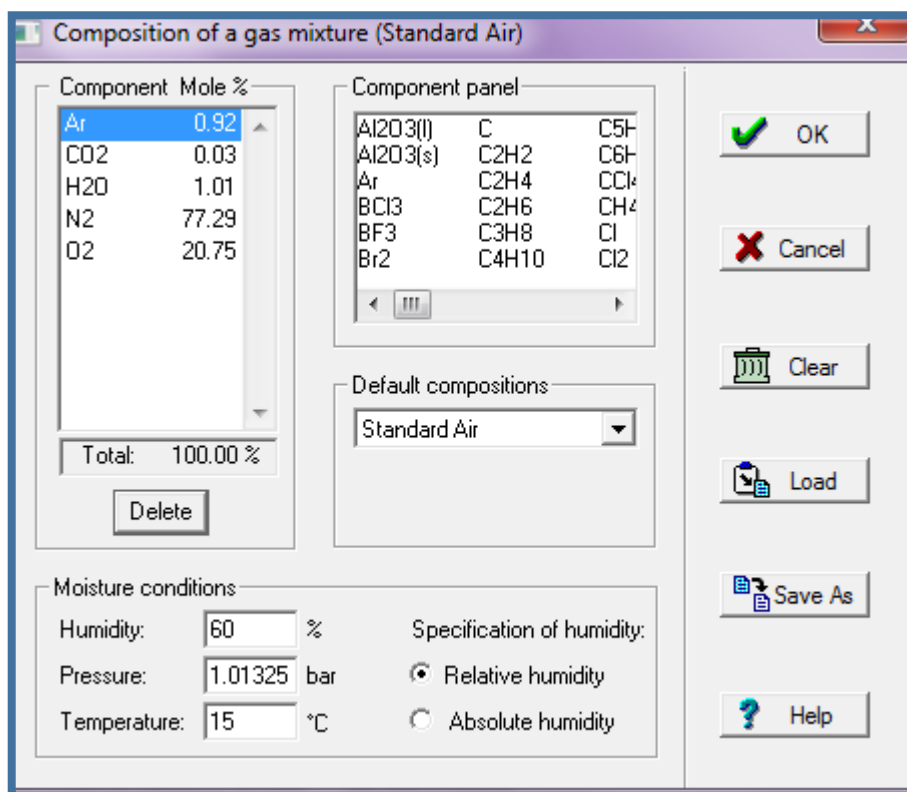


Figura 5.20 Pipe aire.

- GASIFICADOR

Corrientes entrada. La biomasa (corriente 5) es la corriente de entrada al gasificador, el aire (corriente 4) será el medio gasificante para la combustión (que es de fácil disponibilidad pero se obtendrá alto contenido de N2 en el gas producto) y el agua (corriente 1 y 2) se utilizará como refrigeración al reactor pero no se empleará, por lo que se pone para obtener los cálculos de la simulación de todo el sistema.

Corrientes salida. Como salida se obtendrá un gas producto (corriente 11) el cual sufrirá una serie de etapas previas a ser utilizadas como syngas. En las siguientes figuras podemos observar tanto el caudal del gas producto como la composición.

simulacion_gasificador_downdraft_parte 2: Text Output		
PIPES ->	11	19
N2	0.3318	0.
O2	0.	0.
H2O	0.0937	1.0000
AR	0.0039	0.
CO2	0.0810	0.
C(S)	0.0161	0.
H2	0.2428	0.
S	0.	0.
SiO2	0.0048	0.
H2S	0.0003	0.
CO	0.2255	0.

Figura 5.21 Composición del gas producto o syngas en % molar (pipe 11)

PIPE NO	MEDIUM TYPE	MASS-FLOW [kg/s]	MOLE-FLOW [kmol/s]	VOL-FLOW [m3/s]
1	WATERSTM	0.00000	0.00000	0.00000
2	WATERSTM	0.00000	0.00000	0.00000
3	GAS MIX	0.00004	0.00000	0.00000
4	GAS MIX	0.00162	0.00006	0.00137
5	FUEL	0.00127	0.00010	0.00000
6	FUEL	0.00124	0.00010	0.00000
7	GAS MIX	0.00285	0.00013	0.01057
8	GAS MIX	0.00267	0.00012	0.00927
9	GAS MIX	0.00003	0.00000	0.00000
10	GAS MIX	0.00286	0.00013	0.01175
11	GAS MIX	0.00289	0.00013	0.01168
19	GAS MIX	0.00018	0.00001	0.00081

Figura 5.22 Caudal del gas producto (11 gasmix)

Compuesto	Composición (%)
N ₂	0,3318
O ₂	0
H ₂ O	0,0937
Ar	0,0039
CO ₂	0,0810
C(s)	0,0161
H ₂	0,2428
S	0
SiO ₂	0,0048
H ₂ S	0,0003
CO	0,2255

Tabla 5.1 Composición del gas % molar antes sistema de limpieza

Temperatura salida (°C)	828,90
Caudal (Kg/s)	0,00289
PCI (KJ/Kmol)	129,01

Tabla 5.2 Características del gas antes del sistema de limpieza

5.6.1.2 Modelado y simulación del sistema de limpieza

En este sistema el objetivo es obtener un gas limpio de polvo y partículas de carbón y cenizas, además de eliminar la humedad del gas. Todo esto se lleva a cabo a través de un ciclón y un eliminador de humedad.

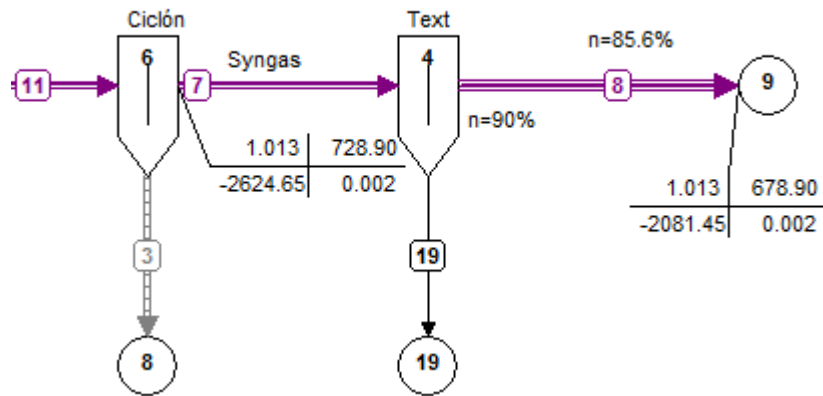


Figura 5.23 Sistema de limpieza.

- CICLÓN

Para introducir las condiciones del ciclón hay que tener en cuenta una serie de parámetros. En primer lugar DELT indica la elevación de la temperatura en el aparato. DELT5 indica el descenso que se produce en la temperatura del gas producto en contacto con la temperatura atmosférica, ya que el producto proviene a una temperatura aproximada de 843 °C. Por tanto, el valor de DELT5 es de -100 °C. El valor de DELP5 indica la presión en el aparato ya que el ciclón trabaja a presión atmosférica.

Elimina el 95% de polvo y partículas de carbón y cenizas contenidas en el syngas.

Apparatus statistics		Input data	
No.:	6	PIN	
Name:	Separator	POUT5	
		POUT6	
		DELP5	0
		DELP6	0
		TIN	
		TOUT5	
		TOUT6	
		DELT5	-100
		DELT6	0
		DELE	
		TEMDIF	

Figura 5.24 Apparatus ciclón

- ELIMINADOR DE HUMEDAD

En este aparato el objetivo es separar componentes, en nuestro caso, separar las partículas de agua (H₂O) que se encuentran en el gas producto. Este aparato elimina entorno el 80% de agua, en nuestro caso, entorno un 77% de agua.

Apparatus statistics		Input data	
No.:	4	PIN	
Name:	Separator	POUT5	
		POUT6	
		DELP5	0
		DELP6	0
		TIN	
		TOUT5	
		TOUT6	
		DELT5	-50
		DELT6	0
		DELE	
		TEMDIF	

Figura 5.25 Apparatus eliminador de humedad

simulacion_gasificador_downdraft_parte 2: Text Output

COMPOSITION OF FLUIDS IN PIPES CONTAINING GASMIX (MOLE FRACTION)

PIPES ->	3	4	5	6	7	8	9
N2	0.	0.7729	0.0021	0.0021	0.3334	0.3605	0.
O2	0.	0.2075	0.1419	0.1449	0.	0.	0.
H2O	0.	0.0101	0.1045	0.1067	0.0941	0.0204	0.
AR	0.	0.0092	0.	0.	0.0039	0.0043	0.
CO2	0.	0.0003	0.	0.	0.0814	0.0880	0.
C(S)	0.	0.	0.4182	0.4058	0.0162	0.0175	1.0000
H2	0.	0.	0.3268	0.3337	0.2439	0.2638	0.
S	0.	0.	0.0004	0.0004	0.	0.	0.
SiO2	1.0000	0.	0.0062	0.0064	0.0002	0.0003	0.
H2S	0.	0.	0.	0.	0.0003	0.0003	0.
CO	0.	0.	0.	0.	0.2265	0.2450	0.
MOLMASS	60.08	28.85	12.55	12.56	21.83	22.14	12.01
LHV	0.00	0.00	197.00	197.18	129.61	140.16	393.50
HHV	0.00	0.00	215.97	216.55	140.35	151.78	393.50
RH	0.	0.3228	3.3385	3.4099	*****	*****	0.
x	0.	6.35	176.45	180.71	84.23	16.85	0.

Figura 5.26 Composición gas producto final en % molar (Pipe8)

Compuesto	Composición (%)
N2	0,3605
O2	0
H2O	0,204
Ar	0,0043
CO2	0,088
C(s)	0,0175
H2	0,2638
S	0
SiO2	0,0003
H2S	0,0003
CO	0,245

Tabla 5.3 Composición gas producto final en % molar

Temperatura salida (°C)	678,90
Caudal (Kg/s)	0,00267
PCI (KJ/Kmol)	140,16

Tabla 5.4 Otras características del gas producto final en % molar

5.6.2 Modelado y simulación pellets

Con el objetivo de preparación de arranque del gasificador se han realizado el arranque mediante pellets. Esto es debido a que la poda debe ser picada a chips de madera y no teníamos picadora de ese tamaño. Por ello, si la poda no se picaba a este tamaño el reactor producía mucho alquitrán. Por tanto, se va a proceder a realizar el modelado y simulación del gasificador con este tipo de biomasa. El tipo de pellets se muestra en la siguiente imagen:



Figura 5.27 Pellets de madera utilizado en el gasificador

Para realizar el modelado y simulación necesitamos las características físico-químicas del pellets. De acuerdo con los datos reales obtenidos a partir del artículo (Atuesta et al., 2015) se muestra la composición elemental del pellets.

Sample Name:	Nitrogen	Carbon	Hydrogen	Sulphur	Water	Oxygen
PELLETS	1,12 %	48,12 %	5,10 %	0,40 %	10,28 %	34,98 %

Tabla 5.5 Composición elemental del pellets

El poder calorífico del pellets según la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía, IDEA, es de 16484.96 kJ/kg.

Una vez calculados los datos anteriores procedemos a realizar y a exponer la simulación y los datos de entrada obtenidos. En la siguiente imagen podemos observar el entorno de simulación del reactor con todos sus elementos.

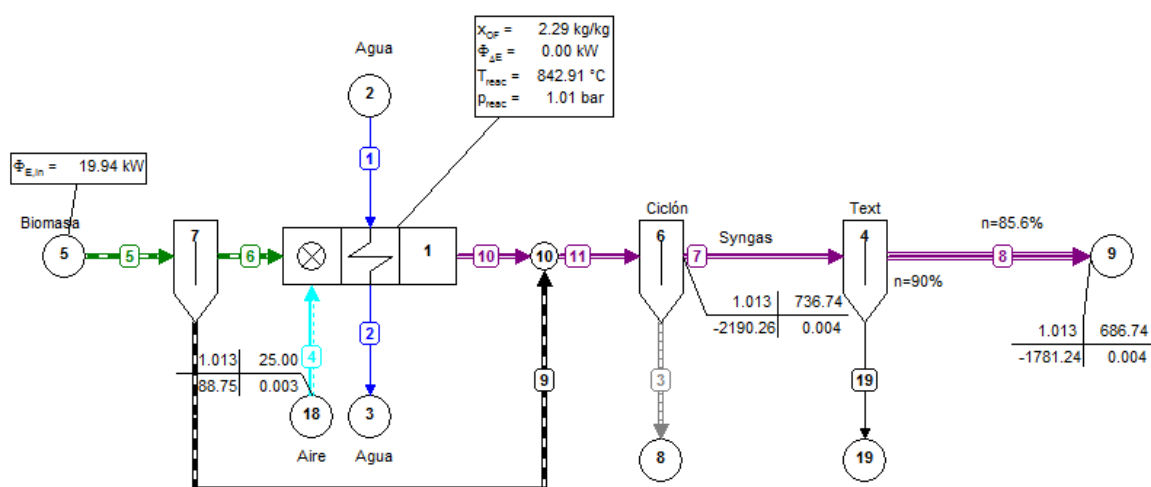


Figura 5.28 Entorno simulación reactor

Como podemos apreciar en la imagen los kW de entrada y la temperatura son iguales a la simulación de poda de olivar ya que el vamos a someter al pellets a las mismas características de la poda de olivar para ver las diferencias que existen en los gases del producto y otras características que pueden ser interesantes.

5.6.2.1 Modelado y simulación del reactor

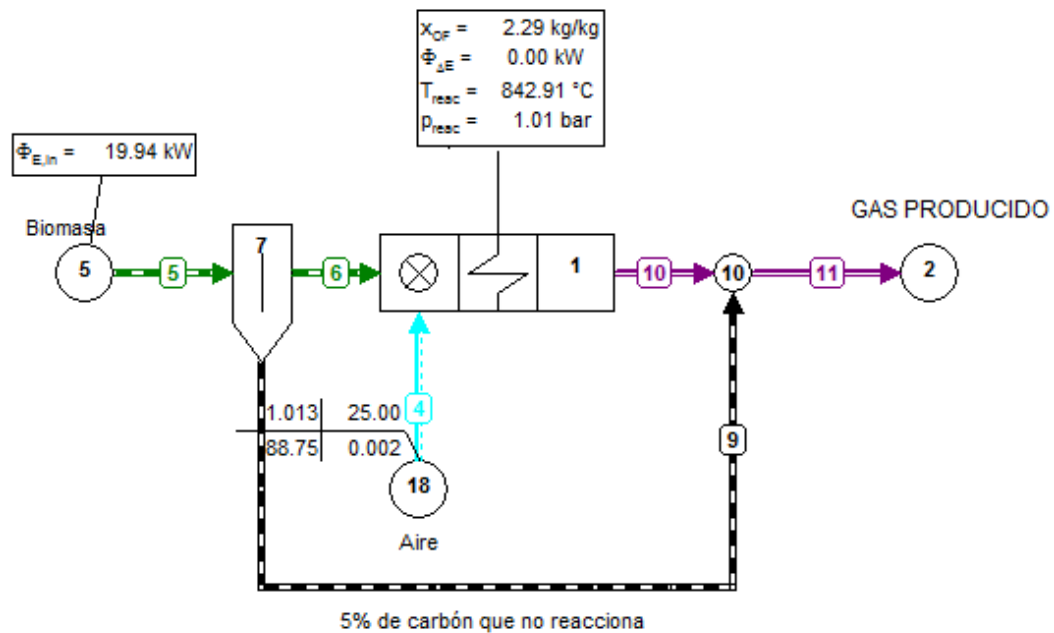


Figura 5.29 Modelado en cycle tiempo del reactor de gasificación drowndraft

• ENTRADA BIOMASA Y CAUDAL MÁSSICO AL GASIFICADOR

La entrada de biomasa al gasificador estar caracterizada por las condiciones ambientales y el caudal másico. Ambas condiciones se introducen a través del denominado Apparatus. POUT es la presión atmosférica, TOUT es la temperatura y DELM es el caudal másico de biomasa proporcionado al sistema.

Apparatus 5 Sink/Source

Apparatus statistics

No.: 5

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		$^{\circ}\text{C}$	LHV		kJ/kg
TOUT	25	$^{\circ}\text{C}$	SUBTYP		-
DELT		$^{\circ}\text{C}$	DTSUBC		$^{\circ}\text{C}$
DELE		kW	DTSUPH		$^{\circ}\text{C}$
DELM	0.0012095	kg/s	WFOT		-
HIN		kJ/kg	ESTTIN		$^{\circ}\text{C}$
HOUT		kJ/kg	ESTTOU		$^{\circ}\text{C}$
DELH		kJ/kg	DELV		m ³ /s
XIN		-	DELVN		nm ³ /s

OK Cancel Clear Help

Figura 5.30 Apparatus del pellets

- ENTRADA DE AIRE AL GASIFICADOR

Estas condiciones se introducen a través del denominado Apparatus. POUT es la presión que es la atmosférica, TOUT es la temperatura que es la temperatura ambiente y DELM es el caudal másico (los kilogramos introducidos por segundo de aire) que en este caso no ponemos su valor ya que vendrá referido por el dato denominado OFRATI en el gasificador, que es el ratio aire/combustible (pellets).

Apparatus statistics		Input data	
No.:	18	PIN	bar
Name:	Sink/Source	POUT	1.013 bar
		DELP	bar
		TIN	°C
		TOUT	25 °C
		DELT	°C
		DELE	kW
		DELM	kg/s
		HIN	kJ/kg
		HOUT	kJ/kg
		DELH	kJ/kg
		XIN	-
		XOUT	-
		PIPE	-
		ESTMAS	kg/s
		LHV	kJ/kg
		SUBTYP	-
		DTSUBC	°C
		DTSUPH	°C
		WFOT	-
		ESTTIN	°C
		ESTTOU	°C
		DELV	m3/s
		DELVN	nm3/s

Figura 5.31 Apparatus aire

Para la composición del aire se debe escoger la composición estándar. La composición se muestra en la siguiente figura.

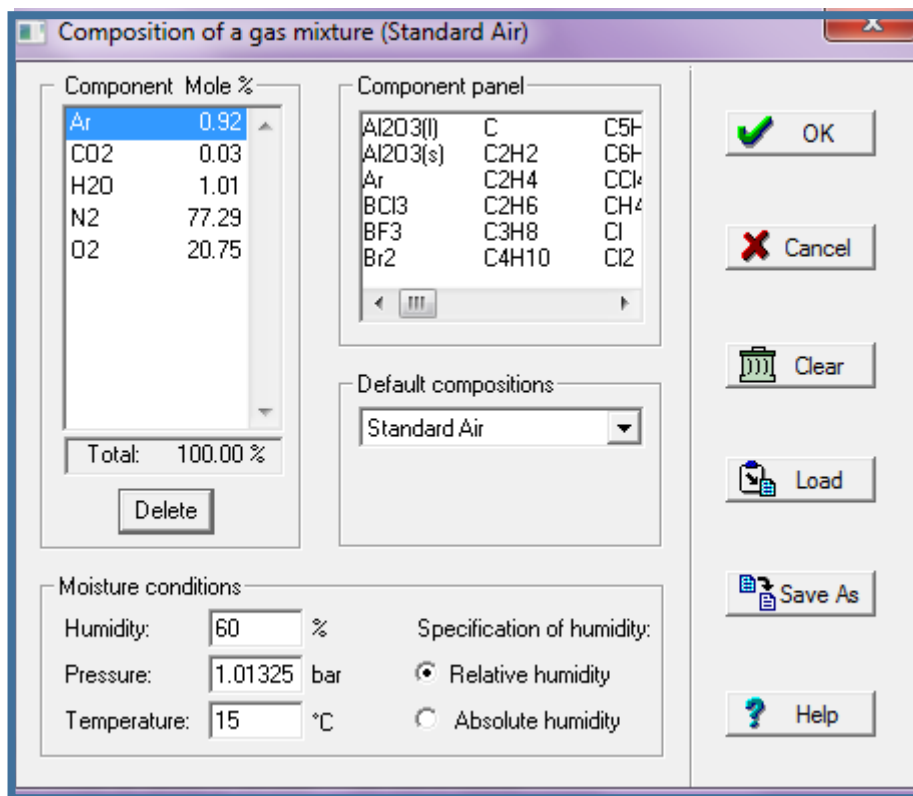


Figura 5.32 Pipe aire.

- GASIFICADOR

Corrientes entrada. La biomasa o pellets (corriente 5) es la corriente de entrada al gasificador, el aire (corriente 4) será el medio gasificante para la combustión (que es de fácil disponibilidad pero se obtendrá alto contenido de N2 en el gas producto) y el agua (corriente 1 y 2) se utilizará como refrigeración al reactor pero no se empleará, por lo que se pone para obtener los cálculos de la simulación de todo el sistema.

Corrientes salida. Como salida se obtendrá un gas producto (corriente 11) el cual sufrirá una serie de etapas previas a ser utilizadas como syngas. En las siguientes figuras podemos observar tanto el caudal del gas producto como la composición.

simulacion_pellets_gasificador_downdraft_parte 2: Text Output

PIPES ->	11	19
N2	0.4538	0.
O2	0.	0.
H2O	0.0789	1.0000
AR	0.0054	0.
CO2	0.0904	0.
C(S)	0.0151	0.
H2	0.1594	0.
S	0.	0.
SiO2	0.	0.
H2S	0.0009	0.
CO	0.1962	0.
SO2	0.	0.

Figura 5.33 Composición del gas producto o syngas en % molar (pipe 11)

PIPE NO	MEDIUM TYPE	MASS-FLOW [kg/s]	MOLE-FLOW [kmol/s]	VOL-FLOW [m3/s]
1	WATERSTM	0.00000	0.00000	0.00000
2	WATERSTM	0.00000	0.00000	0.00000
3	GASMIX	0.00000	0.00000	0.00000
4	GASMIX	0.00271	0.00009	0.00229
5	FUEL	0.00121	0.00010	0.00000
6	FUEL	0.00118	0.00010	0.00000
7	GASMIX	0.00392	0.00016	0.01312
8	GASMIX	0.00373	0.00015	0.01167
9	GASMIX	0.00003	0.00000	0.00000
10	GASMIX	0.00389	0.00016	0.01450
11	GASMIX	0.00392	0.00016	0.01442
19	GASMIX	0.00018	0.00001	0.00084

Figura 5.34 Caudal del gas producto (11 gasmix)

Compuesto	Composición (%)
N2	0,4538
O2	0
H2O	0,0789
Ar	0,0054
CO2	0,0904
C(s)	0,0151
H2	0,1594
S	0
SiO2	0
H2S	0,0009
CO	0,1965

Tabla 5.6 Composición del gas antes del sistema de limpieza en % molar

Temperatura salida (°C)	836,74
Caudal (Kg/s)	0,00392
PCI (KJ/Kmol)	100,46

Tabla 5.7 Otras características del gas antes del sistema de limpieza

5.6.2.2 Modelado y simulación del sistema de limpieza

En este sistema el objetivo es obtener un gas limpio de polvo y partículas de carbón y cenizas, además de eliminar la humedad del gas. Todo esto se llevara acabado a través de un ciclón y un eliminador de humedad.

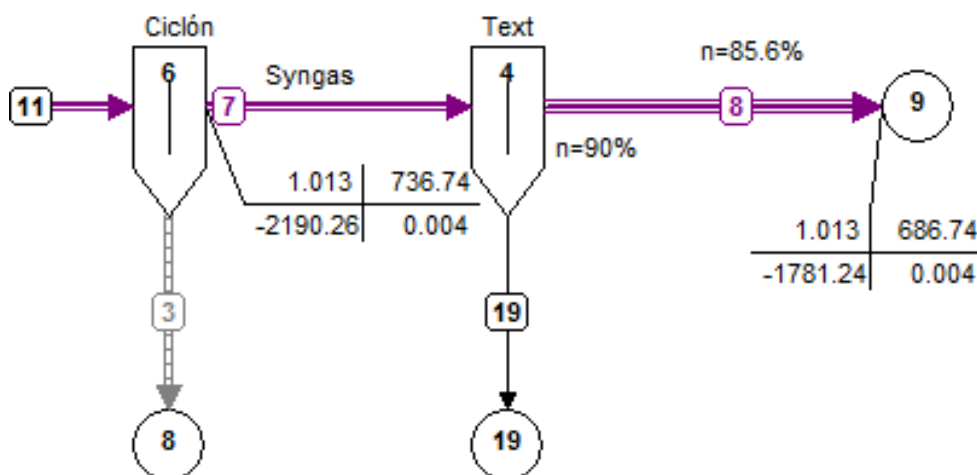


Figura 5.35 Sistema de limpieza.

- CICLÓN

Para introducir las condiciones el ciclón hay que tener en cuentas una serie de parámetros. En primer lugar DELT indica la elevación de la temperatura en el aparato. DELT5 indica el descenso que se produce en la temperatura del gas producto en contacto con la temperatura atmosférica, ya que el producto proviene a una temperatura aproximada de 843 °C. Por tanto, el valor de DELT5 es de -100 °C. El valor de DELP5 indica la presión en el aparato ya que el ciclón trabaja a presión atmosférica.

Elimina el 95% de polvo y partículas de carbón y cenizas contenidas en el syngas.

Input data		
PIN		bar
POUT5		bar
POUT6		bar
DELP5	0	bar
DELP6	0	bar
TIN		°C
TOUT5		°C
TOUT6		°C
DELT5	-100	°C
DELT6	0	°C
DELE		kW
TEMDIF		°C

Figura 5.36 Apparatus ciclón

- ELIMINADOR DE HUMEDAD

En este aparato el objetivo es separar componentes, en nuestro caso, separar las partículas de agua (H₂O) que se encuentran en el gas producto. Este aparato elimina entorno el 80% de agua, en nuestro caso, entorno un 77% de agua.

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

Figura 5.37 Apparatus eliminador de humedad

- COMPOSICIÓN DEL GAS PRODUCTO FINAL

simulacion_pellets_gasificador_downdraft_parte 2: Text Output

COMPOSITION OF FLUIDS IN PIPES CONTAINING GASMIX (MOLE FRACTION)

PIPES ->	3	4	5	6	7	8	9
N2	0.4538	0.7729	0.0048	0.0050	0.4539	0.4844	0.
O2	0.	0.2075	0.1325	0.1358	0.	0.	0.
H2O	0.0789	0.0101	0.0691	0.0709	0.0789	0.0168	0.
AR	0.0054	0.0092	0.	0.	0.0054	0.0057	0.
CO2	0.0904	0.0003	0.	0.	0.0904	0.0964	0.
C(S)	0.0151	0.	0.4855	0.4727	0.0151	0.0161	1.0000
H2	0.1594	0.	0.3066	0.3142	0.1594	0.1701	0.
S	0.	0.	0.0015	0.0015	0.	0.	0.
SiO2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
H2S	0.0009	0.	0.	0.	0.0009	0.0010	0.
CO	0.1962	0.	0.	0.	0.1962	0.2094	0.
SO2	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
MOLMASS	24.35	28.85	12.12	12.12	24.35	24.78	12.01
LHV	100.46	0.00	199.76	199.80	100.47	107.23	393.50
HHV	107.51	0.00	216.28	216.74	107.52	114.76	393.50
RH	*****	0.3228	2.2098	2.2649	*****	*****	0.
x	61.95	6.35	114.58	117.74	61.95	12.39	0.

Figura 5.38 Composición gas producto final en % molar (pipe 8)

Compuesto	Composición (%)
N2	0,4844
O2	0
H2O	0,0168
Ar	0,0057
CO2	0,0964
C(s)	0,0161
H2	0,1701
S	0
SiO2	0
H2S	0,001
CO	0,2094

Tabla 5.8 Composición gas producto final en % molar

Temperatura salida (°C)	686,74
Caudal (Kg/s)	0,00373
PCI (KJ/Kmol)	107,23

Tabla 5.9 Otras características del gas producto final

5.6.3 Resultados simulación poda olivar y pellets

Una vez realizadas las simulaciones de ambos tipos de biomasa, se van a mostrar las composiciones del gas producto, así como, las diferencias más características que se han observado en la simulación cycle tempo y que pueden ser importantes en procesos posteriores.

La composición del gas producto utilizando como biomasa poda de olivar se muestra en el siguiente diagrama. Es importante destacar que la composición que se muestra en este diagrama es del producto final, es decir, después de pasar por la etapa de limpieza.

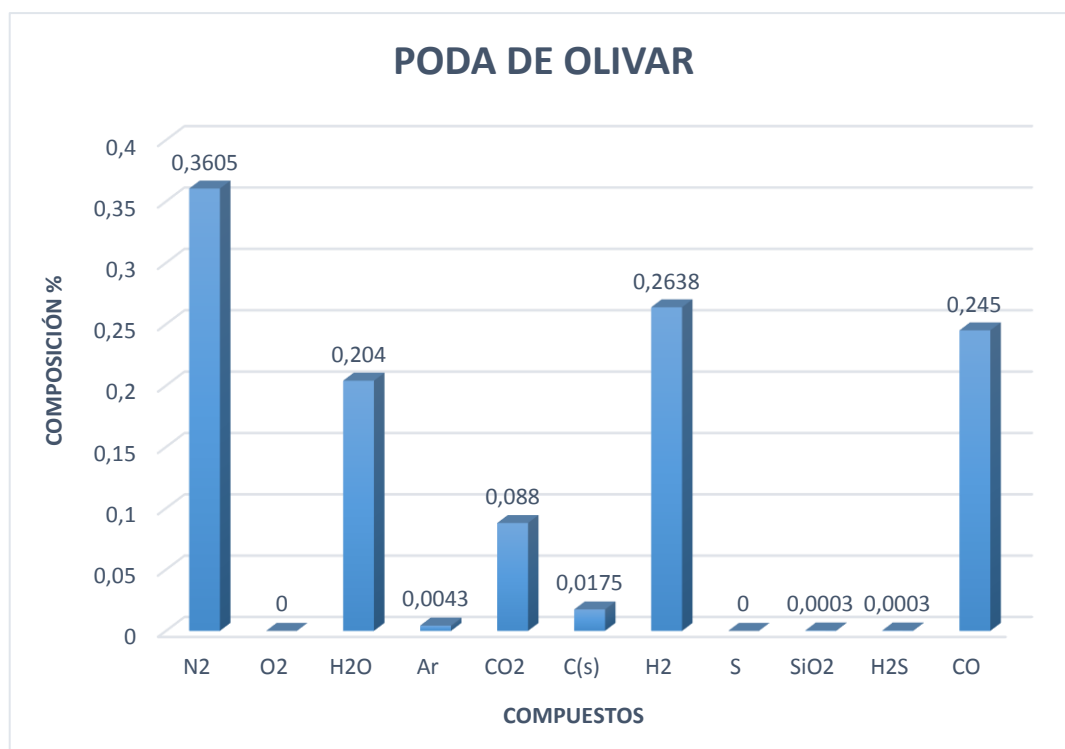


Figura 5.39 Diagrama composición gas producto final

La composición del gas producto utilizando como biomasa pellets se muestra en el siguiente diagrama. Es importante destacar que la composición que se muestra en el diagrama es del producto final, es decir, después de pasar por la etapa de limpieza.

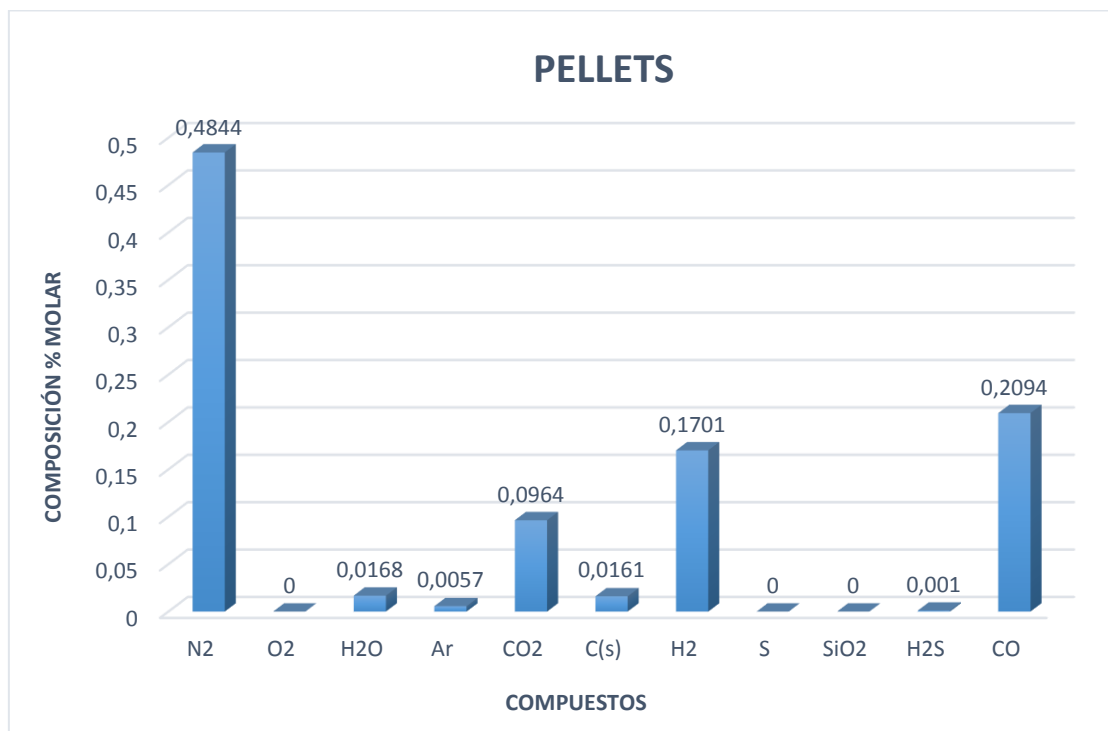


Figura 5.40 Diagrama composición gas producto final

Otro aspecto importante es la potencia térmica de entrada. Las dos simulaciones se han realizado con el objeto de obtener una temperatura de 842,91 °C y una potencia térmica de entrada de 19,94 kW. Por tanto se van a mostrar las relaciones entre la potencia térmica de entrada, con el caudal de entrada de la biomasa, así como, el caudal de aire necesario.

TIPO BIOMASA	Caudal Entrada (Kg/h)	Caudal Aire (Kg/h)	POTENCIA TÉRMICA BIOMASA (kW)
PODA OLIVAR	4,572	5,832	19,94
PELLETS	4,3542	9,756	19,94

Tabla 5.10 Relación caudales para distintos tipos de biomasa y potencia térmica de entrada

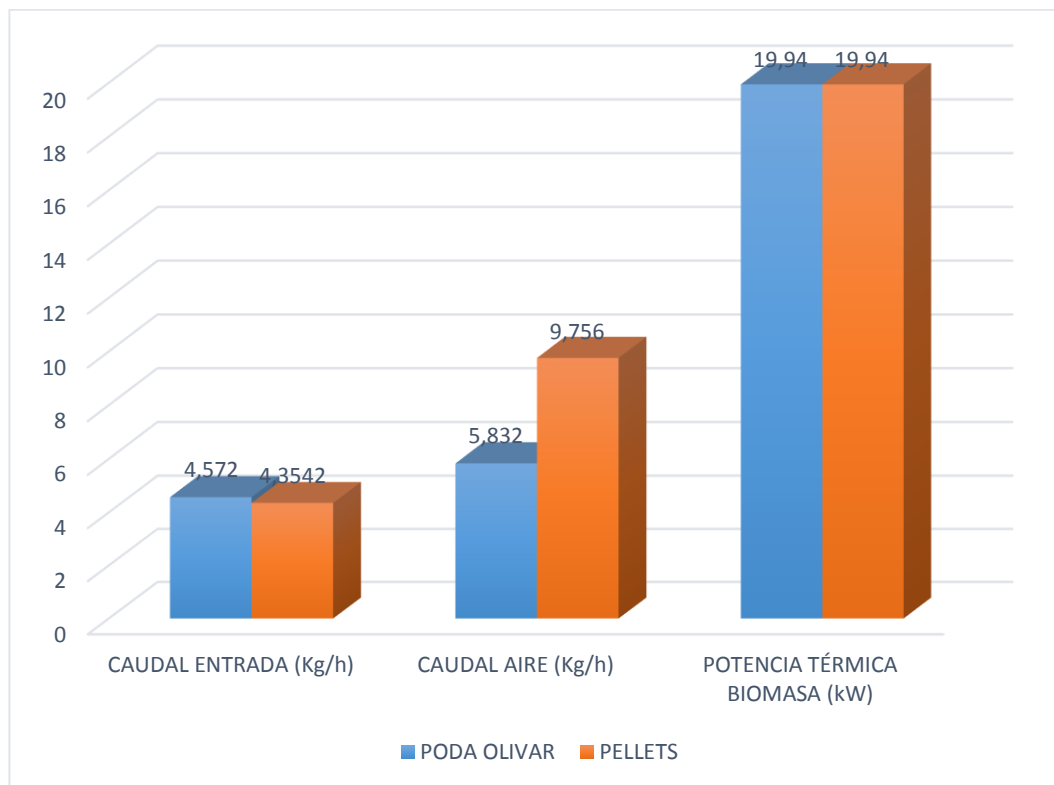


Figura 5.41 Diagrama relación de caudales necesarios y potencia térmica de entrada

Además de estas características se va a mostrar el poder calorífico proporcionado por el gas producto final de ambos tipos de biomasa para ver la cantidad de energía por unidad de volumen que podemos obtener.

TIPO DE BIOMASA	PODER CALORÍFICO INFERIOR (KJ/mol)
PODA OLIVAR	140,16
PELLETS	107,23

Tabla 5.11 PCI del gas producto final

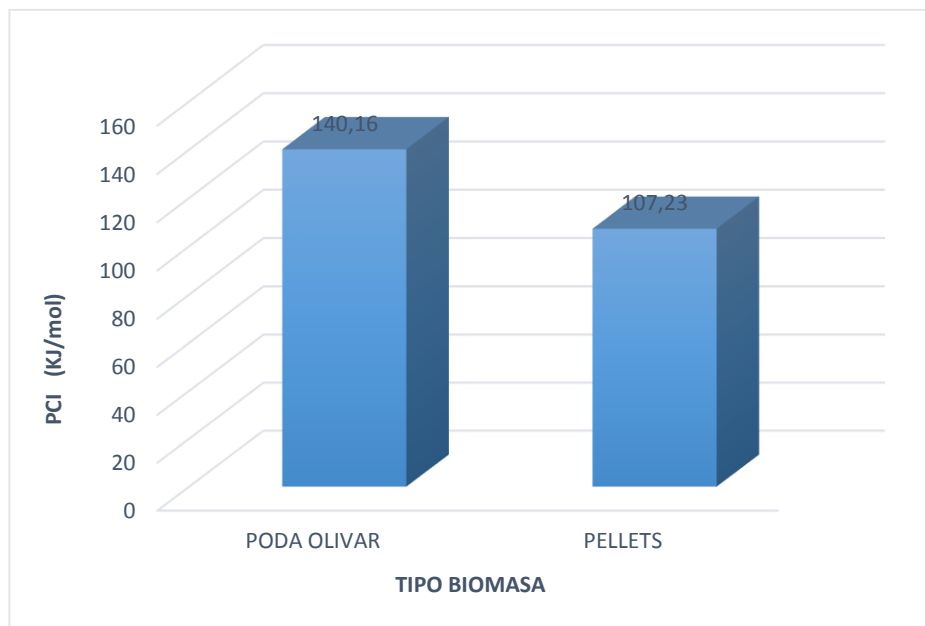


Figura 5.42 Diagrama PCI del gas producto final

Por último se van a mostrar las temperaturas de salida de los distintos tipos de biomasa:

TEMPERATURA	PODA OLIVAR	PELLETS
Antes del sistema de limpieza	828,9 °C	836,74 °C
Después del sistema de limpieza	678,9 °C	686,74 °C

Tabla 5.12 Temperatura ambas biomosas

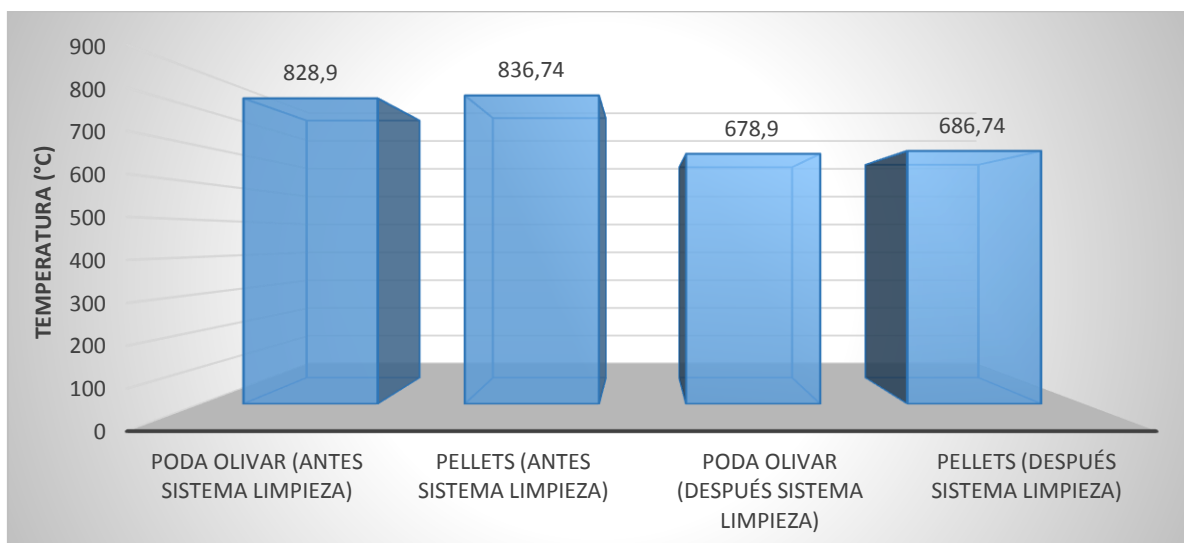


Figura 5.43 Diagrama comparación temperaturas ambas biomosas

6 CONCLUSIONES

6.1 Principales conclusiones

En general, las principales conclusiones que se ha obtenido en relación con los días de arranque del gasificador para su puesta a punto son las siguientes:

- La temperatura de salida, en todos los días de arranque, es la correcta según el fabricante, como se muestra en la figura 5.14.
- El motivo principal de la formación de alquitranes es que la cantidad de O_2 no es suficiente para que se alcancen los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ que requiere el proceso de gasificación en el interior del gasificador y por tanto la cantidad de productos de la pirólisis (alquitrán) es mucho mayor. Si se quiere facilitar la formación de monóxido de carbono e hidrógeno, se deben utilizar catalizadores de níquel y cobalto, trabajando entre 700 y $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona de reducción
- Según el fabricante las astillas seleccionadas (figura 5.3), para el tercer día de arranque, deberían estar comprendidas entre las dimensiones siguientes: 15 mm de largo y 10 mm de ancho. Si no se encuentra en estas dimensiones, no se produce el proceso de gasificación correctamente.
- Se han diseñado dos protocolos para la medida de la composición del syngas mediante técnicas off y on-line.
- Para la medida discontinua utilizaremos bolsas de teflón y un sistema en serie de borboteadores conteniendo isopropanol para la captura tanto los gases a interés (óxidos de carbono, metano, hidrógeno) y los secundarios tales como hidrocarburos de cadena corta.
- Proponemos un segundo sistema de medida on-line mediante un equipo portátil para medir de gases con detección FT-IR laser

En relación con los datos obtenidos en las simulaciones con el software cycle tempo, con los distintos tipos de biomasa, podemos decir:

- Las cantidades de los componentes del syngas, CO y H_2 , son mayores en los datos obtenidos en la simulación cycle tempo de poda de olivar que en los datos obtenidos en la simulación cycle tempo de pellets. Por tanto, un syngas más “rico” para procesos posteriores de combustión.
- El bajo contenido en azufre en ambos tipos biomasa hace que, en su combustión, el nivel de producción de óxidos de azufre sea muy bajo,

evitándose así las “lluvias ácidas” que se derivan de la combustión de carbones y derivados del petróleo.

- Para una misma potencia térmica de entrada de la biomasa (19,94 kW), sabiendo que el motor de gas con el syngas que genera el gasificador generan 3 kW, y una misma temperatura en el reactor, según la tabla 5.10, podemos decir que prácticamente con el mismo caudal de entrada (kg/h) de ambas biombras, necesitamos menos cantidad de aire en la poda de olivar para que se produzca el proceso de gasificación correctamente.
- El gas producto generado en el proceso de gasificación de la poda de olivar posee un mayor poder calorífico inferior que el generado en el proceso de gasificación del pellets. Por lo tanto, una mayor cantidad de energía por unidad de volumen para procesos posteriores.

6.2 Propuestas de mejora

6.2.1 Propuesta de mejora 1

Según el fabricante las temperaturas que se deben alcanzar en las zonas más características del reactor son las siguientes:

ZONA GASIFICADOR	TEMPERATURA
Antorcha	40 - 50 °C
Reactor	Alrededor de 850 °C
Salida reactor	150 - 200 °C

Tabla 6.1 Características proporcionadas por el fabricante

Por lo tanto para saber que está pasando dentro de nuestro gasificador y tener controladas las temperaturas, de las zonas características del proceso de gasificación, una de las propuestas de mejora será introducir una serie de termopares. En la siguiente imagen se muestra el tipo de termopar que se van a utilizar en nuestro gasificador. Este termopar tipo K aguantan hasta 1000 °C.



Figura 6.1 Termopar tipo K.

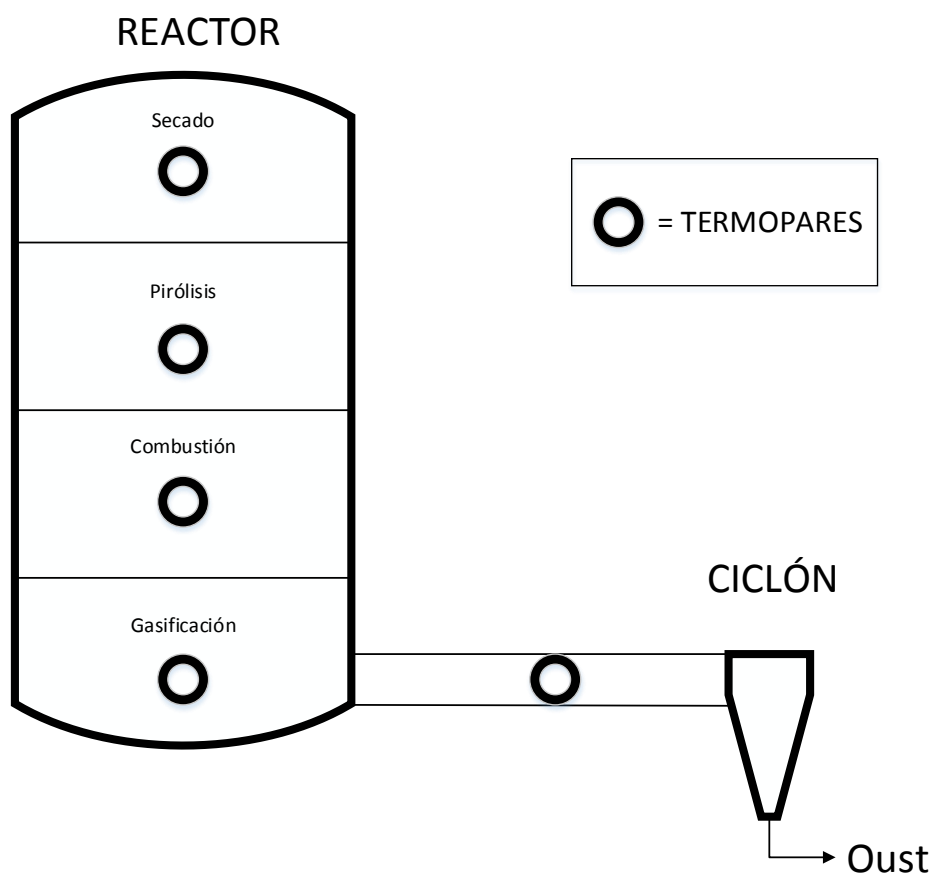


Figura 6.2 Termopares en las distintas zonas de gasificación. Fuente: Elaboración Propia

6.2.2 Propuesta de mejora 2

En relación con la propuesta de mejora 1, otra propuesta sería la introducción de un soplador de flujo variable. Con esto lo que se quiere lograr es la introducción del aire en las cantidades necesarias para que en cada parte del gasificador se alcance la temperatura óptima para lograr el proceso de gasificación óptimo.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Arias, M. *Manual de automóviles*. Madrid: Dossat 2000. 55ª Edición, 2004.
- Basu, P. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Boston: Elsevier, 2013.
- Canzana, S. *Introduction to Biomass Energy Conversion*. USA: CRC Press, 2011.
- Carta González, J.A., Calero Pérez, R., Antonio C., Santos & Castro Gil, M.A. *Centrales de energías renovables*. Madrid: Pearson Educación, 2009.
- Chouchene, A. et al. *Study on the emission mechanism during devolatilization/char oxidation and direct oxidation of olive solid waste in a fixed bed reactor*. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2010, 87, 168-174.
- Damien, A. *La biomasa: fundamentos, tecnologías y aplicaciones*, Madrid: AMV y Mundi Prensa, 2010.
- Devi L, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. *A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes*. Biomass and Bioenergy 2003, 24, 125–140.
- Diacosa, D. *Motores endotérmicos: motores de encendido por chispa: de carburación y de inyección*. Barcelona: Hoepli, 1970.
- Encinar, J.M., González, J.F., Rodríguez, J.J., Ramiro, M.J. *Catalysed and uncatalysed steam gasification of eucalyptus char: influence of variables and kinetic study*, 2001, Fuel 80 (14), 2025-2036.
- Jeguirim, M., Trouvé, G. *Pyrolysis characteristics and kinetics of Arundo donax using thermogravimetric analysis*. Bioresour. Technol, 2009, 100, 4026-4031.
- Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y.A., Jones, D.D., & Hanna, M.A. *Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock*. Biomass Bioenergy, 2008, 32, 460-467.
- Madrid Vicente, A. *La biomasa y sus aplicaciones energéticas*. Madrid: AMV Ediciones, 2012.
- Meherwan P. Boyce. *Gas turbine engineering handbook*. Boston: Gulf Professional Pub, 2006.
- Sánchez, Laia. Fiter, Junco. *Aplicación del ciclo orgánico de Rankine para el aprovechamiento del calor residual en una refinería*. Proyecto Fin de Grado, 2012, 1-106.

Vera, D., De Mena, Bárbara., Jurado, F., Schories, Gerhard. Study of a downdraft gasifier and gas engine fueled with olive oil industry wastes. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51, 119-129.

Vera, D. *Generación eléctrica distribuida y aprovechamiento de los residuos de la industria del olivar*. Tesis Doctoral, Universidad de Jaén, 2013.

Vera, D., Jurado, F., Carpio, J. Study of a downdraft gasifier and externally fired gas turbine for olive industry wastes. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92, 1970-1979.