

*Energía de la
Biomasa*

Biomasa

Gasificación



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

Energía de la
Biomasa

Biomasa

Gasificación

TÍTULO

“Biomasa: Gasificación”

DIRECCIÓN TÉCNICA

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)

ELABORACIÓN TÉCNICA

BESEL, S.A. (Departamento de Energía)

.....

Esta publicación ha sido producida por el IDAE y está incluida en su fondo editorial.

Cualquier reproducción, parcial o total, de la presente publicación debe contar con la aprobación por escrito del IDAE.

Depósito Legal: M-45160-2007

ISBN-13: 978-84-96680-20-3

.....

IDAE

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

C/ Madera, 8

E-28004-Madrid

comunicacion@idae.es

www.idae.es

Madrid, octubre de 2007

1 Objeto	5
2 Gasificación	7
2.1 Etapas y reacciones de la gasificación	7
2.2 Elementos principales de la gasificación	9
2.2.1 Agentes gasificantes	9
2.2.2 Biomasa	9
2.2.3 Catalizadores	10
2.3 Elección de tecnología	11
3 Tecnologías	13
3.1 Lecho fluidizado de presión compensada (ENAMORA)	13
3.1.1 Características de la planta	13
3.1.2 Funcionamiento normal	14
3.1.3 Indicadores de funcionamiento de la tecnología	17
3.2 Guascor	19
3.2.1 Datos generales	19
3.2.2 Funcionamiento de la planta de gasificación	20
3.2.3 Calidad del gas	23

3.2.4	Gestión de subproductos	25
3.2.5	Sistema de control y monitorización	26
3.3	Inerco.	26
3.3.1	Tecnología y funcionamiento	26
3.3.2	Características de la planta	28
3.4	Taim-TFG	29
3.4.1	Descripción de la instalación.	29
3.4.2	Características técnicas	30
3.4.3	Sistemas de control y seguridad	31
3.4.4	Modo de funcionamiento	32

Objeto

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados.

En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases llamada gas de síntesis 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.

El agente gasificante es un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar las reacciones, y oxígeno.

La gasificación no es una tecnología desarrollada recientemente, sino que ha sido un recurso habitual en periodos de carencia o escasez de combustibles ligeros, ya que permite convertir sólidos (carbón, biomasa) en gases que pueden ser empleados en motores de combustión interna, calderas y turbinas. Por otro lado, la gasificación como concepto de proceso puede aplicarse para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (*proceso Fischer-Tropsch*).

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%. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del syngas, necesario para su secado (eliminación de vapor de agua) y filtración, y en el lavado (cuando es necesario eliminar los alquitranes).

Además de sustituir a combustibles ligeros de origen fósil, la gasificación permite obtener altos rendimientos eléctricos a partir de biomasa, cuestión ésta muy difícil mediante combustión directa para generación de vapor y posterior expansión de éste en un turbo alternador. Mediante gasificación se pueden alcanzar rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto-generadores accionados por syngas, mientras que con un ciclo Rankine convencional simple las cifras rondan un 22% de rendimiento eléctrico.

Como en todos los sistemas de producción/transformación de energía, es necesaria cierta alimentación eléctrica para mantener todo el proceso en depresión, para evitar la fuga de cualquiera de los gases que se producen en el proceso.

En este documento se presentan los elementos principales que intervienen en el proceso de gasificación de biomasa, las características deseables de los combustibles y las aplicaciones más comunes.

2 Gasificación

Existen dos familias de tecnologías principales de gasificación si se atiende al tipo de gasificador:

- La de lecho móvil que, a su vez, se subdivide dependiendo del sentido relativo de las corrientes de combustible (biomasa) y agente gasificante. Cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina “*downdraft*” o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denomina “*updraft*” o de contracorriente.
- La de lecho fluidizado, en la que el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las partículas de éste se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas.

2.1 ETAPAS Y REACCIONES DE LA GASIFICACIÓN

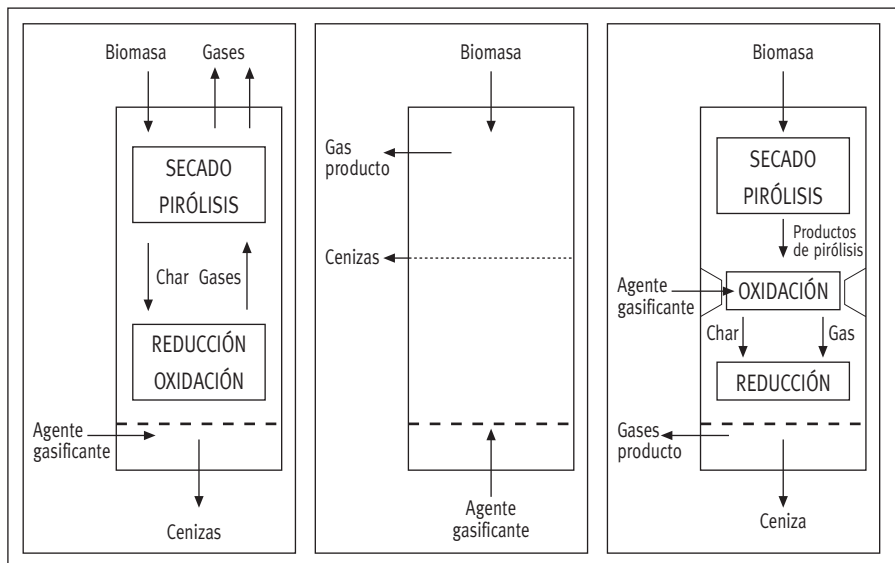
Con independencia de que el lecho sea fluidizado o móvil, en sus variantes, la biomasa pasa por:

- Una primera etapa de calentamiento hasta 100 °C, que provoca el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma, y que absorbe el calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para la evaporación del agua;
- La segunda etapa, que también absorbe calor, es la de pirólisis (ruptura por calor), en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras de cadena más corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa;

- En los reactores “*updraft*” la tercera etapa es la reducción, por combinación del vapor de agua producido en la primera etapa, con el dióxido de carbono que viene arrastrado por la corriente del gasificante, desde la cuarta etapa (oxidación);
- La última etapa es la oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua).

Siguiendo la reacción en el sentido del agente gasificante, las etapas son:

- Oxidación parcial del residuo carbonoso y caliente de la biomasa, elevando mucho su temperatura, ya que las reacciones de oxidación son exotérmicas;
- En la zona de reducción, la falta de oxígeno unida a la disponibilidad de carbono, CO_2 y vapor de agua, hace que se produzca una recombinación hacia hidrógeno molecular y monóxido de carbono;
- La tercera etapa en el sentido del gas es la pirólisis en la que, por efecto del calor, los componentes más ligeros de la biomasa se rompen y convierten en gas, uniéndose a la corriente;
- Por último, los gases calientes evaporan el agua contenida en la biomasa entrante.



De izquierda a derecha, esquemas de funcionamiento de gasificadores *updraft*, de lecho fluidizado y *downdraft*.

2.2 ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA GASIFICACIÓN

2.2.1 Agentes gasificantes

Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el syngas —producto final— varía en su composición y poder calorífico.

Si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del syngas es nitrógeno y, en términos de poder calorífico, el gas ronda los 5,5 MJ/Nm³. Este syngas es apropiado para motores de combustión interna convencionales, ya que como materia prima para la síntesis del metanol es un gas pobre.

La gasificación con vapor de agua u oxígeno, mejoran el rendimiento global y aumenta la proporción de hidrógeno en el syngas. Es el sistema más adecuado de producir syngas si se desea emplearlo como materia prima para producir metanol o gasolina sintética. Si bien el aire es gratuito y el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, el oxígeno tiene un coste energético y económico a tener en cuenta.

La utilización de hidrógeno como agente gasificante permite obtener un syngas que puede sustituir al gas natural, pues puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/kg. No obstante, el hidrógeno es el mejor de los combustibles, susceptible de usarse en cualquier dispositivo termoquímico o electroquímico, por lo que no es muy recomendable como gasificante en el ámbito industrial, excepto en los casos de excedentes de baja pureza, no aptos para otra aplicación como una pila de combustible.

2.2.2 Biomasa

2.2.2.1 Propiedades físicas

Las tecnologías comerciales de gasificación permiten procesar prácticamente todo tipo de combustibles de origen biomásico, con una limitación de su densidad mínima de 200 a 250 kg/m³. Densidades menores crean problemas en el manejo de la biomasa en los conductos verticales. Asimismo, complican la gasificación en lecho fluidizado, pues la biomasa es arrastrada por el gas de síntesis, con la consecuente pérdida de eficiencia y disponibilidad.

Otra cuestión de importancia respecto a la biomasa es que su tamaño sea homogéneo (y estable en el tiempo) y lo suficientemente pequeño para que las

reacciones se produzcan a una velocidad adecuada, y en un volumen razonablemente pequeño. Un tamaño de partícula pequeño permite aumentar la calidad del syngas, reducir el tamaño del reactor o bien aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas y condensables (alquitranes).

Un tamaño excesivamente pequeño puede hacer que la biomasa se atasque en los conductos o que sea arrastrada junto con las cenizas volantes al exterior del reactor antes de tiempo. En conclusión, se puede decir que cada gasificador precisa de un determinado tamaño de partícula, que en la mayoría de los casos no debe ser menor de 2-3 mm de diámetro.

2.2.2.2 Composición química

En cuanto a la humedad de la materia a gasificar, valores del 10 al 15% son los más adecuados. Secar más la biomasa presenta dos inconvenientes. El primero es que, a medida que se seca más, es más costoso en términos energéticos y económicos. En segundo lugar, una biomasa secada más allá de su punto de equilibrio recupera la humedad al entrar en contacto con el aire ambiente.

En general, la humedad facilita la formación de hidrógeno, pero reduce la eficiencia térmica. Un análisis elemental de la biomasa permite conocer la cantidad de aire u oxígeno que es necesario introducir como primera aproximación que se contrastará en la práctica.

Un análisis inmediato da información sobre carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas. Estos datos son importantes a la hora de elegir la tecnología de gasificación y el tiempo de residencia en el reactor, para reducir al máximo los inquemados carbonosos, es decir, agotar al máximo el PCI de la biomasa.

Conociendo el poder calorífico del combustible se obtiene una idea aproximada del poder calorífico del syngas. El poder calorífico se calcula a partir del análisis elemental.

Por último, es importante que las cenizas entrantes (fracción mineral mezclada o adherida al combustible) sean lo más reducidas posible. Estas cenizas sólo absorben calor, ensucian los filtros, erosionan los conductos y pueden llegar a producir sinterizaciones.

2.2.3 Catalizadores

Dependiendo de la tecnología que se emplea, y de las condiciones de gasificación (relación biomasa/gasificante, tiempo de residencia, etc.) se pueden usar

catalizadores para inducir ciertas reacciones y que se produzca prioritariamente algún componente.

Catalizadores de reformado de níquel o cobalto, gasificando a menos de 550 °C facilitan el craqueo de las fracciones pesadas, es decir, la reducción de la formación de alquitranes.

Catalizadores basados en zeolita y dolomía reducen la temperatura de craqueo de 1.100 °C a 800-900 °C, es decir, que permiten trabajar a menor temperatura en la zona de reducción.

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 °C en la zona de reducción.

2.3 ELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

Cuando se tiene interés por estudiar la viabilidad y el interés de emplear la gasificación como tecnología intermedia de conversión de la biomasa, es recomendable establecer contacto con tecnólogos, así como con empresarios que hayan pasado por similares circunstancias.

Para identificar a qué tecnólogos contactar, es muy conveniente conocer de forma general cual es el tipo o sistema de gasificación que más se pueda adaptar a las necesidades, o la disponibilidad del recurso biomásico.

La elección de la tecnología se debe basar en tres aspectos principales:

- el tipo y la cantidad de biomasa de la que se dispone,
- la aplicación final que se pretende, es decir, qué necesidades energéticas se pretenden cubrir,
- y un grupo de factores varios (medioambientales y económicos).

Cuanto mejor esté cuantificada la biomasa disponible, y más detallado sea el conocimiento sobre sus características físicas y químicas, más sencilla y rápida será la etapa de elección de la tecnología, y la subsiguiente petición de ofertas.

En el caso que nos ocupa, no consideramos la gasificación como una operación de obtención de unos determinados gases que sean la materia prima para una síntesis posterior. Por tanto, las opciones de uso final son la producción eléctrica o la producción de calor, o ambas de forma combinada.

Dependiendo de la demanda de calor y de electricidad que se pretenda cubrir, hay que saber que un motor de combustión interna alternativo distribuye de la siguiente manera la energía que consume, variando de una marca a otra:

- 33-38% electricidad;
- 35-40% calor a través del agua de refrigeración a 90 °C;
- 18-22% calor a través de los gases de combustión;
- 5-8% pérdidas.

En función de la tecnología de generación eléctrica o térmica, será preciso que el syngas cumpla unos requisitos en cuanto a partículas, alquitranes, poder calorífico, concentración de cada gas, temperatura, etc.

Generalmente, las aplicaciones en motor o turbina de gas, orientadas a la generación eléctrica o a la cogeneración, son más exigentes en cuanto a la limpieza de gas (partículas) y a las posibles emisiones contaminantes post-combustión (alquitranes).

La bibliografía indica que las tecnologías que minimizan la producción de partículas facilitan la producción de alquitranes y viceversa. No obstante, hoy en día, el control de flujos, de temperaturas, los filtros, los sistemas de lavado, así como variantes tecnológicas, permiten producir syngas de buena calidad, y que cumplen las normas sobre emisiones a la atmósfera.



3 Tecnologías

La gasificación, por su capacidad de producir combustibles aptos para MCIA¹ y turbinas, está tomando gran auge en todo el mundo, incluida España.

Para grandes potencias, y con el objetivo de producir un syngas destinado a co-combustión (poco exigente en alquitranes y partículas) existen plantas operando desde hace bastante tiempo, sobre todo en Escandinavia.

Si embargo, últimamente se están poniendo a punto tecnologías de plantas de menor tamaño, que pueden procesar entre 7.000 y 8.000 t/año de biomasa y producir un syngas de una calidad suficiente para alimentar un motogenerador. Estos desarrollos tienen mucho interés en España, donde no se producen grandes concentraciones de biomasa, pero es atractivo producir electricidad y es necesario disponer de calor para actividades industriales.

3.1 LECHO FLUIDIZADO DE PRESIÓN COMPENSADA (ENAMORA)

3.1.1 Características de la planta

La empresa que ha desarrollado esta tecnología dispone de una instalación completa de gasificación y generación eléctrica a partir del syngas en un motoalternador. La planta es flexible de forma que se adapta a cualquier combustible que se quiera testar, y sirve para poner a punto las consignas de operación de los proyectos que se les encargan. Es decir, prueban y ponen a punto en su instalación la forma de operar de los proyectos que ejecutan para sus clientes.

¹ Motores de Combustión Interna Alternativos.



Gasificador y sistemas de tratamiento de syngas de la planta de Mora de Ebro. Fuente: ENAMORA.

Al ser una planta piloto se han probado con éxito muchos materiales como: cáscaras de distintos frutos secos, astillas de maderas de diversas especies, restos de fábrica de muebles, cortezas, orujillo, restos de poda, residuos forestales, residuos herbáceos, etc.

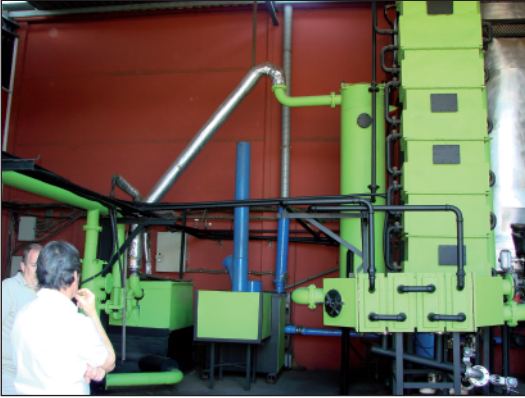
Esta circunstancia permite:

- prácticamente asegurar el éxito de las plantas, al optimizar el diseño a través de pruebas a escala casi real, y
- adelantarse a los problemas concretos que suelen surgir en todas las puestas en marcha, es decir, se inicia el ajuste de los parámetros de operación incluso antes de acabar la instalación de los equipos en la planta del cliente. Esto reduce tiempos y costes de implantación de una forma importante.

3.1.2 Funcionamiento normal

Cuando no se está investigando ni ajustando ninguna nueva estrategia de operación, o rediseño de equipos accesorios, el proceso en la planta de gasificación de ENAMORA comienza en una nave abierta pero cubierta, donde se almacena

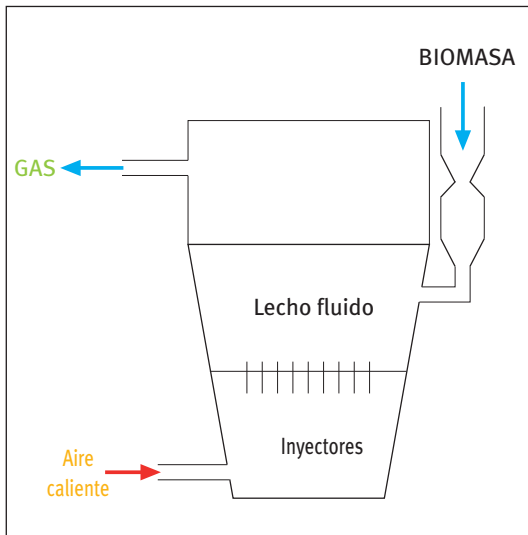
la biomasa (generalmente cáscara de almendra, que es muy común en la comarca). Un tornillo sin fin envía la biomasa hacia una tolva de alimentación que, a través de una cinta transportadora, alimenta a un molino que reduce las partículas mayores y homogeneiza la granulometría de la biomasa al tamaño deseado en cada caso.



Sección de refrigeración y limpieza de syngas.

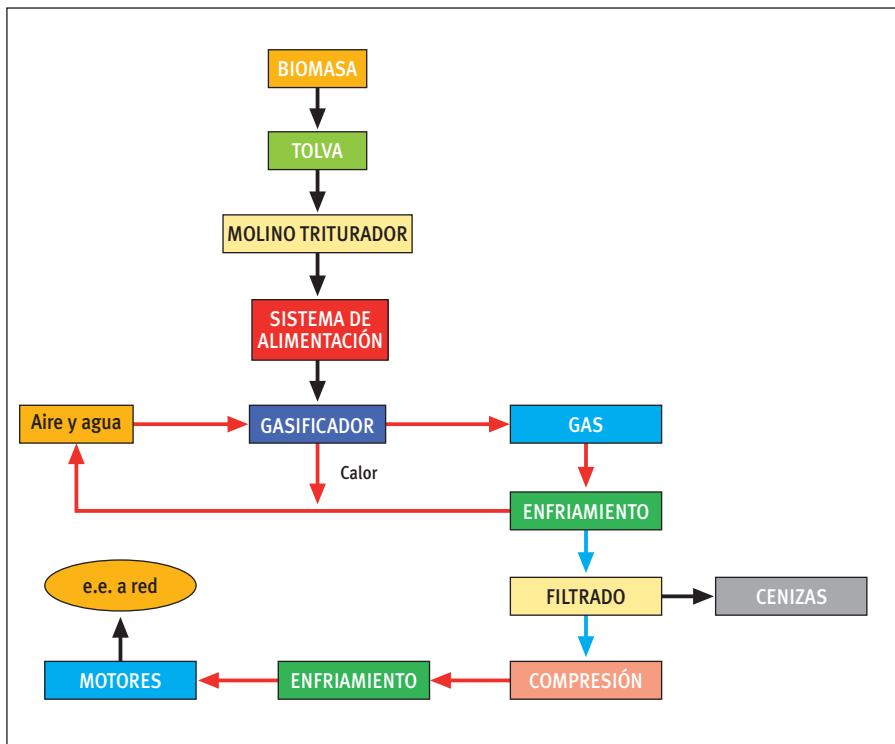
Del molino, el material ya homogéneo pasa a una tolva nodriza, desde donde se alimenta al sistema de carga del gasificador. Éste está formado por dos tolvas sucesivas, aisladas mediante válvulas de clapeta, que impiden la entrada de aire al reactor. La biomasa se introduce en el gasificador en su tercio inferior, de forma que se vierta sobre el lecho fluido.

El lecho se crea insuflando aire caliente como agente gasificante, a través de una matriz situada en la base del reactor.



Esquema simplificado del gasificador de ENAMORA.

El syngas obtenido es enfriado en un intercambiador, a su salida del reactor. El calor desprendido en dicho proceso, y en la misma gasificación, es aprovechado para calentar el agente gasificante (aire principalmente). El syngas, una vez refrigerado pasa a sistema de filtrado, que separa el agua, naftalenos y cenizas arrastradas. Para la limpieza de los gases no se precisa aportación externa de agua.



Esquema de funcionamiento de la tecnología de ENAMORA.

A continuación, el gas es acondicionado para su posterior alimentación a un motor de combustión interna GUASCOR que, a su vez, genera energía eléctrica que es exportada a la red.

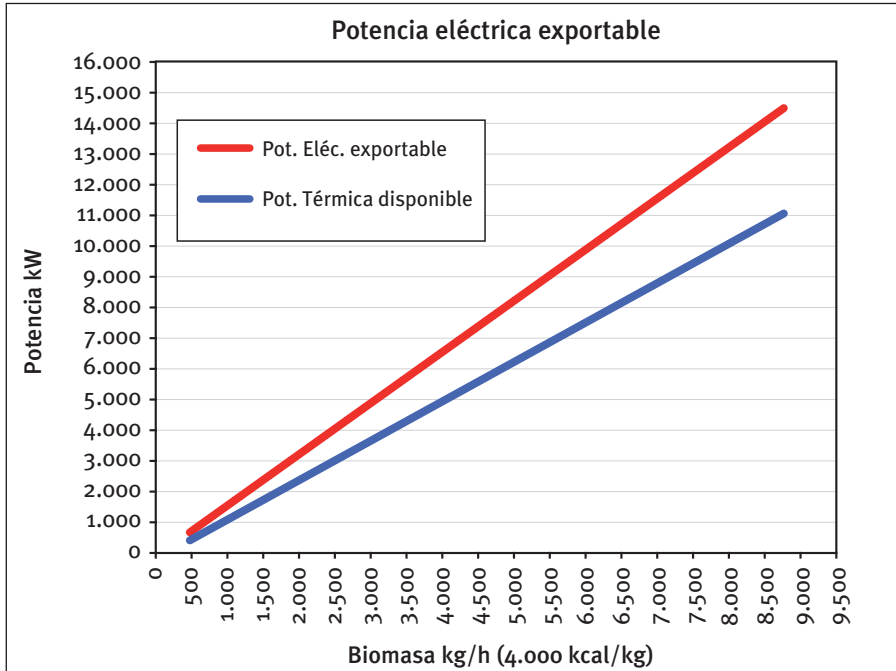
Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que no aparecen alquitranes en el syngas, debido al diseño del gasificador y a las características de las reacciones que se producen en su interior.

Los naftalenos, que son unos hidrocarburos líquidos a temperatura ambiente, no son un producto tóxico. Además, son susceptibles de ser introducidos de nuevo al gasificador, enriqueciendo el PCI de la biomasa.

Por su fiabilidad y estabilidad de operación, la instalación piloto descrita está siendo empleada por el CENER para realizar la calibración de los equipos de análisis de gases de combustión de gases de síntesis en MCIAs.

3.1.3 Indicadores de funcionamiento de la tecnología

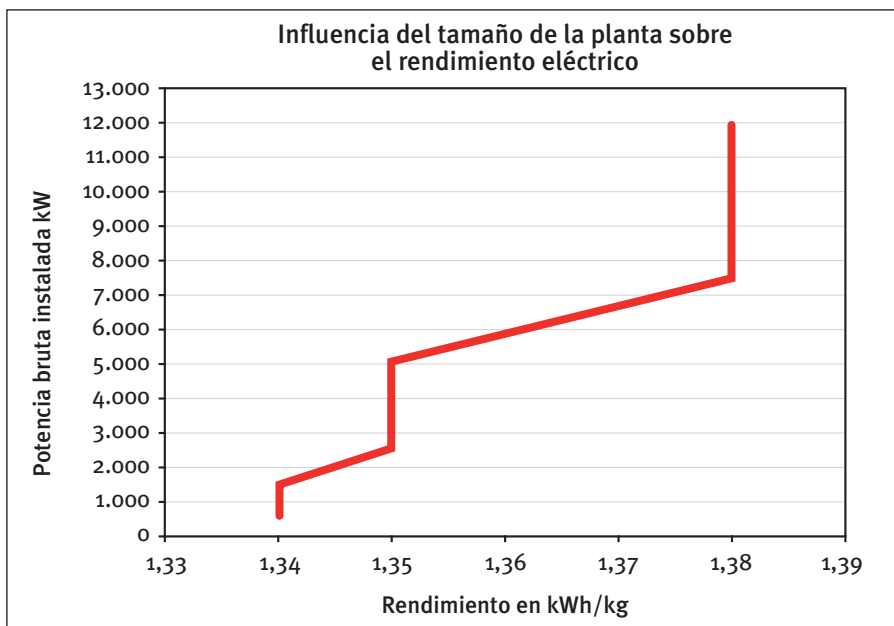
Sobre la base de diseños de diferentes capacidades, basadas en esta tecnología y usando el syngas en MCI, se han realizado una serie de estimaciones acerca de diferentes magnitudes técnicas y económicas que definen los rangos en los que esta tecnología se desenvuelve.



Fuente: ENAMORA y elaboración propia.

Se puede observar que el rendimiento energético de la planta completa (electricidad y calor útiles) no varía mucho con su tamaño, siendo la conclusión que, desde pequeñas potencias, es posible pensar en la gasificación como alternativa tecnológica competitiva. Por ejemplo, desde 4.000-5.000 toneladas de biomasa al año, y operando entre 7.000 y 8.000 horas anuales, se pueden obtener rendimientos eléctricos de 1,3 kWh por kg de biomasa.

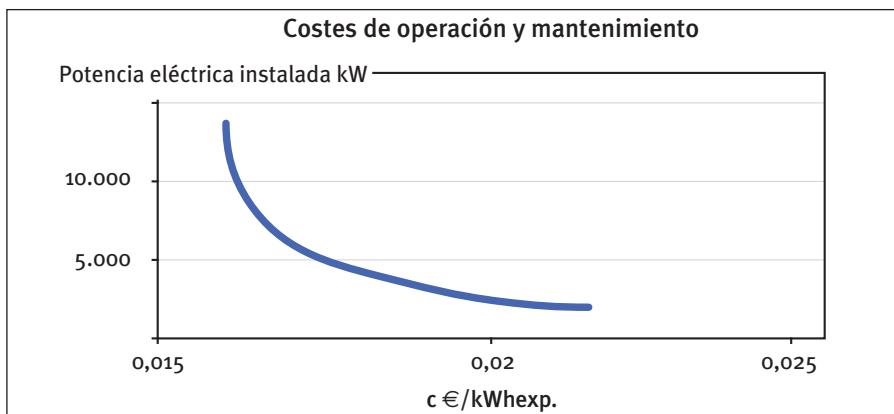
La rentabilidad va muy ligada al número de horas de utilización anuales. Los costes fijos, que son los más importantes en estos proyectos, no varían, y se diluyen en un mayor número de horas. Además, el saldo de los ingresos menos costes variables sí crece en proporción al tiempo de utilización.



Influencia del tamaño de la planta sobre el rendimiento eléctrico. Fuente: ENAMORA.

También es destacable la disponibilidad comercial de plantas en un amplio rango de capacidades de proceso anual, que oscilan desde las 4.000 a las 60.000 t/año de biomasa.

Los costes de operación y mantenimiento, sin contabilizar el coste de la biomasa, se ven muy positivamente afectados por el tamaño de la planta. A partir de los 8-9 MWe, que equivalen a unas 40.000 t/año de biomasa, este coste se estabiliza en valores poco mayores a 16 €/MWh.



En el procedimiento de llave en mano se puede barajar una inversión específica de las plantas completas de hasta 5 MW eléctricos que oscila en torno a 3.000 €/MW. Las plantas de mayor tamaño, entre 5 y 10 MW, pueden alcanzar valores de la inversión específica de 2.500 €/MW.

En España, esta tecnología ya está siendo implantada en el ámbito industrial en la alcoholera de la empresa Movialsa en Campo de Criptana (Ciudad Real). Estará integrada en una planta de cogeneración de electricidad de 5,9 MW (ver documento de cogeneración) a partir de orujillo de uva y de aceituna. Fuera de España, por ejemplo en la India, existen proyectos en fase de construcción.

3.2 GUASCOR

3.2.1 Datos generales

La empresa GUASCOR, con el apoyo financiero de IDAE, está poniendo a punto una tecnología de gasificación, para lo que tiene instalada una planta de gasificación de biomasa, en concreto astillas de madera y residuos forestales. La capacidad de generación de la planta es de 450 kWe, ampliable a 800 kWe .

La planta está situada en el Polígono industrial de Júndiz (Vitoria-Gasteiz), en terrenos donde en su día operó la planta de reciclado de aceites usados Enviroil Vasca.

El proyecto planteado desde un principio está dividido en tres fases, definidas por unos respectivos hitos de logro tecnológico.

- 1 Evaluación del prototipo de gasificador de tres cuerpos. Esta primera fase consiste en la instalación del reactor de tres cuerpos, con el fin de conseguir un syngas con un poder calorífico inferior mayor de 4,6 MJ/Nm³ con un rendimiento mayor del 65% en frío, en términos del PCI del gas y de la biomasa introducida.

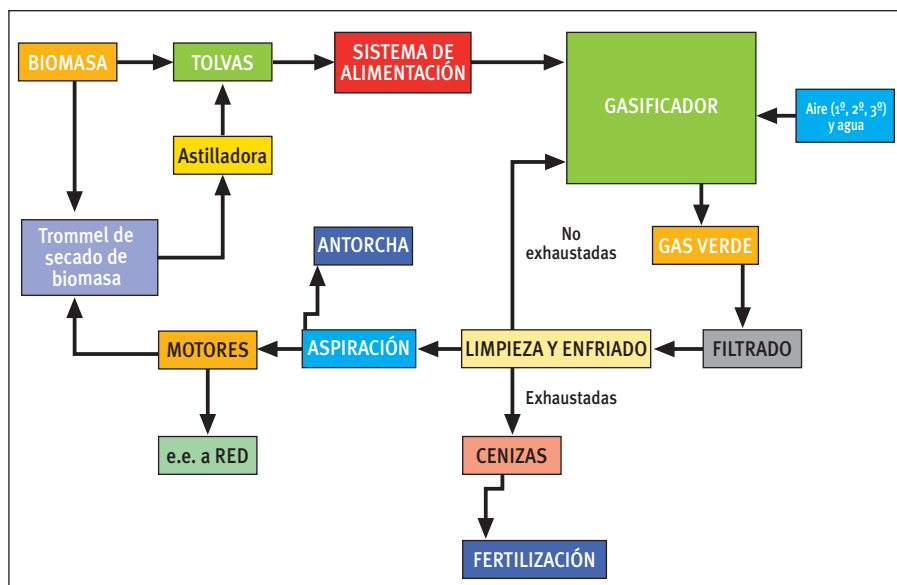
Características técnicas	
Biomasa: astillas de pino <10 cm	550 t/año
Horas funcionamiento	1.700 h/año
Input térmico nominal	1.711 kWt
Input térmico máximo	3.500 kWt
Capacidad gasificador	400-800 kg/h
Autoconsumo	85 kWe

- 2 Instalación del sistema de limpieza del syngas (un scrubber de biodiésel), y adecuación del mismo para su empleo en una planta de cogeneración.
- 3 Instalación de la planta de cogeneración basada en MCIA. Consta de dos motogeneradores de combustión interna, uno de ciclo Otto de 330 kwe y otro de ciclo diésel de 370 kWe, que es un motor dualfuel que trabajará con el 20% de gasoil y un 80% de syngas. Se ha añadido a la tercera fase de este proyecto un sistema de pretratamiento y secado de biomasa basado en una sistema de astillado (astillas de 5 cm) y secado vía trommel, el cual aprovecha los gases de escape de los 2 motores mencionados anteriormente.

A mediados de 2007, el proyecto está ultimando la fase dos, concretamente se ha finalizado la instalación del sistema de limpieza de gases, que hasta el momento están siendo quemados en antorcha, y se ha iniciado la instalación de los motogeneradores.

3.2.2 Funcionamiento de la planta de gasificación

La tecnología que está implantando GUASCOR se centra en un gasificador de tres reactores y una cuidadosa regulación de los caudales de aire que se introduce en cada uno de ellos. La planta sigue el siguiente esquema simplificado.



Esquema de funcionamiento de la tecnología GUASCOR.

Este sistema está pensado para trabajar tanto con un solo combustible, como con dos distintos. Es decir, permite realizar pruebas con diferentes proporciones de mezcla de dos biomasa distintas. Por eso, está dotada de dos tolvas de alimentación de biomasa.

Actualmente la carga de las tolvas es sencilla. Sólo es necesario el trabajo de un operario con una pala cargadora a tiempo parcial (aprox. 10%).



Llenado de la tolva pequeña de alimentación de biomasa. Fuente: GUASCOR.

Las tolvas tienen en su base sendos tornillos sin fin que transportan la biomasa al sistema de alimentación del gasificador. Éste tiene un diseño multi-etapa novedoso formado por tres reactores.

El gasificador es del tipo lecho móvil *updraft* (biomasa y agente gasificante a contracorriente), aunque su perfil es totalmente atípico de la anterior familia y no es comparable a ninguna otra tecnología conocida.

La biomasa y los productos que se van formando no circulan por los tres cuerpos, sino que a partir del primero se separan las fracciones gaseosas y sólidas, que, tras seguir caminos distintos, vuelven a reunirse en el reactor de reducción en la parte inferior del cuerpo del gasificador.

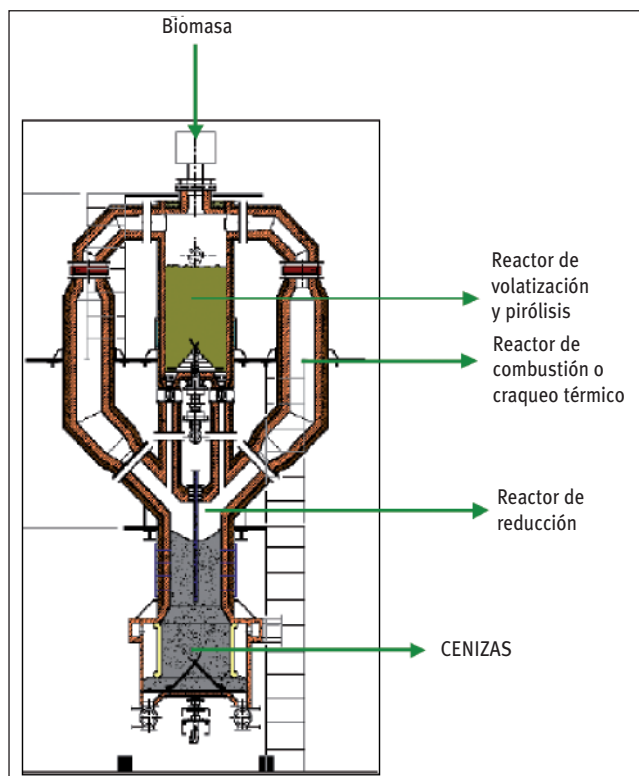
En la siguiente imagen se esquematiza la operación del gasificador y qué reacciones se producen en qué cuerpos del gasificador.

Aunque las reacciones se producen en continuo en los tres cuerpos, siguiendo el camino de la biomasa, el funcionamiento es el siguiente:

- El primer reactor (superior), en el que se produce el secado, la pirólisis y volatilización de la biomasa, tiene la misión de transformar la biomasa en gases y material carbonoso (char). En este proceso, el gas y los sólidos volátiles son arrastrados por la corriente de gas hacia el segundo reactor (brazos laterales), y el char cae por gravedad al tercer reactor (inferior). El aire primario se introduce por la base del reactor mediante un distribuidor de aire de material cerámico, que mantiene una buena homogenización del lecho de volatilización.
- El segundo reactor, en donde se produce la combustión y craqueo térmico de los alquitranes pesados procedentes del gas de la fase de pirólisis anterior, mediante una combustión parcial a elevada temperatura. Lo que se consigue en esta etapa es que los alquitranes pesados se craquen por

temperatura y por reacciones de combustión y pirólisis en otros más simples, evitando problemas de condensación y taponamiento. En este proceso, el gas pierde poder calorífico ya que se quema parcialmente. Para forzar estas reacciones, se introduce aire secundario.

- Para finalizar la transformación de la biomasa en syngas se dispone el reactor de reducción en la parte inferior del gasificador. En él se mezcla el gas procedente del reactor de craqueo y el char procedente del primer reactor. En su interior se produce la rotura de las moléculas pesadas del char, dando lugar a cenizas y enriqueciéndose el poder calorífico del syngas, que sale por la parte inferior del reactor libre de alquitranes pesados, pasando al sistema de limpieza y acondicionamiento. La rotura de las moléculas pesadas del char se debe a las altas temperaturas del gas libre de oxígeno que procede del segundo reactor y el aire y el agua dosificados en diferentes puntos de la masa de char.



Esquema del reactor multi-etapa de la tecnología implantada por GUASCOR.



Arriba, filtro cerámico de syngas verde. A la derecha, soplantes y torre del scrubber. Fuente: GUASCOR.



El gas verde cede parte de su calor al aire que se usa como gasificante. Después es postenfriado antes de ser introducido en un filtro cerámico de alta eficiencia, con un ciclón montado en by-pass que sólo funciona cuando el syngas no reúne las condiciones para su paso por el filtro, es decir, cuando la temperatura del gas es baja.

El filtro cerámico se limpia por secciones, mediante soplado con nitrógeno, de forma que siempre esté limpio sin necesidad de paradas.

Tras la retirada de las partículas, el syngas es lavado, es decir, liberado de alquitranes en un scrubber (ducha) de biodiésel. En el scrubber se realizan dos labores importantes: la eliminación de los alquitranes simples que no pudieron ser eliminados en la fase de craqueo, y la refrigeración y acondicionamiento del syngas, para su posterior uso en motores de combustión interna para generación de energía eléctrica.

3.2.3 Calidad del gas

Para el correcto funcionamiento de los motores es necesario que el gas de síntesis cumpla unos determinados requisitos en cuanto a partículas y temperatura de rocío. En los últimos tiempos se han venido utilizando los siguientes valores de referencia:

	Concentración límite
Partículas	< 50 mg/Nm ³
Tª rocío syngas	< 50 °C



Gasificador multi-etapa de Guascor. Fuente: GUASCOR.

Los criterios han evolucionado fruto de la investigación tecnológica en el siguiente sentido: como conclusión extraída de la realización de mediciones en la planta de Mora de Ebro, se ha observado que la limitación de 50 mg/Nm³ no responde en absoluto a los requerimientos prácticos, dada la influencia de diferentes tipos de compuestos agrupados bajo la denominación de alquitranes. Por tanto, el parámetro fundamental que muestra si el motor funciona o no correctamente con un combustible que tiene familias de alquitranes, no es tanto la concentración de éstos

sino la temperatura de rocío de dicha mezcla de alquitranes contenidos en el gas combustible que alimenta al motor.

A partir de los valores de operación admitidos para la aplicación de syngas en motor, con respecto a la temperatura de gas de 50 °C, se ha determinado que es suficiente para el correcto funcionamiento del motor que la temperatura de rocío de los alquitranes sea inferior a 50 °C.

Por otro lado, GUASCOR ha llevado a cabo un proyecto con el CENER, durante dos años, para establecer un método rápido y simplificado de cuantificación y determinación de alquitranes de diferentes familias y partículas en plantas de gasificación de biomasa con aplicación en motores de combustión interna.

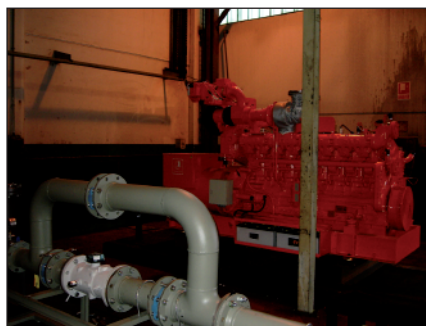


Scrubber de biodiésel. Fuente: GUASCOR.

3.2.4 Gestión de subproductos

Esta tecnología genera una serie de subproductos que pueden clasificarse según su estado:

- Efluentes sólidos: son compuestos de carbono fijo y cenizas. Dado su alto contenido en carbono pueden tener distintos fines:
 - Cenizas exhaustadas: uso en agricultura como fertilizante.
 - Cenizas no exhaustadas: pueden recircularse al gasificador o emplearse como material filtrante.
- Emisiones atmosféricas: son los gases de escape procedentes de los motores de combustión interna, que cumplen la normativa vigente.



Moto-generador de syngas. Fuente: GUASCOR.

3.2.5 Sistema de control y monitorización

La planta dispone de gran cantidad de sondas, medidores y analizadores, mucho más allá de lo que exigiría una planta comercial. La razón es poder monitorizar de forma muy detallada todos los parámetros que intervienen en las reacciones químicas que se producen, así como la dinámica de todos los fluidos que se manejan y, por supuesto, el caudal y composición exacta del syngas.

Tras multitud de ajustes, pruebas y análisis se ha podido comprobar que el gas es apto para su consumo en motor, por lo que GUASCOR pone en marcha el grupo de motogeneradores en noviembre de 2007 y planea instalar el sistema de preparación de la biomasa para complementar el proyecto.

3.3 INERCO

3.3.1 Tecnología y funcionamiento

La tecnología de gasificación que INERCO pretende explotar comercialmente está basada en un reactor de lecho fluido burbujeante atmosférico con temperaturas de operación de 800 °C y que emplean como agente gasificante aire ambiente.

Para ello, se ha construido una planta con una capacidad de tratamiento de 15 t/día (equivalente a 3 MWth) de biomasa tipo astilla o pellet, siendo un desarrollo pre-competitivo para los tamaños de hasta 15 MWth, que en una primera fase, se tiene como objetivo alcanzar. Esta iniciativa cuenta con el apoyo de la Consejería de Innovación de la Junta de Andalucía, la Agencia Andaluza de la Energía y la Corporación Tecnológica de Andalucía.

La planta dispone de un parque de almacenamiento cubierto que garantiza una autonomía de operación de la planta de 5 días, y permite el almacenamiento de distintos tipos de biomasa.

Para tratar de interferir lo menos posible en la operación normal de las instalaciones en las que se ha implantado, se dispone de una tolva con una capacidad equivalente al consumo diario, y que requerirá la intervención de un operario con una pala cargadora, durante una hora aproximadamente, una vez al día.

Desde la tolva diaria, mediante un elevador de cangilones, se lleva la biomasa hasta un sistema de doble tolva que dispone de una válvula de aislamiento intermedio para evitar posibles fugas de gas desde el sistema de gasificación. Asimismo, la tolva de alimentación final está inertizada con nitrógeno, asegurando la estanqueidad al paso del gas. Las tolvas alimentan a un sistema de doble

tornillo, uno de dosificación y el segundo de paso rápido y refrigerado con agua, para conseguir la homogeneidad en el lecho. Junto al sistema de alimentación de biomasa hay una tolva de inerte, que proporciona el inventario necesario en el gasificador por la pérdida de parte del lecho durante la operación de extracción de cenizas.



Planta de gasificación de INERCO.

La biomasa se introduce en el gasificador por la parte inferior del lecho mediante el tornillo sin fin con camisa de refrigeración. En el lecho se producen las reacciones de gasificación de la biomasa, con un elevado rendimiento de conversión gracias a la fluidificación del lecho.

El sistema de extracción de cenizas en continuo consiste en un cenicero central en el plato distribuidor y extracción mediante tornillo sin fin refrigerado.

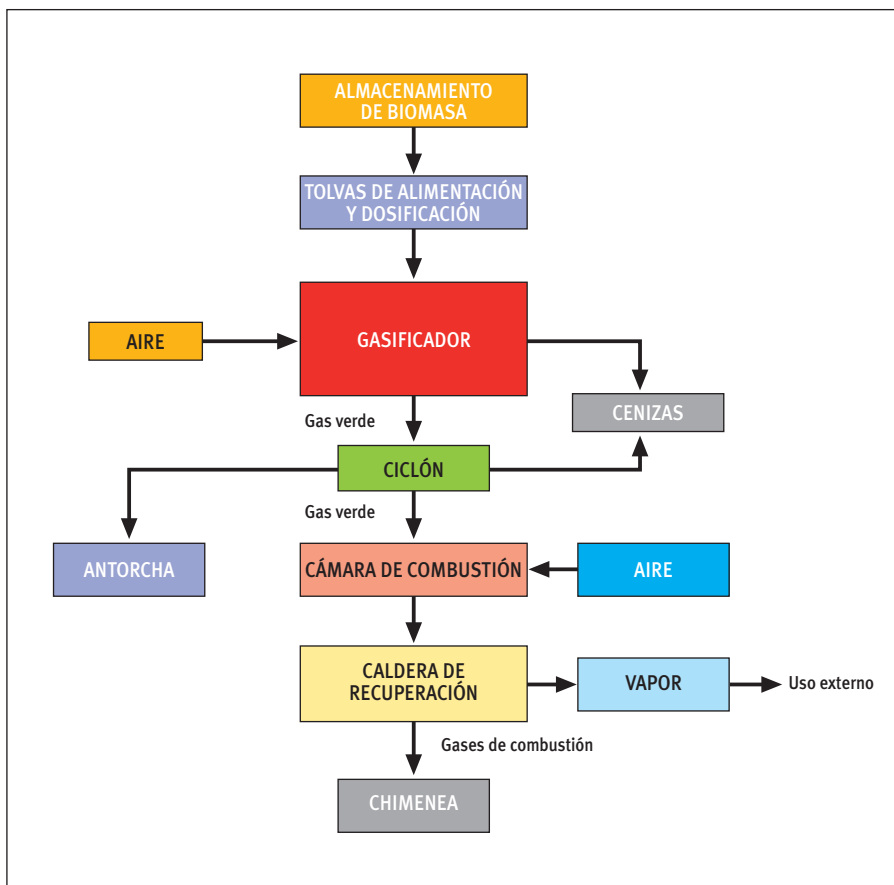
El gas pobre generado en el proceso de gasificación, con un rendimiento (*hot gas efficiency*) superior al 80%, es depurado en un ciclón de alta temperatura, en el que se retiene la materia particulada (cenizas volantes e inerte elutriado), consiguiendo un nivel de limpieza del gas suficiente para su posterior aprovechamiento térmico en una caldera de vapor.



Cámara de combustión y caldera de recuperación.

El gas de síntesis pasa a una cámara combustión donde es quemado antes de introducir los gases de combustión a una caldera de recuperación en la que se genera vapor de agua para su uso externo. Cuando no hay demanda térmica el gas es quemado directamente en una antorcha.

La operación descrita se esquematiza a continuación:



Esquema de funcionamiento de la tecnología de INERCO.

3.3.2 Características de la planta

Actualmente en la planta se realiza un aprovechamiento térmico del gas para generar vapor que se exporta a una instalación próxima de tratamiento de residuos. Se ha dejado reserva de espacio y auxiliares en la planta para acometer el diseño y ejecución, en una segunda fase, de un sistema de tratamiento de gases flexible, basado en medidas primarias y tecnologías convencionales final de línea, con el fin de definir la vía óptima técnico-económica en función del uso final del gas.

Las principales características, por tanto, de diseño de la planta de INERCO, se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de gasificador	Lecho Fluido Burbujeante Atmosférico
Potencia térmica (MWth)	3
Agente gasificante	Aire
Presión (Bar)	- 0,3
Temperatura de operación (°C)	800
Tipo de biomasa a utilizar	Pelets/astillas de poda de olivar/orujillo
Capacidad de tratamiento de biomasa (tn/día)	15
Rendimiento térmico (%)	≥80
Personal necesario	6 (1 operario a un turno + 1 responsable de planta)

Características de la planta. Fuente: INERCO.

3.4 TAIM-TFG

3.4.1 Descripción de la instalación

En esencia, la planta de TAIM consiste en una unidad de gasificación de biomasa (gasificador) para cogeneración con motor a gas de síntesis equipado con alternador. El gasificador es del tipo *downdraft*, que opera hasta 1.200 °C, y emplea aire como agente gasificante.

La alimentación de biomasa se realiza desde un silo, que permite una autonomía de 48 horas sin necesidad de reponer biomasa, aunque es posible aumentarla, a discreción del usuario.

El conjunto se completa con el sistema de adecuación del syngas a las características que requiera el módulo de generación eléctrica, y una antorcha de eliminación de exceso de gas de síntesis, permitiendo operar al módulo gasificación ante eventuales periodos de mantenimiento en el motor del módulo generación.

3.4.2 Características técnicas

En la siguiente tabla se resumen las características principales de la planta y los parámetros tipo de operación:

Gasificación	
Tipo de gasificador	<i>Downdraft</i>
Caudal de syngas (Nm ³ /h) ⁽¹⁾	1.380 - 1.490
Composición del syngas	N ₂ , 50-55%; H ₂ , 12-15%; CO, 15-20%; CO ₂ , 8-15%; CH ₄ , 2-5%; C ₂ H ₆ , 1%
PCI syngas (kWh/ Nm ³) ⁽¹⁾	1,52 - 1,61
Potencia térmica (MWth)	2,1 - 2,4
Agente gasificante	Aire
Temperatura de operación (°C)	1.200
Tipo de biomasa a utilizar	Diversos residuos agroforestales y madereros
Capacidad de tratamiento de biomasa (kg/h)	650 - 700
Humedad de la biomasa (%)	20 - 30
Rendimiento térmico (%)	75 - 85
Caudal agua de lavado y refrigeración (m ³ /h) ⁽²⁾	0,50
Cenizas (kg/h) ⁽¹⁾	35
Motor-generator	
Potencia eléctrica (kWe)	767
Rendimiento (%)	36,1 - 37,3
Potencia térmica aprovechable (kWt)	1.200
Potencia térmica aprovechable (kcal/h)	1.021.782
Consumos y personal	
Dedicación de personal	1 turno de 1 persona, 5 días por semana
Autoconsumo eléctrico (%)	10 - 14
Aceite lubricante (kg/h)	0,18 - 0,24

Emisiones	
Acústicas dB(A)	≤ 70
Atmosféricas NO _x (mg/Nm ³)	< 500
Atmosféricas CO (ppm)	< 3.000

Características de la planta. Fuente: TAIM-TFG. (1) Dependiendo del tipo y de la granulometría de la biomasa. (2) Considerando que no existen contaminantes en la biomasa que alimenta al gasificador.



Motogenerador de syngas. Fuente: TAIM-TFG.

3.4.3 Sistemas de control y seguridad

TAIM-TFG ha desarrollado un sistema de control del módulo de gasificación diseñado y programado para supervisar los parámetros de funcionamiento del gasificador, retirada de cenizas y los restantes equipos como intercambiadores, equipos de lavado de gases y acondicionamiento de éste, que se controlan en función de las temperaturas a alcanzar y del caudal de gas.

La central dispone de un circuito de seguridad que funciona mediante continuidad. Dentro del sistema se incluyen las alarmas necesarias para asegurar, por un lado, que en caso de que el proceso de gasificación no se realice dentro de los parámetros normales, no se dañen elementos de la planta (motor, gasificador, etc.) y por otro, que eviten que al motor llegue un gas de síntesis cuyas características no cumplan los requerimientos mínimos de calidad.

En caso de parada por emergencia, la puesta en marcha de la gasificación debe realizarse con presencia en planta (la antorcha se debe encender siempre manualmente), si bien el módulo de generación puede arrancar sólo cuando se cumplan unas determinadas condiciones.

3.4.4 Modo de funcionamiento

La operación de la planta precisa una persona, un turno diario, cinco días a la semana, trabajando el resto del tiempo de modo automático. La persona realiza las labores de comprobación del buen funcionamiento de todos los sistemas mediante el seguimiento de los valores registrados en el puesto de control, así como de la observación directa de los componentes mecánicos de la instalación, y se puede encargar también del llenado del silo de biomasa cuando el nivel del mismo lo requiera.

IDA Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8 - 28004 Madrid
Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14
comunicacion@ida.es
www.ida.es

ISBN 978-84-96680-20-3



9 788496 680203

P.V.P.: 5 € (IVA incluido)