

Cogeneración a través de la gasificación de biomasa



Por encargo de:



Ministerio Federal
de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza
y Seguridad Nuclear

de la República Federal de Alemania



**Edición:**

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania
Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Proyecto Reducción de Emisiones a través de la Aplicación
de Cogeneración en los Sectores de la Industria y el Comercio en Chile
Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
+56 22 30 68 600
www.giz.de

Responsables:

Rainer Schröder / Cecilia Figueroa

Título:

Cogeneración con Motores de Combustión a Hidrógeno

Autor:

Bernhard Peters, Carlos Jorquera
Edición y revisión de contenidos: Cecilia Figueroa / Raúl Gálvez / Marco Céspedes

Aclaración:

El presente informe fue preparado por encargo del proyecto "Proyecto Reducción de Emisiones a través de la Aplicación de Cogeneración en los Sectores Industrial y Comercial en Chile" implementado por el Ministerio de Energía, Agencia Sostenibilidad Energética y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Sin perjuicio de ello, las conclusiones, opiniones y recomendaciones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. De igual forma, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar no constituye en ningún caso una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando se cite la fuente de referencia.

Santiago de Chile, noviembre de 2020.

Resumen Ejecutivo.

El presente estudio es una revisión de la tecnología de la cogeneración en Alemania, Austria y Suiza, en aplicaciones de pequeña escala con potencias de hasta 2 MWel, a través de la utilización de la energía de la biomasa sólida (gasificación de madera). Para ello, se realizó un levantamiento de la información disponible y de las principales consideraciones para la instalación y operación de este tipo de sistemas. Además, de una revisión de los proveedores de equipos de cogeneración con gasificación disponibles en el mercado de Alemania y Austria.

La madera es un combustible sólido que tiene una densidad energética que varía entre 15-17 MJ/kg (4,16 - 4,72 kWh/kg). El tamaño ideal de la astilla de madera para gasificación está entre los 30 y 70 mm, pero podría tener un mayor tamaño según la aplicación, mientras que el contenido de humedad máximo debe estar entre 15 y 20%. En cuanto al contenido de material fino debe estar por debajo de un 2% y libre de otros contaminantes.

La astilla de madera natural y no tratada químicamente, resulta ser el mejor combustible para el sistema de gasificación de gas de madera, ya que la rugosidad gruesa de la madera en forma de astilla asegura una gasificación óptima de esta.

El gas de madera obtenido del proceso de pirólisis tiene un contenido energético cercano a 1,4 kWh/m³, y se compone principalmente de nitrógeno (53-63%vol.), monóxido de carbono (15-20%vol), hidrógeno (10-14%vol), dióxido de carbono (8-10%vol), metano (2-3%vol) y otros compuestos en menor proporción.

La calidad y disponibilidad de la biomasa es crítica para asegurar el funcionamiento y vida útil del cogenerador. Una biomasa de baja calidad, es decir, con alto contenido de humedad, tamaño irregular y alto contenido de corteza, favorece la generación de alquitranes que aumentan los requerimientos de mantención de los equipos y disminuye la vida útil del sistema, y también conlleva a un mayor consumo de madera debido al menor contenido energético del gas de madera. Por lo tanto, la infraestructura, la preparación, secado y tratamiento de la biomasa son fundamentales para asegurar la calidad y disponibilidad de esta.

Los equipos de cogeneración con gasificación de madera son una tecnología madura basan su funcionamiento en la tecnología de motores alternativos de combustión interna para la combustión de gas de madera, la cual es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales, comerciales y en el sector público, en base a combustibles como el gas natural, gas licuado y biogás.

De la revisión de los proveedores de equipos en el mercado alemán y austriaco, se encontró que los equipos de gasificación de biomasa están comercialmente disponibles en módulos desde los 9 kW_{el} hasta los 500 kW_{el} de potencia eléctrica, pero si se requiere una potencia mayor, los proveedores de equipos y sistemas ofrecen sistemas conectados en cascada que se componen de 2 o más módulos y que pueden alcanzar 1 MW_{el} o más, según los requerimientos térmicos propios de cada instalación.

El rendimiento eléctrico de los equipos de cogeneración con gasificación de biomasa varía entre un 24% y un 30% (PCI), mientras que el rendimiento térmico entre un 47% y 61% (PCI), y algunos equipos, dependiendo de la calidad de la biomasa, pueden alcanzar hasta un 92% de rendimiento global (PCI). El rendimiento de estos sistemas tiene una fuerte dependencia de la calidad biomasa utilizada en cuanto al tipo de biomasa, el contenido de humedad y el tamaño de partícula, por lo cual son aspectos esenciales para considerar en el desarrollo de este tipo de proyectos.

Generalmente, los proyectos de cogeneración y gasificación se operan en lugares donde la biomasa está disponible localmente como por ejemplo: Forestales, aserraderos, plantas de energía distrital, hoteles, agrícolas, empresas industriales y en aplicaciones que requieran secado de madera, agua caliente, calefacción y procesos que requieran temperaturas menores a los 90°C. También es importante pensar en un modelo de negocio local dado que se puede acceder a un menor precio de la biomasa, lo que permite un menor periodo de amortización de la inversión y costos operacionales más bajos.

En términos de costo de inversión, la cogeneración con gasificación de biomasa tiene un costo específico mayor que un cogenerador con gas natural, pues incluye el costo adicional del gasificador y el lugar para el almacenamiento de la biomasa. Sin embargo, desde el punto de vista operacional la biomasa es competitiva dado que el costo por unidad de energía es más bajo en comparación con

otras fuentes energéticas. Como referencia se puede considerar que los costos específicos para módulo de cogeneración y gasificación tienen un orden de magnitud de 6.600-3.100 EUR/kWel (ex works) en un rango de 9 a 70 kWel.

La operación y mantenimiento es clave para asegurar el funcionamiento del cogenerador y por consiguiente, recuperar la inversión. Los sistemas que operan a biomasa tienen un costo menor en cuanto al combustible, pero exigen una mayor frecuencia de mantenciones en comparación con otras tecnologías (cada 500 a 800 h). Lo que aumenta el costo de mantenimiento del sistema frente a otras tecnologías de cogeneración.

En general, se requiere el control de las condiciones operacionales para facilitar la gasificación de la madera, la que tiene que ver con la pureza del gas (contenido de agua, oxígeno) y la estabilización del proceso de gasificación; esto evita la formación de alquitrán y la condensación de componentes de hidrocarburos que aumentan el desgaste y acortan la vida útil del motor a gas. La generación de alquitrán y su impacto negativo en el motor hacen del mantenimiento periódico una actividad esencial para mantener la vida útil del motor de combustión de biomasa y garantizar la rentabilidad del sistema.

Especialmente hay que asegurar una calidad mínima según los requerimientos de cada fabricante. Los principales parámetros por considerar son: La humedad, el tamaño, el tipo de biomasa y la disponibilidad del combustible.

Desde el punto de vista de la instalación se debe observar el espacio disponible para instalar los equipos de gasificación y cogeneración, pues requieren un mayor espacio en comparación con los motores y las microturbinas. También, se debe tener en cuenta el espacio disponible para el acopio de la biomasa con el fin asegurar el funcionamiento continuo del sistema.

Los equipos se ofrecen contenerizados ya que se disminuye el riesgo tecnológico dado que los equipos pueden ser contruidos en serie. También se pueden construir a la medida para ajustar su instalación a los requerimientos de espacio disponible.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.	3
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.	9
1.2. PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA.	11
1.2.1. Gasificación de lecho fijo.	12
1.2.2. Gasificación de lecho fluidizado.	13
1.3. INFRAESTRUCTURA, PREPARACIÓN Y TRATAMIENTO.	14
1.3.1. Infraestructura.	14
1.3.2. Preparación y secado.	14
1.3.3. Reducción de contaminantes.	14
1.4. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.	17
1.5. SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR.	18
1.6. EMISIONES Y RESIDUOS.	18
2. FABRICANTES Y PROVEEDORES DE EQUIPOS.	19
2.1. BURKHARDT.	19
2.2. ENTRENCO GMBH.	21
2.3. HOLZENERGIE WEGSCHEID GMBH.	22
2.4. SPANNER RE ² GMBH.	23
2.5. FRÖLING GMBH.	25
2.6. GLOCK ÖKOENERGIE GMBH.	26
2.7. SYNCRAFT.	28
3. COSTOS DE INVERSIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.	32
3.1. COSTO DE INVERSIÓN.	33
3.2. COSTOS FIJOS DE OPERACIÓN.	35
3.3. COSTOS VARIABLES DE OPERACIÓN.	35
3.4. RANGOS DE PRECIOS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS EN CHILE.	36

4. CONCLUSIONES.37

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Sistema de cogeneración con gasificador de madera (Syncraft) [4].....	12
Ilustración 2: equipos de cogeneración, Burkhardt.	20
Ilustración 3: Planta de cogeneración y gasificación en Ueno Village (Japón) [8].....	21
Ilustración 4: Equipos de Cogeneración Entrenco GmbH [9].	22
Ilustración 5: Módulo contenerizado Entrenco GmbH [10].....	22
Ilustración 6: Configuración de contenedores - Holzenergie Wegscheid GmbH [12].	23
Ilustración 7: Principio de funcionamiento de equipos de cogeneración, Spanner Re2 GmbH.	24
Ilustración 8: Instalación de Cogeneración en Cascada en Aserradero - Spanner Re2 GmbH [2].....	25
Ilustración 9: Gasificador de lecho fijo y cogenerador - Fröling GmbH [14].....	26
Ilustración 10: Equipos de cogeneración, Glock Ökoenergie GmbH.	28
Ilustración 11: Equipos de cogeneración, Syncraft.....	29
Ilustración 12: Costo específico (ex works) de módulo de cogeneración a biomasa.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los biocombustibles sólidos [1].....	10
Tabla 2: Composición del gas de madera [3].	10
Tabla 3 Especificaciones generales del fabricante Burkhardt GmbH para sistemas de cogeneración.	19
Tabla 4 Sistemas de cogeneración del fabricante Burkhardt GmbH con gasificación de biomasa.	19
Tabla 5 Especificaciones generales del fabricante Entrenco GmbH.....	21
Tabla 6 Sistemas de cogeneración del fabricante Entrenco GmbH.....	21
Tabla 7 Especificaciones generales del fabricante Spanner Re2 GmbH.....	24
Tabla 8 Sistemas de cogeneración del fabricante Spanner Re2 GmbH.	24
Tabla 9 Especificaciones generales del fabricante Fröling GmbH.....	25
Tabla 10 Especificaciones generales del fabricante Glock Ökoenergie GmbH.....	26
Tabla 11 Sistemas de cogeneración del fabricante Glock Ökoenergie GmbH.....	27
Tabla 12 Sistemas de cogeneración del fabricante SYNCRAFT.	28
Tabla 13: Resumen equipos de Cogeneración y gasificación de biomasa.....	31
Tabla 14 Análisis económico de sistemas de cogeneración en Alemania (2019).....	32

1. Introducción

La bioenergía abarca una amplia variedad de materias primas, alternativas técnicas y áreas de aplicación. Por ejemplo, la bioenergía se puede obtener de residuos agrícolas, de plantas que se han cultivado específicamente para la agricultura (por ejemplo: maíz, trigo, remolacha azucarera, girasoles, palmas de aceite); de árboles de crecimiento rápido que se cultivan en tierras agrícolas (plantaciones de corta rotación) y de madera de la silvicultura.

La bioenergía puede estar disponible en forma gaseosa como biogás o biometano, sin embargo también es posible usarlo en forma líquida, por ejemplo, como aceite vegetal puro utilizado en centrales térmicas o como biocombustible. En forma sólida se encuentra disponible, por ejemplo, como troncos, astillas de madera y pellets. La amplia variedad en que se ofrece la biomasa, al igual que las distintas tecnologías para su conversión, permiten que la bioenergía esté incorporada en diversas aplicaciones: como la generación de calor para calefacción del sector residencial, en procesos industriales que consumen calor, generación de electricidad, entre otros.

Los equipos de cogeneración con gasificador de madera, transforman la energía primaria de la madera en energía secundaria (gas de madera) y en energía útil (electricidad ecológica y calor o bio-calor). Un sistema de cogeneración de biomasa de madera está compuesto de un gasificador de madera con sistema de enfriamiento y lavado, el cual va acoplado a un motor a gas de cogeneración para la generación de electricidad y calor.

En cogeneración con motores de combustión de gas de biomasa, la madurez de esta tecnología está relacionada al desarrollo de los motores de gas, y en la gasificación de la madera al desarrollo tecnológico del gasificador. El gran desafío de esta tecnología es que los proyectos son específicos o personalizados, y los costos de las materias primas junto a los mantenimientos frecuentes, son la variable económica más importante dentro del modelo de negocio. Es necesario vincular la demanda de calor con la demanda de electricidad, que determina el diseño del sistema de cogeneración.

1.1. Caracterización de la biomasa.

La madera es un combustible sólido no homogéneo que se compone de celulosa, lignina, agua, resinas, ácidos, aceites, minerales, entre otros, con aproximadamente un 85% de componentes

volátiles. Cerca del 15% se combustiona en estado sólido, como carbón de madera. La densidad energética de la madera varía entre 15 – 17 MJ/kg (4,16-4,72 kWh/kg).

Tabla 1: Características de los biocombustibles sólidos [1].

	Biomasa triturada	Astillas	Pellets
Poder calorífico inferior	800 a 850 kWh/m ³ st	800 a 850 kWh/m ³ st	3120 a 3250 kWh/m ³ st
Densidad aparente	Aprox. 215 kg/ m ³ st	Aprox. 215 kg/ m ³ st	Mínimo 650 kg/ m ³ st
Contenido de humedad	Variable entre 25 y 40%	Variable entre 25 y 40%	Menor a 10%
Granulometría	Heterogénea	homogénea	Homogénea
Contenido de cenizas	Mayor a 2%	Menor a 2%	Menor a 0,5%

El proceso de gasificación de la madera se logra a través del proceso de pirólisis (piro: fuego, lisis: disociación), que corresponde a una destilación seca. En otras palabras, corresponde a la división térmica de los compuestos químicos, que con altas temperatura rompe los enlaces en las moléculas más grandes. Esto ocurre en ausencia de oxígeno, de forma de evitar la combustión de los gases formados que son altamente inflamables. Eventualmente se utilizan medios deshidratadores o deshidratantes durante el proceso de pirólisis. El gas obtenido del proceso tiene una densidad energética promedio de aproximadamente 1,4 kWh/m³¹ y como regla general, de cada 0,9 kg de madera se genera cerca de 1 kWh de energía eléctrica [2].

En la gasificación, la biomasa es descompuesta, vía pirólisis y en ausencia de oxígeno, posteriormente mediante la adición de aire controlado, se produce un proceso de oxidación parcial de dichos gases para producir un gas combustible compuesto por CO (15 a 20% Vol.), H₂ (10 a 14% Vol.) y bajas concentraciones de CH₄ (2 a 3% Vol.) más gases inertes, como CO₂ (8 a 10% Vol.) y N₂ (53 a 63% Vol.), y otros hidrocarburos superiores y compuestos aromáticos (alquitranes condensables), además de algunos etilenos y vapor de agua.

Tabla 2: Composición del gas de madera [3].

Compuesto	Composición en en volumen.
Nitrógeno	53 -63%
Monóxido de carbono	15-20%

¹ El poder calorífico del gas de madera es variable y depende de la composición del gas obtenido luego del proceso de gasificación, considerando los siguientes poderes caloríficos inferiores: CO (12.622 MJ/m³), H₂(10.788 MJ/m³) y CH₄ (35.814 MJ/m³) [20].

Hidrógeno	10-14%
Dióxido de carbono	8-10%
Metano:	2-3%

La astilla de madera natural y no tratada químicamente, resulta ser el mejor combustible para el sistema de gasificación de gas de madera, ya que la rugosidad gruesa de la madera en forma de astilla asegura una gasificación óptima de ésta. La astilla debe tener un tamaño ideal entre 30 – 70 mm (G50) y, eventualmente más grande dependiendo de la aplicación, y una humedad máxima de 15 – 20 %, pudiendo ser mayor en algunos equipos de gasificación. El porcentaje de material fino debe estar por debajo del 2 % y debe estar libre de aserrín, virutas y corteza. Además, debe estar limpio de componentes metálicos o de contaminación con minerales. Dependiendo del tipo de madera utilizado (madera blanda o dura), el rendimiento indicado y el consumo de las astillas pueden fluctuar.

Es importante asegurar que la madera no esté podrida y que no esté durante largos períodos de tiempo almacenada antes de ser utilizada como combustible en el gasificador. Una madera de baja calidad tiene un menor contenido de gas (menor poder calorífico), lo que conlleva a un mayor consumo de combustible (madera).

1.2. Proceso de gasificación de biomasa.

Los equipos de cogeneración con gasificador de madera transforman la energía primaria de la madera, en energía secundaria gas de madera y en energía útil (electricidad ecológica y calor o bio-calor), además de las pérdidas energéticas derivadas de los procesos de conversión y distribución. Un sistema de cogeneración de biomasa de madera consiste, en términos básicos, de un gasificador de madera con un sistema de enfriamiento y lavado, acoplado a un motor a gas de cogeneración para la generación de electricidad y calor, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Otras tecnologías, como turbinas y microturbinas de gas no están disponibles comercialmente, aunque teóricamente posibles.

El calor útil del proceso se obtiene a partir del sistema de enfriamiento de agua del motor y de los gases de combustión en el equipo de cogeneración, y a partir del sistema de enfriamiento en el gasificador. La eficiencia eléctrica del sistema es baja (24-30%), pero relativamente mayor en comparación con otras alternativas, como por ejemplo la ORC que alcanza 10%, lo que trae consigo beneficios para el medio ambiente por el ahorro de energía primaria y con ello una disminución de las emisiones de gases efecto invernadero.

Esquemáticamente, un sistema típico gasificación y motor de combustión interna se representa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

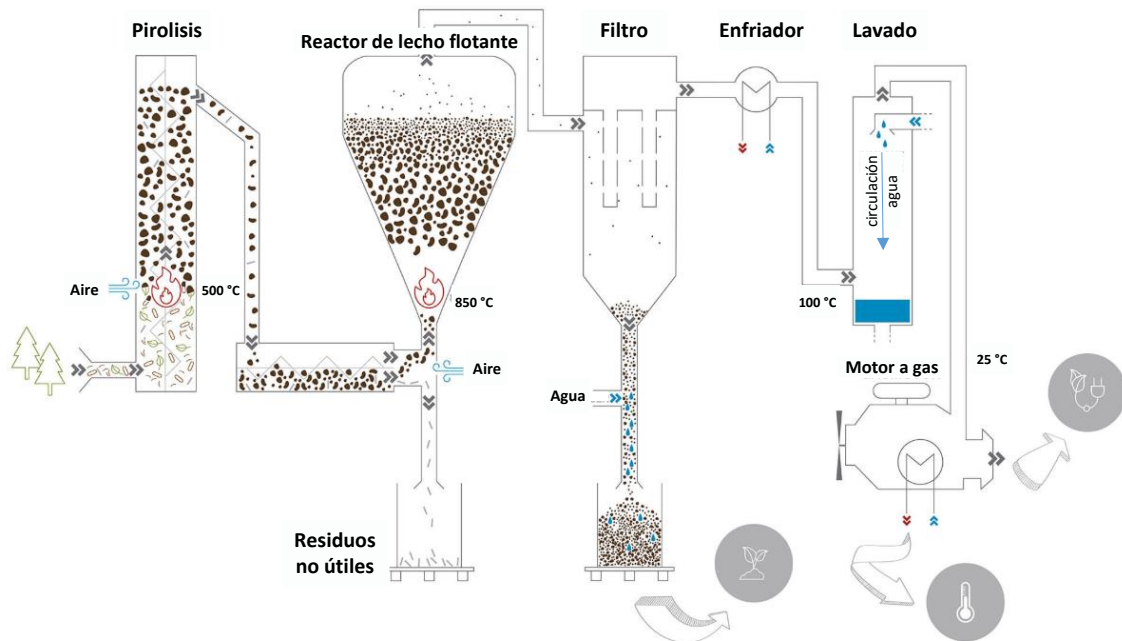


Ilustración 1: Sistema de cogeneración con gasificador de madera (Syncraft) [4].

El proceso de gasificación de la madera es en ausencia de oxígeno, en el cual la madera se calienta hasta cerca de 700 – 800°C, lo que permite generar el gas de madera. Un proceso estándar donde se consumen 100 kg de madera por hora para producir en el proceso de gasificación 34 – 40 m³ de gas de madera, además de un residuo de 25 – 30 kg de carbón de madera, 4 – 5 kg de alquitrán y 40 - 55 kg de vinagre de madera.

1.2.1. Gasificación de lecho fijo.

En el caso de un sistema de gasificación de lecho fijo, la biomasa es gasificada térmicamente usando aire. El combustible queda expuesto al agente de gasificación en una cama compacta, mientras que los generadores de gas están diseñados como hornos de cuba. Existen tecnologías de flujo cruzado y de flujo paralelo para la gasificación de lecho fijo.

En el **flujo cruzado**, el combustible y el flujo de gas se direccionan en sentido contrario y el oxidante fluye primero a través de las zonas calientes del gasificador. Las potencias típicas para esta tecnología son usualmente hasta 10 MW.

Dentro de las ventajas de esta configuración, se logra un buen secado del combustible en la zona de secado, por lo que se pueden utilizar combustibles húmedos de hasta un 50% de contenido de agua; no tiene restricciones respecto a la geometría, también se puede utilizar material de grano fino (por ejemplo paja cortada); el gas tiene una temperatura relativamente baja a la salida del gasificador (80 – 250 °C) y por ello requiere de menos enfriamiento.

Como desventajas, destacan la formación de alquitrán y otras sustancias orgánicas, las que deben ser removidas antes de que el gas ingrese al motor de cogeneración. Actualmente esta tecnología de flujo cruzado no existe como un producto estandarizado en el mercado.

En el **flujo paralelo**, la gasificación de lecho fijo se basa en tecnologías de procesos con zonas específicas definidas para la reacción, secado, descomposición, desgasificación y gasificación de la madera. Este proceso funciona sin presión, de arriba abajo, en la misma corriente de flujo. Tanto el aire como el gas producido son conducidos en la misma dirección de flujo hacia el combustible. Las potencias típicas para esta tecnología no superan los 5 MW, ya que para mayores potencias los flujos de proceso se controlan con menor precisión.

Una de las de las ventajas es que se logra un gas de buena calidad y pobre en alquitranes, pero tiene un alto requerimiento para el combustible respecto la humedad (10 – 20 % es el rango óptimo) y de tamaño (30 – 100 mm longitud del borde); y además una alta temperatura de los gases hace necesario enfriarlos en para utilizarlos en motores de cogeneración, obteniéndose así un uso menor del calor sensible; actualmente esta tecnología al igual que la de flujo paralelo no existe como producto estandarizado en el mercado.

1.2.2. Gasificación de lecho fluidizado.

En el caso de un sistema de gasificación de lecho fluidizado, la gasificación ocurre en un lecho fluidizado estacionario o circulante en un reactor cilíndrico, en el cual circulan combustibles de madera de grano fino, lo que permite que la astilla de madera se convierta en gas muy rápido. Al proceso sólo se agrega oxígeno para que la oxidación del carbono permanezca incompleta y se genera un gas que contenga los componentes combustibles.

Las potencias típicas para esta tecnología están por sobre los 10 MW y hace sentido su utilización en combinación con turbinas a gas. Se logra un gas pobre en alquitranes y alto contenido de cenizas en el gas. Esta tecnología tiene un alto costo de inversión debido a la complejidad del equipo.

Una de las desventajas de los gasificadores de biomasa, tanto de lecho fijo o fluidizado es que son específicos o están optimizados para el tipo de biomasa para el que fue definido.

1.3. Infraestructura, preparación y tratamiento.

1.3.1. Infraestructura.

La infraestructura requerida para un sistema de cogeneración de gas de madera debe contemplar un espacio adecuado para la instalación del sistema; un lugar para el almacenamiento de las astillas con suministro continuo; los puntos de inyección al sistema de distribución de calor y un punto para el consumo y/o inyección para la electricidad; chimenea para los gases de escape; ventilación de los espacios y de la zona de quemadores; un sistema de enfriamiento de emergencia o uso para el secado de madera. Además del espacio disponible para realizar los mantenimientos preventivos y correctivos y los requerimientos para el cumplimiento de la normativa de emisión de ruido.

1.3.2. Preparación y secado.

La preparación de la astilla se puede realizar con un picador de tornillo o uno de tambor. La astilla tiene en su estructura muchos agujeros, por donde fácilmente se puede conducir la humedad de la madera. Las astillas obtenidas de madera fresca pierden cerca de 0,5% de humedad por día, bajo condiciones adecuadas de almacenamiento y como consecuencia de la gran superficie expuesta de la astilla con el ambiente. Cuando no se tiene las condiciones para el almacenamiento que permitan un secado natural de la madera, entonces se recurre a sistemas mecánicos de secado, como por ejemplo, el más recomendado es el secador automático de eje continuo. Este sistema tiene la ventaja de que el calor residual disponible se puede aprovechar en la etapa de secado de madera, aumentando así la eficiencia energética del sistema.

1.3.3. Reducción de contaminantes.

Los problemas en la gasificación de madera tienen que ver con la pureza del gas generado y con la inestabilidad del proceso de gasificación; con la formación de alquitrán y la condensación de componentes de hidrocarburos que aumentan el desgaste y acortan la vida útil del motor a gas, lo que a menudo conduce a que los tiempos de operación de los equipos de cogeneración sean demasiado cortos, resultando en una baja disponibilidad que afecta negativamente la rentabilidad del proyecto. Además el gas de madera debe tener un contenido inferior a 50 mg de alquitrán por m³, para así no dañar el motor a gas. La temperatura en el reactor es decisiva en la formación

de alquitrán en el gas de madera, por lo que para reducir la formación de alquitrán el gas debe permanecer un largo tiempo a alta temperatura en el reactor.

El punto de rocío del gas de madera se encuentra a una temperatura entre 250 – 300 °C, lo cual dificulta el manejo del alquitrán durante la limpieza del equipo, y aumenta el uso de energía. En este caso el punto de rocío es excesivamente alto por lo que el gas final producto debe ser tratado para filtrar los alquitranes que se generan.

Además, la aglomeración con partículas de polvo en el aire y la condensación, pueden provocar el bloqueo de válvulas y filtros, ocasionando un mal funcionamiento de los componentes del equipo aguas abajo.

Para la purificación del gas de madera (eliminación de alquitrán) hay opciones que permiten separar el alquitrán después del reactor de gasificación (vía proceso de separación) o para convertirlo en otro compuesto (división molecular). Investigaciones al respecto, se están realizando en el instituto Institut für Energietechnik de la universidad TU Berlín, y en el instituto Institut für Technische Chemie de la universidad TU Dresden.

Los **métodos físicos** para la separación de los alquitranes utilizan los procesos de adsorción y absorción. En el proceso de adsorción, los hidrocarburos de alto peso molecular se retiran en superficies, mediante filtros con materiales adecuados (filtro de metal, filtro de cerámica, carbón activado, lecho de arena). En los procesos de absorción, se reduce el alquitrán a través de un lavado húmedo con un medio disolvente o agua. Este método no es lo suficientemente efectivo para reducir el alquitrán, ya que sólo los componentes solubles (fenoles) pueden ser eliminados y se generan aguas contaminadas que requieren de un tratamiento adicional.

Los **métodos termoquímicos** para la separación de los alquitranes utilizan separación térmica y separación con catalizadores. Con el método de separación térmica se puede lograr un grado de conversión del 50% a temperaturas de 900-1000 °C. Al combinar la división térmica con la oxidación parcial (con suministro de aire secundario), el grado de conversión puede aumentar a más de 90%, dependiendo de la cantidad de aire suministrado (en cantidades sub estequiométricas). En este método, los requisitos de calidad del gas para motores de combustión interna no pueden cumplirse con certeza, ya que permanece un contenido residual de alquitrán mayor a 0,1 mg/m³.

En cuanto al método de separación con catalizadores, hay catalizadores comerciales utilizados en procesos de reformado² con vapor a base de níquel, o minerales, que contienen óxido de calcio u óxido de magnesio (dolomita y caliza). Los principales componentes del alquitrán en el gas de madera corresponden a ciclos aromáticos y a anillos condensados (benceno, naftaleno).

Los minerales carbonatados (dolomita) son económicos y se pueden agregar al material inerte del lecho fluidizado como aditivo. La baja estabilidad térmica de la dolomita es desventajosa, ya que a 780°C ocurren los primeros cambios de fase debido a la sinterización, reduciendo así la superficie activa para el proceso de reformado.

Los catalizadores de níquel son mucho más costosos, pero se pueden usar simultáneamente como separadores de alquitrán y amoníaco. Tienen una mayor estabilidad mecánica y térmica, y pueden regenerarse mejor. Existe el riesgo de contaminación por sustancias que contienen azufres (H₂S), lo cual es una desventaja, pequeñas cantidades de H₂S son suficientes para la desactivación del catalizador.

Los catalizadores de níquel se han optimizado hasta ahora para un campo de aplicaciones diferentes y, por lo tanto, sólo tienen una efectividad limitada para la separación de alquitrán del gas de madera. Por ello se requiere en este punto de desarrollo de catalizadores para esta tecnología.

El instituto Fraunhofer UMSICHT de Oberhausen, está desarrollando nuevos catalizadores utilizando la espectroscopia de masa con láser, que permite una visión del espectro de los componentes químicos del gas de madera y con esta información se pueden sacar conclusiones para el desarrollo de catalizadores adecuados para la división del alquitrán. El nuevo catalizador se basa en un ácido sólido mesoporoso, con tamaño de poro de hasta 10 nm, lo que significa que las grandes moléculas de alquitrán pueden acceder a los centros catalíticamente activos sin obstáculos.

A través del dopaje dirigido, como por ejemplo con níquel, se puede influir en la intensidad y selectividad del catalizador. Dado que la estructura difiere significativamente de los catalizadores examinados hasta ahora, se pueden esperar ventajas significativas para la división de los compuestos complejos de alquitrán en el gas de madera.

² La tecnología de reformado se utiliza para la separación de hidrocarburos superiores (de cadenas largas)

Los alquitranes contenidos en el gas de madera pueden convertirse en gas combustible a 800 - 1000 °C, utilizando un reactor reformador catalítico. En este, las moléculas de alquitrán se convierten en gases con vapor de agua o dióxido de carbono, que pueden ser fácilmente quemados en el motor de gas. Para esto, el gas de madera fluye a través de varios catalizadores, donde las moléculas de alquitrán se descomponen con vapor de agua en moléculas más pequeñas y, por lo tanto, se convierten en gas útil. Dado que el contenido de energía del alquitrán permanece en el gas, hay un aumento en el calor específico del gas resultante.

1.4. Operación y mantenimiento.

Las responsabilidades más relevantes del operador de un sistema de cogeneración de gas de madera son: la preparación del combustible (preparación de la cantidad y suministro del combustible – astilla de madera, 20% humedad); eliminación de cenizas y residuos; mantenimiento de filtros (preparación del depósito de aceite y llenado); mantenimiento del motor a gas (plan de mantención de acuerdo con el fabricante y mantenimiento del motor a gas (cambio filtro aceite, etc).

También, el operador debe supervigilar y monitorear la operación automática del sistema de cogeneración de acuerdo con un protocolo definido. Realizar cambios de aceite de motor cada 500 – 800 horas de operación, dependiendo de la naturaleza del gas y de las recomendaciones del fabricante, y operar el motor con mezcla de combustible pobre, para así reducir las emisiones al ambiente (exceso de aire 1,3 hasta 1,5).

Equipar el motor con dos bujías por cilindro para asegurar la ignición del gas. Los motores de encendido por chispa (ciclo Otto), normalmente utilizados con gasolina o queroseno, pueden funcionar con gas pobre únicamente. Mientras que los motores diésel se pueden adaptar para funcionar con gas pobre disminuyendo el índice de compresión e instalando un sistema de encendido por chispa.

También, en motores diésel se puede mezclar el gas de madera con aire de admisión en un motor diésel, con lo que se reduce el consumo de combustible diésel en cerca de un 80-90%. Otra posibilidad es hacer funcionar un motor diesel normal, sin transformar, con un sistema dual, mediante el cual el motor proporciona del 0 al 90 por ciento de potencia, a base de gas pobre (17%), siendo necesario el resto de diesel para el encendido de la mezcla combustible gas/aire.

1.5. Sistema de recuperación de calor.

El sistema de gases de escape en el equipo de cogeneración juega un rol importante en la parte de producción de calor. En el ducto de gases de escape, se instala un intercambiador de calor enrollado al tubo, enfriando el gas de escape hasta cerca de 120 °C (en un intercambiador de calor limpio) a la salida del múltiple del motor. Los equipos se adecúan con compensadores para la expansión térmica y compensadores de reducción de ruido; silenciadores en el ducto de gases de escape y se considera un ducto para los gases de escape de un largo máximo de 10 metros, que transporta los gases al exterior, arriba del techo de la instalación.

Los motores a gas son muy ruidosos y el nivel de ruido debe reducirse a los valores permitidos mediante soluciones adecuadas de protección contra el ruido. Esto incluye instalación de carcasas, silenciadores de gases de escape, aisladores de vibraciones y atenuadores de ruido en caso de ser necesario. De igual forma, la radiación solar debe ser contenida por un aislamiento térmico adecuado.

1.6. Emisiones y residuos.

En Alemania, las emisiones de gases de combustión provenientes de sistemas de cogeneración que utilizan gas de madera no tienen una regulación técnica de emisiones de gases que las regule. De acuerdo la norma técnica TA-Luft 2002 (procedimientos técnicos sobre el control de calidad del aire) [5], se establecen los límites de las emisiones para los sistemas de cogeneración que utilizan biogás y gas residual. En este sentido, esta debiera ser la normativa a seguir. Las emisiones de CO pueden reducirse de manera confiable a valores de emisión requeridos instalando un convertidor catalítico de oxidación.

Las emisiones líquidas deben ser evitadas, para lo que se debe utilizar la tecnología apropiada de acuerdo con la composición del gas de madera. Importante es evitar los condensados, destilados de alquitrán o las aguas residuales para la limpieza del gas de madera.

Las emisiones sólidas, como la ceniza, se puede utilizar como fertilizante o deben eliminarse. Las cenizas finas en el filtro de aceite y el aceite residual del cambio de aceite del motor del equipo de cogeneración deben ser desechadas.

2. Fabricantes y proveedores de equipos.

La gasificación con motor de combustión de gas de biomasa es una tecnología madura, los proyectos son desarrollados a la medida según las características de la biomasa disponible, existen sistemas en diferentes rangos de potencia y los equipos se pueden modularizar para entregar una potencia mayor a sistema. El levantamiento de información incluye a fabricantes en Alemania y Austria, países que tienen un mayor desarrollo tecnológico a nivel europeo en comparación con el resto de la región.

2.1. Burkhardt.

La empresa alemana Burkhardt provee los modelos ECO 180 HG y ECO 165 HG que operan con un motor MAN de 6 cilindros [6], también se han asociado con la empresa KWEnergy que es fabricante del modelo smartblock 50T para adaptar el funcionamiento de este equipo con el gasificador de madera que ellos fabrican especialmente para este modelo. La información técnica disponible de estos equipos se presenta a continuación:

Tabla 3 Especificaciones generales del fabricante Burkhardt GmbH para sistemas de cogeneración.

Modelo	Motor	Output	Temperatura calefacción	Consumo electricidad
BHKW ECO 165/180 HG	MAN 6 cilindros	400 V / 50 Hz	105°C / 95°C/ 85°C	< 1% (8kW)
BHKW smartblock 50T (KWEnergy)	MAN 4 cilindros	400 V / 50 Hz	90°C/ 70°C	Bajo

Tabla 4 Sistemas de cogeneración del fabricante Burkhardt GmbH con gasificación de biomasa.

Modelo	Gasificador	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
BHKW ECO 165 kW con gasificador de madera	V 3.90	165 kWel	260 kWth	30%	47%	77%
	Pellet: 110 kg/h					
BHKW ECO 180 kW con gasificador de madera	V 3.90	180 kWel	270 kWth	30%	47%	77%
	Pellet: 110 kg/h					
BHKW smartblock 50 T (KWEnergy)	V4.50	50 kWel	110 kWth	25%	55%	80%
	Pellet: 40 kg/h					



Gasificador de madera
LxBxH: 5280 x 2470 x 4500 mm
(hasta la conexión de la antorcha)



BHKW ECO 180 HG
LxBxH: 3760 x 1730 x 2600 mm
(sin estructura de concreto)

Gasificador de madera V 4.50
LxBxH: 4400 x 1485 x 3325 mm
(sin antorcha)



BHKW smartblock 50 T
LxBxH: 2260 x 960 x 1780 mm

Ilustración 2: equipos de cogeneración, Burkhardt.

La imagen muestra una planta de cogeneración de gas de madera en Ueno Village, Japón (2015). El sistema es el primer gasificador comercial de pellets de madera que se utiliza en Japón. Tanto el calor como la electricidad se utilizan en la producción de hongos. Los pellets de madera provienen de recursos madereros locales [7].



Ilustración 3: Planta de cogeneración y gasificación en Ueno Village (Japón) [8].

2.2. Entrenco GmbH

La empresa alemana Entrenco fabrica sistemas de cogeneración en tamaños de 25 a 50 kWel eléctricos, con opciones de utilización de biomasa sólida tipo pellet o astillas de madera. En equipos que solo utilizan pellet fabrica los modelos de 25 kWel (Entrenco E3 Pellet) y 50 kWel (Entrenco E4 Pellet) [9], mientras que en aplicaciones con astillas de madera solo se fabrica el modelo de 50 kWel (Entrenco E5 Holzhackschnitzel).

Tabla 5 Especificaciones generales del fabricante Entrenco GmbH

Modelo	Output	Temperatura calefacción
Entrenco E3 Pellet		90°C
Entrenco E4 Pellet	200 V / 400 V a 50 Hz, 400V a 60 Hz	90°C y 5.000 L/h
Entrenco E5 Holzhackschnitzel	200 V / 400 V a 50 Hz, 400V a 60 Hz	90°C y 5.000 L/h

Tabla 6 Sistemas de cogeneración del fabricante Entrenco GmbH³

Modelo	Especificación	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
Entrenco E3 Pellet	Pellet: 20-23 kg/h DIN EN Plus 6 mm A1	25 kW	60 kW	25%	60%	85%
Entrenco E4 Pellet	Pellet: 44-46 kg/h DIN EN Plus 6 mm A1	50 kW	120 kW	25%	61%	88%
Entrenco E5 Holzhackschnitzel	Astilla Madera: 45 – 47 kg/h EN14961-1, P16-P45	50 kW	120 kW	24%	59%	83%

³ Las eficiencias dependen de la calidad de la biomasa.

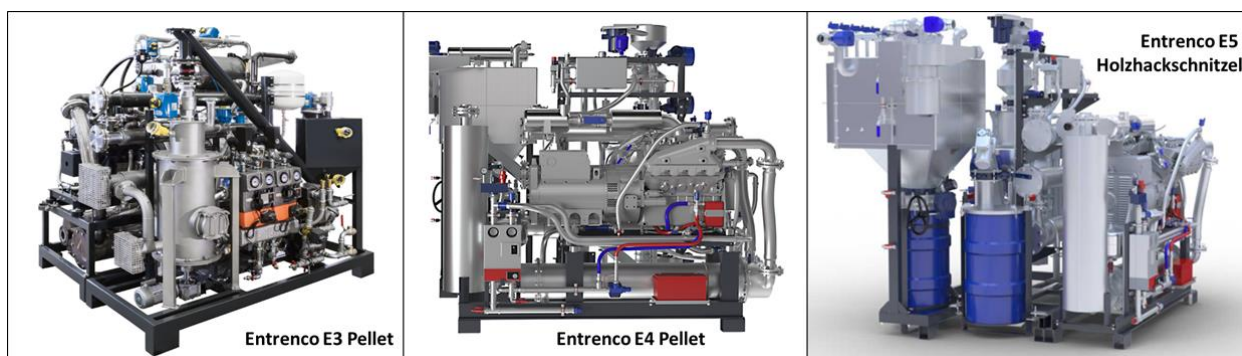


Ilustración 4: Equipos de Cogeneración Entrenco GmbH [9].

Los equipos se entregan instalados y se operan en contenedores de 20 pies (6 metros aprox.), para la puesta en servicio solo tienen que conectarse a los periféricos, lo que permite tener disponible el sistema en poco tiempo. Si se requiere una mayor potencia, las unidades de 50 kWel se pueden conectar en cascada, para entregar hasta 1 MWel o más. Los sistemas conectados en cascada son una puesta en servicio más rápida, una mayor confiabilidad gracias a la producción en serie y menos tiempo de inactividad en cuanto a los trabajos de mantenimiento.



Ilustración 5: Módulo contenerizado Entrenco GmbH [10].

2.3. Holzenergie Wegscheid GmbH.

La empresa alemana Holzenergie Wegscheid se especializa en sistemas de cogeneración con astillas y pellets. Provee equipos de cogeneración desde los 65 kWel hasta los 133 kWel [11]. El sistema 65 kWel y 130 kWth está diseñado para aplicaciones de demanda energética media, como por ejemplo: hoteles con instalaciones de spa y cervecerías. Está disponible para el uso de astillas de madera y pellets. El sistema 133 kWel y 250 kWth está diseñado para demandas

de energía mayores, como por ejemplo: aserraderos, fábricas de muebles y otras empresas que trabajan con madera.

La empresa ofrece dos modalidades para la instalación de los equipos. La primera consiste en la planificación, configuración, instalación y conexión de los equipos en función del espacio disponible. La segunda se utiliza cuando el espacio disponible no es el adecuado para la instalación del sistema, por lo que los equipos se instalan en dos contenedores: en el contenedor grande de 40 pies (12 m aprox.) se instala desde la tubería de bajada hasta el filtro de seguridad del gasificador, mientras que en un contenedor pequeño de 20 pies se instala el cogenerador como se muestra en la figura.

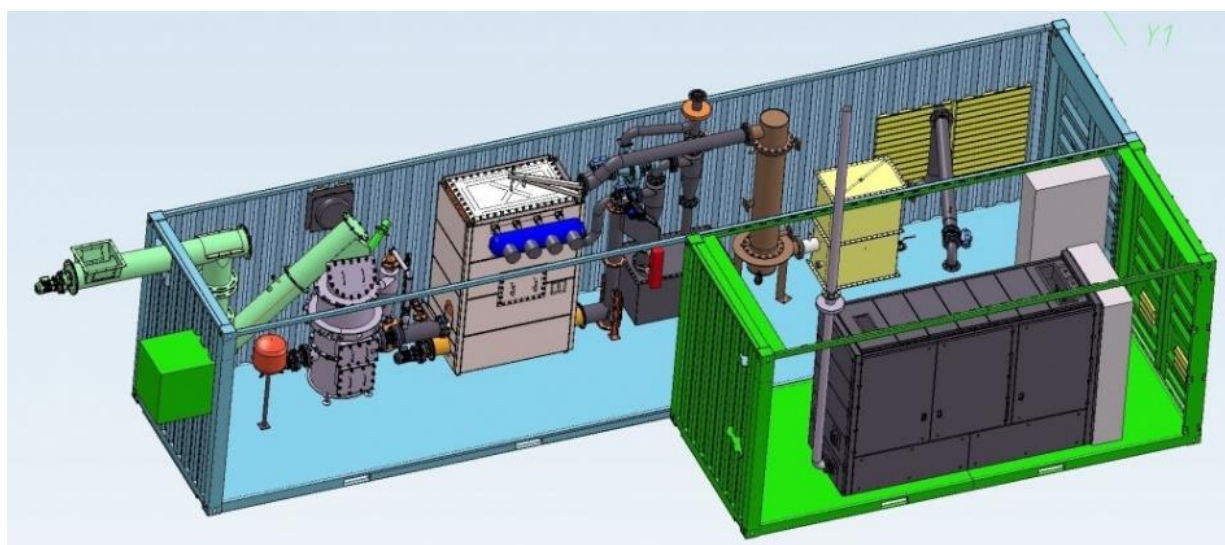


Ilustración 6: Configuración de contenedores - Holzenergie Wegscheid GmbH [12].

2.4. Spanner Re² GmbH

La empresa alemana Spanner Re² posee sistemas de gasificación de madera y cogeneración que van desde los 9 kWel hasta los 600 kWel. Los cuales se utilizan principalmente en los siguientes sectores:

- Forestales y agrícolas.
- Empresas de carpintería o aserraderos.
- Empresa de secado.
- Hoteles.
- Redes de calefacción locales.
- Empresas industriales.

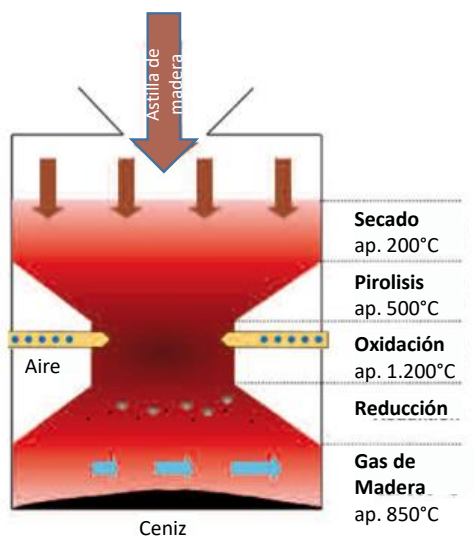
Las especificaciones de los equipos indicadas por el fabricante se presentan continuación:

Tabla 7 Especificaciones generales del fabricante Spanner Re2 GmbH

Modelo	Temperatura calefacción
HKA 10	85°C / 60°C
HKA 35, 45, 49,70, 600	85°C / 65°C

Tabla 8 Sistemas de cogeneración del fabricante Spanner Re2 GmbH⁴.

Modelo	Especificación Astilla Madera	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
HKA 10	Astilla madera: 0,9 kg/kWh el.	9 kWel	22 kWth			
HKA 35	Astilla madera: 0,9 kg/kWh el.	35 kWel	79,5 kWth			
HKA 45	Astilla madera: 0,9 kg/kWh el.	45 kWel	102,2 kWth			
HKA 49	Astilla madera: 0,9 kg/kWh el.	49 kWel	111,3 kWth			
HKA 70	Astilla madera: 0,8 kg/kWh el.	68 kWel	123 kWth			
HKA 600	Astilla madera: 0,8 kg/kWh el.	600 kWel	1.200 kWth			



Presentación esquemática del corazón del sistema de cogeneración: en el reformador se transforman las astillas en gas de madera

Ilustración 7: Principio de funcionamiento de equipos de cogeneración, Spanner Re2 GmbH.

⁴ El consumo de biomasa depende de la calidad de esta; especificación para la madera DIN ISO 17225-1; madera natural con contenido de humedad < 13%; máximo contenido materia fina (< 4mm) 30%. En el caso de Pellets hasta 30 mm.

Dado que los equipos de cogeneración tienen un diseño modular, se pueden combinar varias plantas en cascada hasta alcanzar 4 MW_{el}. Dependiendo de la demanda de calor de los consumos, los equipos pueden funcionar de forma conjunta o de manera independiente, lo que permite operar el sistema a carga parcial con un mayor grado de flexibilidad.



Ilustración 8: Instalación de Cogeneración en Cascada en Aserradero - Spanner Re2 GmbH [2].

2.5. Fröling GmbH.

Fröling GmbH es una empresa austriaca que comercializa un sistema de cogeneración de madera con gasificador de lecho fijo, con potencias de 46 a 56 kW eléctricos y una capacidad máxima de 115 kW de potencia térmica [13].

Tabla 9 Especificaciones generales del fabricante Fröling GmbH

Modelo	Especificación Astilla Madera	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
CHP	Sin información	46 - 56 kW	Max. 115 kW	Sin información	Sin información	> 86%

El gasificador de lecho fijo y el cogenerador se instalan en un contenedor listo para funcionar y conectarse a los sistemas existentes. Sus principales ventajas son:

- Construcción compacta del sistema de generación de energía de madera.
- Operación automática.
- Limpieza de gas seco - sin condensación.
- El motor de gas se enciende con el gas de madera disponible: no se requiere combustible secundario, ya que el motor no arranca con un generador.

- Sistema de contenedores permite planificar costos con precisión hasta la puesta en servicio de los equipos.



Ilustración 9: Gasificador de lecho fijo y cogenerador - Fröling GmbH [14].

2.6. Glock Ökoenergie GmbH.

Glock Ökoenergie GmbH es una empresa austriaca dedicada a la producción de equipamiento y equipos de cogeneración que utilizan madera o pellets de madera. Comercializa los equipos de cogeneración GGV 1.7 [15], diseñado para aplicaciones de media potencia (plantas de calor de biomasa, secado de grano, hoteles, edificaciones comunales), y el modelo GGV 2.7, diseñado para aplicaciones que requieren una mayor potencia (el cual abarca las mismas aplicaciones del modelo GGV 1.7 más aserraderos, empresas de fabricación de paneles de madera y de suministro de calor para energía distrital). Las plantas de cogeneración se pueden operar de manera independiente para suministrar a los consumos propios de la instalación o se pueden conectar en cascada para potencia eléctrica y térmica según los requerimientos de energía cada usuario.

Tabla 10 Especificaciones generales del fabricante Glock Ökoenergie GmbH.

Modelo	Output	Temperatura calefacción
GGV 1.7	400 V / 50 Hz	max. 90 °C
GGV 2.7	400 V / 50 Hz	max. 90 °C

Tabla 11 Sistemas de cogeneración del fabricante Glock Ökoenergie GmbH⁵.

Modelo	Especificación madera	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
GGV 1.7	Astilla madera: 19 kg/h Pellets: 20 kg/h	18 kW	44 kW			90%
GGV1.7 x 3		54 kW	132 kW			
GGV 1.7 x 10		180 kW	440 kW			
GGV 2.7	Astilla madera: 45 kg/h Pellets: 40 kg/h	50 kW	110 kW			
GGV2.7 x 3		165 kW	360 kW			
GGV 2.7 x 10		550 kW	1200 kW			



TÜV
AUSTRIA

Conformity assessment according to
Directive 2006/42/EC for GGV wood
gas combined heat and power plant

⁵ Clasificación Pellet de madera: EN ISO 17225-2, Klassifizierung ENplus-A1; Potencia eléctrica de acuerdo con norma EN ISO 17225-4 A1 P16S-P31S.

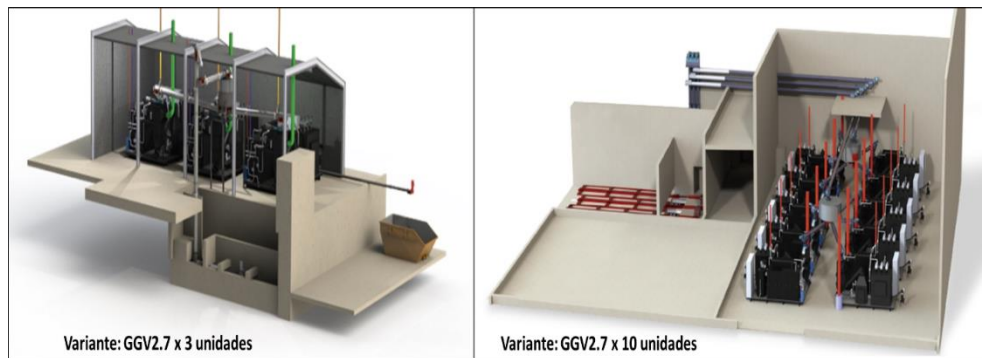


Ilustración 10: Equipos de cogeneración, Glock Ökoenergie GmbH.

2.7. Syncraft.

La empresa austriaca Syncraft provee equipos cuya potencia eléctrica va desde 200 hasta los 1000 kWel [4]. Estos operan con un gasificador de lecho fijo y un motor de gas para la producción conjunta de electricidad y calor, con una eficiencia aproximada del 30% eléctrica y 92% de eficiencia global.

Tabla 12 Sistemas de cogeneración del fabricante SYNCRAFT⁶.

Modelo	Especificación madera	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
CW700 – 200+	Madera: 140 kg/h Carbón: 1,98 m ³ /d	200	90°C: 326 50°C: 155	~30%		Max. 92%
CW1000 – 300	Madera: 208 kg/h Carbón: 2,9 m ³ /d	300	90°C: 488 50°C: 231	~30%		Max. 92%
CW1200 – 400	Madera: 267 kg/h Carbón: 3,7 m ³ /d	400	90°C: 615 50°C: 305	~30%		Max. 92%
CW1800 – 500	Madera: 342 kg/h Carbón: 4,7 m ³ /d	500	90°C: 770 50°C: 383	~30%		Max. 92%
CW1800x2 - 1000	Madera: 681 kg/h Carbón: 8-18 m ³ /d	1000	90°C: 1428 50°C: 450	~30%		Max. 92%

⁶Madera seca; carbón de madera.

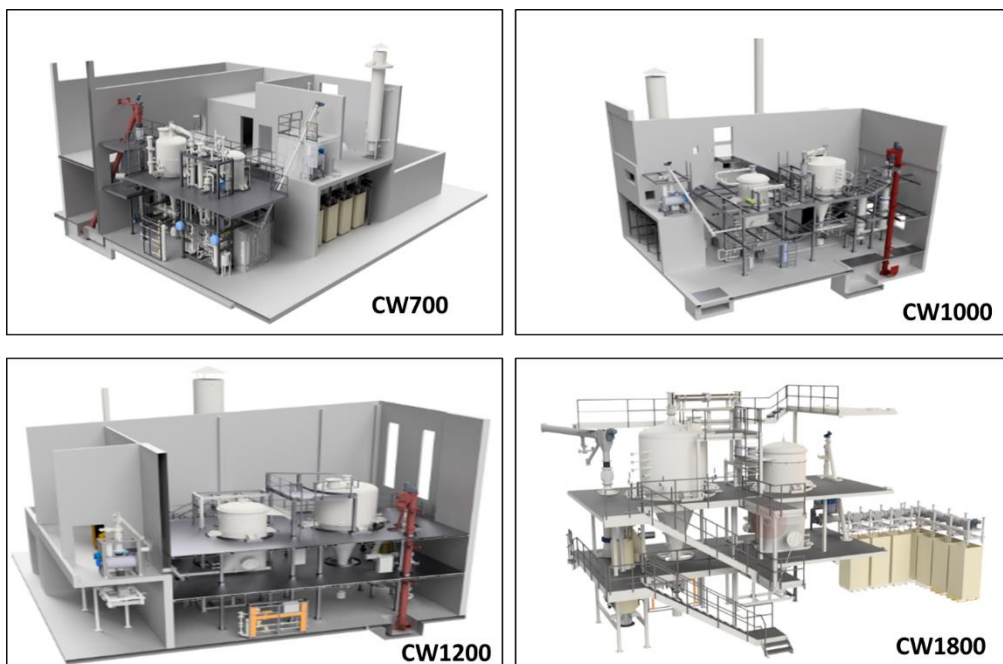


Ilustración 11: Equipos de cogeneración, Syncraft.

Opcionalmente, se puede integrar al sistema de cogeneración una bomba de calor para utilizar la energía térmica de baja temperatura resultante. Según el modelo del sistema de cogeneración, están disponibles hasta 140 kW a una temperatura del agua de 55 °C. Este nivel de temperatura y energía térmica disponible es ideal para secar la biomasa utilizada o para aumentar el flujo de retorno de una red de agua caliente del sistema.

En términos generales los sistemas de cogeneración y gasificación resumen las siguientes características técnicas.

- Hay disponibilidad comercial de equipos en el rango de potencia desde los 9 hasta los 1000 kWel. Sin embargo, los sistemas se pueden conectar en cascada para operar en rangos de potencia aún mayores según las necesidades de cada cliente.
- Especialmente hay que asegurar una calidad mínima según los requerimientos de cada fabricante. Los principales parámetros por considerar son: La humedad, el tamaño, el tipo de biomasa y la disponibilidad del combustible.
- Desde el punto de vista de la instalación se debe observar el espacio disponible para instalar los equipos de gasificación y cogeneración, pues requieren un mayor espacio en comparación con los motores y las microturbinas. También, se debe tener en cuenta el espacio disponible para el acopio de la biomasa con el fin asegurar el funcionamiento continuo del sistema.

- Los sistemas de cogeneración operan en baja temperatura, entregando calor entre 85°C y 105°C o a temperaturas más bajas (50°C) si se logra extraer el calor de condensación.
- En general los equipos se ofrecen contenerizados ya que se disminuye el riesgo tecnológico dado que los equipos pueden ser construidos en serie. También se pueden construir a la medida para ajustar su instalación a los requerimientos de espacio disponible.
- Generalmente, estos sistemas se operan en lugares donde la biomasa está disponible localmente como por ejemplo: Forestales, aserraderos, plantas de energía distrital, hoteles, agrícolas, empresas industriales y en aplicaciones que requieran secado de madera, agua caliente, calefacción y procesos que requieran temperaturas menores a los 90°C. También es importante que se piense en un modelo de negocio local dado que se puede acceder a un menor precio de la biomasa, lo que permite un menor periodo de amortización de la inversión y costos operacionales más bajos.
- En términos de rendimiento eléctrico los sistemas de gasificación y cogeneración varían entre 24% y 30%, y en algunos casos pueden alcanzar un rendimiento global por sobre el 90%, pero depende de la calidad de biomasa utilizada.

Tabla 13: Resumen equipos de Cogeneración y gasificación de biomasa.

Fabricante	Modelo	Potencia [kW]		Eficiencia [%]			Temperatura [°C]		Gasificador [mm]			Cogenerador [mm]		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global	Envío	Retorno	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto
Burkhardt GmbH	BHKW ECO 165 kW	165	260	30	47	77	105/95/85	70	5.280	2.470	3.000	3.760	1.730	2.600
	BHKW ECO 180 kW	180	270	30	47	77	105/95/85	70	5.280	2.470	3.000	3.760	1.730	2.600
	BHKW smartblock 50 T	50	110	25	55	80	90	70	4.400	1.485	3.325	2.260	960	1.780
Entrenco GmbH	Entrenco E3 Pellet	25	60	25	60	85	90	60						
	Entrenco E4 Pellet	50	120	25	61	88	90	60						
	Entrenco E5 Holzhackschnitzel	50	120	24	59	83	90	60						
Holzenenergie Wegscheid GmbH	65 kW	65	130				90							
	133 kW	133	250				90							
SpannerRe² GmbH	HKA 10	9	22				85	60				2.100*	1.400*	2.200*
	HKA 35	35	79,5				85	65	5.270	1.540	2.300	2.600	920	2.190
	HKA 45	45	102,2				85	65	5.270	1.540	2.300	2.600	920	2.190
	HKA 49	49	111,3				85	65	5.270	1.540	2.300	2.600	920	2.190
	HKA 70	68	123				85	65						
	HKA 600	600	1200											
Fröling Ges.m.b.H.	CHP 50	46 - 56	Max. 115	27		>86						8.000*	3.000*	3.000*
	GGV 1.7	18	44			90	90	60				5.290*	2.221*	2.620*
Glock Ökoenergie GmbH	GGV 1.7x 3	54	132				90							
	GGV1.7x10	180	440				90							
	GGV 2.7	54	110				90	60				5.290*	3.400*	2.620*
	GGV 2.7x3	165	360				90							
	GGV 2.7x10	550	1200				90							
SYNCRAFT	CW700 – 200+	200	90°C: 326 50°C: 155	30		Max. 92	90	70						
	CW1000 – 300	300	90°C: 488 50°C: 231	30		Max. 92	90	70						
	CW1200 – 400	400	90°C: 615 50°C: 305	30		Max. 92	90	70						
	CW1800 – 500	500	90°C: 770 50°C: 383	30		Max. 92	90	70						
	CW1800x2 – 1000	1000	90°C: 1428 50°C: 450	30		Max. 92	90	70						

(*) Incluye gasificador en las dimensiones especificadas.

3. Costos de inversión, operación y mantenimiento.

El estudio de costos de inversión, operación y mantenimiento de sistemas de cogeneración, publicado en abril de 2019, por Fraunhofer IFAM, Öko-Institut e.V., BHKW-Consult, Stiftung Umweltenergierecht y Prognos AG, examina en detalle el desarrollo de la industria de la cogeneración y establece escenarios hasta el año 2030, utilizados como referencias para determinar los costos de inversión, operación y mantenimiento, entre otras cosas.

El desglose de las principales partidas que distinguen sistemas de cogeneración (BHKW sigla en alemán para cogeneración con motores a gas⁸) para potencias eléctricas de 1, 5, 50, 100, 500 y 1.999 kW se presenta en la Tabla 14. Los sistemas representativos para el alcance de este estudio son los de las categorías BHKW1 (1 kWel), BHKW 2 (5 kWel), BHKW 3 (50 kWel), BHKW 3a (100 kWel) y BHKW 4 (500 kWel), que se diferencian por la potencia eléctrica de cada sistema de cogeneración. Las categorías BHKW 5 y BHKW 5a es para equipos de potencia 1.999 kW-el.

Tabla 14 Análisis económico de sistemas de cogeneración en Alemania (2019).

Equipo	Unidad	BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3	BHKW 3a	BHKW 4	BHKW5	BHKW 5a
Potencia Eléctrica	kWel	1	5	50	100	500	1.999	1.999
Voltaje de conexión		Bajo voltaje			Medio voltaje			
Inversión (incluye planificación)	Euro (2017)/ kWel	17.000	6.400	2.800	2.250	1.550	985	1.075
Eficiencia eléctrica		26%	27%	34%	35%	39%	42%	42%
Eficiencia térmica		66%	66%	57%	56%	51%	48%	42%
Eficiencia global		92%	92%	91%	91%	90%	90%	84%
Periodo de cálculo	Años	10	10	10	10	15	15	15
Costos operacionales fijos	Euro (2017) /kWel-a	450	210	105	70	35	14	18
Costos operacionales variables	Euro (2017) /MWh	100	60	30	26	17,5	12,5	13

Las economías de escala en la inversión, costos operacionales y costos variables son notablemente menores en la medida que aumenta la potencia eléctrica del sistema de cogeneración.

⁸ Referencia de equipos a gas natural, no incluye costo del gasificador.

La eficiencia eléctrica aumenta a medida que aumenta la potencia eléctrica del equipo, mientras que la eficiencia térmica disminuye con el aumento de la potencia eléctrica. La eficiencia global se mantiene en el rango 90 - 93% para los sistemas revisados.

3.1. Costo de inversión.

La inversión considera todas las compras y actividades hasta la puesta en marcha del sistema, esto considera los costos de planificación y los intereses durante el período de construcción. En el caso de los pequeños sistemas de cogeneración se considera que el equipo tiene incorporado un sistema de recuperación de calor en los gases de escape y desde 500 kW_{el} se incluye un generador de vapor de baja presión de 2 bares de sobrepresión en el intercambiador de calor de los gases de escape.

El costo de inversión incluye el costo del equipo de cogeneración (basado en información del año 2018 de 44 fabricantes y 577 equipos de cogeneración a gas natural), el transporte, montaje y puesta en marcha, al igual que las conexiones técnicas a la red de gas y eléctrica. En el caso de sistemas de cogeneración inferiores a 10 kW_{el}, raramente se utilizan servicios de empresas de ingeniería, por lo que los costos de planificación son del orden entre 250 hasta 1.000 Euros. Para un sistema de 50 kW_{el} esta partida se estima en 25.000 Euros y para uno de 100 kW_{el} en 40.000 Euros.

Desde el año 2019, con la modificación del marco regulatorio, los sistemas de cogeneración a motor de combustión deben considerar equipamiento adicional para el cumplimiento con la regulación de emisiones, por lo que se agrega al equipo un catalizador-SCR y un acumulador de urea. Adicionalmente, para equipos sobre 135 kW_{el} se especifica la certificación del equipo, que incluye una declaración de conformidad, de acuerdo con la ordenanza VDE-AR-N 4110 [16]

Los costos de inversión también incluyen la protección contra ruido, para dar cumplimiento con la normativa de ruido (TA Lärm) [17]. Esto incluye una cápsula de aislamiento acústico, dos silenciadores de escape, desacoplamiento del ruido transmitido por la estructura, así como silenciadores de aire de suministro y escape.

En términos constructivos, existen medidas especiales de construcción, como la existencia de una base de hormigón (desacoplada acústicamente) para el sistema de cogeneración, así como aberturas en la pared y perforaciones en losas o pilares estructurales. En sistemas más grandes, de hasta 2 MW_{el} se incluye una parte (un tercio) de los costos relacionados a la extensión del edificio para la sala de máquinas.

En los costos de transporte y montaje, se considera el llenado y puesta en marcha del equipo, además de los costos asociados al combustible requerido y para la realización de las conexiones (electrotécnico). Para sistemas mayores a 5 kW_{el} se considera un medidor ultrasónico para el calor, un medidor de gas y un medidor de electricidad. Además, se considera una alarma de humo y CO (monóxido de carbono). Para sistemas por sobre 500 kW_{el} también se tiene en cuenta la conexión de estos elementos al sistema central de alarma contra incendio, incluido el sistema de advertencia de gas.

Para evitar la operación intermitente se considera en los costos de inversión un acumulador de calor aislado y líneas de conexión, de capacidad de almacenamiento equivalente a 1 hora de operación del equipo.

Los costos de conexión para potencias hasta 100 kW_{el} alcanzan cifras cercanas a 40 – 60 % del costo del módulo de cogeneración y en potencias mayores entre 45 – 75 %.

La inversión⁹ para las distintas categorías de potencia eléctrica, tienen una dispersión razonable de ± 15 %.

En términos de costo de inversión, la cogeneración con gasificación de biomasa tiene un costo específico mayor que un cogenerador con gas natural, pues incluye el costo adicional del gasificador y el lugar para el almacenamiento de la biomasa. A modo de referencia se puede considerar que los costos específicos para módulo de cogeneración a gasificación están en torno a 6.600-3.100 EUR/kW_{el}¹⁰(ex works) en un rango de 9 a 70 kW_{el}.

⁹ No está considerado en la estimación del costo de inversión, sistemas de adsorción para la generación de frío.

¹⁰ En base a cotizaciones para un proveedor específico de equipos modulares de cogeneración a biomasa en Alemania.

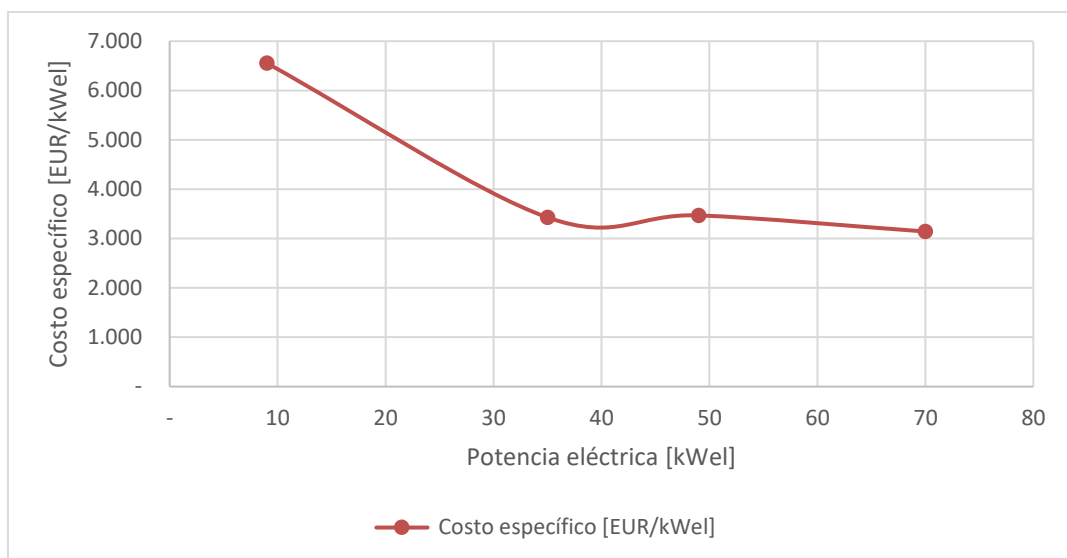


Ilustración 12: Costo específico (ex works) de módulo de cogeneración a biomasa.

3.2. Costos fijos de operación.

En esta partida de costos se contabilizan los costos de administración, seguros, costos de servicios de acuerdo con la ordenanza VDI Richtlinie 2067 Hoja 1 [18]. En la medida que lo exija la ley, se incluyen actividades como las mediciones recurrentes de protección de las emisiones, costos de limpieza de la chimenea e informes de expertos relacionados a estas actividades. Además, hay gastos administrativos adicionales como la preparación y presentación de informes de acuerdo con la Ordenanza de Transparencia Fiscal de Energía, el informe del recargo por la Ley de Energías Renovables (EEG), los informes anuales de acuerdo con la Ley de Cogeneración y el registro e informe de precios negativos de la electricidad.

Estos costos son independientes de la operación del sistema de cogeneración y por ello se estiman en euros por potencia al año.

3.3. Costos variables de operación.

En esta partida de costos se contabilizan los costos de inspección, mantenciones periódicas, tanto las reparaciones como la inspección básica, incluidos todos los materiales y consumibles, como por ejemplo el aceite lubricante. Los costos de mantenimiento se basan en una evaluación de 345 ofertas de servicios, que tienen como alcance los servicios indicados en la ordenanza VDI 4680 [19] de plantas de cogeneración – principios para el diseño de contratos de servicio.

En la estimación de los costos variables, se considera que el mantenimiento y reparaciones corresponden a contratos de servicios. Costos de personal de la empresa no se consideran en

los costos de mantenimiento y los costos por parte del operador de la planta para el control y operación están incluidos dentro de los costos fijos de operación. Los costos de reacondicionamiento mayor, después de 40.000 hasta 70.000 horas de operación, se tienen incluidos dentro de los costos variables de operación y se estiman en 30 – 35 % del costo del módulo de cogeneración. Por ejemplo, para un sistema de 2 MWel se considera un monto de 300.000 Euros neto y para un sistema de 500 kWel, 110.000 Euros.

En el caso de módulos compactos, los costos operacionales incluyen todos los elementos suministrados por el proveedor del sistema de cogeneración, lo que incluye los catalizadores. Costos adicionales para operar un convertidor catalítico SCR se consideran de acuerdo con la información facilitada por el fabricante, aunque se supone una compensación parcial del 50% de los costos operativos debido al aumento de la eficiencia eléctrica cuando se opera con menos exceso de aire.

Además, se considera aparte de los costos de mantenimiento y reparación, un costo de 1,5 % de los costos de conexión por año, como se indica en la ordenanza VDI 2067 en la Hoja 1.

En la realidad los costos variables para las plantas de cogeneración presentan un rango de variabilidad no despreciable, que depende del fabricante, del sistema de cogeneración y de la distancia entre la ubicación del prestador del servicio respecto la ubicación del sistema de cogeneración (tiempo y costo de desplazamiento).

3.4. Rangos de precios de los biocombustibles sólidos en Chile.

Los costos de los combustibles están determinados por disponibilidad del combustible en la ubicación de la instalación y por el volumen de consumo que tendrá la planta de cogeneración. Para proyectos industriales se presentan los siguientes costos de referencia [1]:

Biomasa	Precio por unidad de comercialización (industrial)	Precio por unidad de energía
Pellets	110-150 [CLP/kg]	23 a 31 [\$CLP/kWh]
Biomasa triturada	5.600 a 9.000 [CLP/m ³ st]	6,8 a 10,8 [\$CLP/kWh]
Astillas	7.000 a 12.000 [CLP/ m ³ st]	8,5 a 14 [\$CLP/kWh]

4. Conclusiones.

La calidad y disponibilidad de la biomasa es crítica para asegurar el funcionamiento y vida útil del cogenerador. Una biomasa de baja calidad, es decir, con alto contenido de humedad, tamaño irregular y alto contenido de corteza, favorece la generación de alquitranes que aumentan los requerimientos de mantención de los equipos y disminuye la vida útil del sistema, y también conlleva a un mayor consumo de madera debido al menor contenido energético del gas de madera. Por lo tanto, la infraestructura, la preparación, secado y tratamiento de la biomasa son fundamentales para asegurar la calidad y disponibilidad de esta.

La astilla de madera natural y no tratada químicamente, resulta ser el mejor combustible para el sistema de gasificación de gas de madera, ya que la rugosidad gruesa de la madera en forma de astilla asegura una gasificación óptima de esta. El contenido de humedad permitido es de 20%.

Los equipos de cogeneración con gasificación de madera son una tecnología madura basan su funcionamiento en la tecnología de motores alternativos de combustión interna para la combustión de gas de madera, la cual es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales, comerciales y en el sector público, en base a combustibles como el gas natural, gas licuado y biogás.

De la revisión de los proveedores de equipos en el mercado alemán y austriaco, se encontró que los equipos de gasificación de biomasa están comercialmente disponibles en módulos desde los 9 kW_{el} hasta los 500 kW_{el} de potencia eléctrica, pero si se requiere una potencia mayor, los proveedores de equipos y sistemas ofrecen sistemas conectados en cascada que se componen de 2 o más módulos y que pueden alcanzar 1 MW_{el} o más, según los requerimientos térmicos propios de cada instalación.

El rendimiento eléctrico de los equipos de cogeneración con gasificación de biomasa varía entre un 24% y un 30% (PCI), mientras que el rendimiento térmico entre un 47% y 61% (PCI), y algunos equipos, dependiendo de la calidad de la biomasa, pueden alcanzar hasta un 92% de rendimiento global (PCI). El rendimiento de estos sistemas tiene una fuerte dependencia de la calidad biomasa utilizada en cuanto al tipo de biomasa, el contenido de humedad y el tamaño de partícula, por lo cual son aspectos esenciales para considerar en el desarrollo de este tipo de proyectos.

Generalmente, los proyectos de cogeneración y gasificación se operan en lugares donde la biomasa está disponible localmente como por ejemplo: Forestales, aserraderos, plantas de

energía distrital, hoteles, agrícolas, empresas industriales y en aplicaciones que requieran secado de madera, agua caliente, calefacción y procesos que requieran temperaturas menores a los 90°C. También es importante pensar en un modelo de negocio local dado que se puede acceder a un menor precio de la biomasa, lo que permite un menor periodo de amortización de la inversión y costos operacionales más bajos.

En términos de costo de inversión, la cogeneración con gasificación de biomasa tiene un costo específico mayor que un cogenerador con gas natural, pues incluye el costo adicional del gasificador y el lugar para el almacenamiento de la biomasa. Sin embargo, desde el punto de vista operacional la biomasa es competitiva dado que el costo por unidad de energía es más bajo en comparación con otras fuentes energéticas. Como referencia se puede considerar que los costos específicos para módulo de cogeneración y gasificación tienen un orden de magnitud de 6.600-3.100 EUR/kW_{el} (ex works) en un rango de 9 a 70 kW_{el}.

Una de las desventajas es que el gasificador de biomasa, es específico o está optimizado para el tipo de biomasa para el que fue definido. La mejor biomasa del punto de vista energético es la astilla de madera en comparación con los pellets, ya que contiene una mayor parte gases volátiles que da origen al gas de madera.

La operación y mantenimiento es clave para asegurar el funcionamiento del cogenerador y por consiguiente, recuperar la inversión. Los sistemas que operan a biomasa tienen un costo menor en cuanto al combustible, pero exigen una mayor frecuencia de mantenciones en comparación con otras tecnologías (cada 500 a 800 h). Lo que aumenta el costo de mantenimiento del sistema frente a otras tecnologías de cogeneración.

En general, se requiere el control de las condiciones operacionales para facilitar la gasificación de la madera, la que tiene que ver con la pureza del gas (contenido de agua, oxígeno) y la estabilización del proceso de gasificación; esto evita la formación de alquitrán y la condensación de componentes de hidrocarburos que aumentan el desgaste y acortan la vida útil del motor a gas. La generación de alquitrán y su impacto negativo en el motor hacen del mantenimiento periódico una actividad esencial para mantener la vida útil del motor de combustión de biomasa y garantizar la rentabilidad del sistema.

Especialmente hay que asegurar una calidad mínima según los requerimientos de cada fabricante. Los principales parámetros por considerar son: La humedad, el tamaño, el tipo de biomasa y la disponibilidad del combustible.

Desde el punto de vista de la instalación se debe observar el espacio disponible para instalar los equipos de gasificación y cogeneración, pues requieren un mayor espacio en comparación con

los motores y las microturbinas. También, se debe tener en cuenta el espacio disponible para el acopio de la biomasa con el fin asegurar el funcionamiento continuo del sistema.

Los equipos se ofrecen contenerizados ya que se disminuye el riesgo tecnológico dado que los equipos pueden ser construidos en serie. También se pueden construir a la medida para ajustar su instalación a los requerimientos de espacio disponible.

5. Bibliografía.

- [1] GIZ, „Calderas y quemadores a biomasa para autoconsumo,“ Santiago, 2018.
- [2] Spanner Re2 GmbH, [Online]. Available: <https://www.holzkraft.com/images/produkte/kaskade/Kaskade%20Galerie/sawmill-wood-gasification.jpg>. [Zugriff am 3 12 2020].
- [3] GIZ, „Módulo de cogeneración y energías renovables,“ 2020.
- [4] Syncraft, [Online]. Available: <http://www.syncraft.at>.
- [5] „Regulación TA Luft,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/reduction_napcp/DE_Final_EN_w_cover.pdf.
- [6] burkhardt-gmbh, [Online]. Available: <http://www.burkhardt-gmbh.de>.
- [7] burkhardt, [Online]. Available: <https://burkhardt-gruppe.de/de/energietechnik/kwk-mit-holzpellets/>. [Zugriff am 3 12 2020].
- [8] Burkhardt, [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=MAiq_sKfKz4&feature=emb_logo. [Zugriff am 3 12 2020].
- [9] Entrenco, [Online]. Available: <http://www.entrenco.com>.
- [10] Entrenco, [Online]. Available: <https://www.entrenco.com/produkte.html>. [Zugriff am 3 12 2020].
- [11] Holzenergie-wegscheid. [Online]. Available: <http://www.holzenergie-wegscheid.de>.
- [12] Holzenergie Wegscheid GmbH, [Online]. Available: holzenergie-wegscheid.de/anlagen.html. [Zugriff am 3 12 2020].
- [13] Froeling, [Online]. Available: <http://www.froeling.com>.
- [14] Fröling, [Online]. Available: <https://www.froeling.com/at/produkte/waerme-und-strom/holzverstromungsanlage-chp-50.html>. [Zugriff am 3 12 2020].
- [15] Glock-oeko, [Online]. Available: <https://www.glock-oeko.com>.
- [16] „Ordenanza VDE-AR-N-4110: La ordenanza regula técnicamente la conexión eléctrica en medio voltaje,“ [Online]. Available: <https://www.vde.com/en/fnn/topics/technical-connection-rules/tcr-for-medium-voltage>.

- [17 „Ordenanza técnica de ruido,“ [Online]. Available:
] <https://www.juraforum.de/lexikon/geraeuschimmissionen#bundesimmissionsschutzgesetz-laerm>.
- [18 „VDI Richtlinie 2067,“ [Online]. Available:
] https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2768779.pdf.
- [19 „VDI 4680,“ [Online]. Available: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4680-blockheizkraftwerke-bhkw-grundsaeetze-fuer-die-gestaltung-von-servicevertraegen>.
- [20 UMAG, [Online]. Available: <http://www.umag.cl/vcm/wp-content/uploads/2017/03/7.pdf>.
] [Zugriff am 06 12 2020].