

Su contacto :

Mathieu LALANNE

Tel : 06 37 49 71 44

Mail : mathieu.lalanne@agrobiomasse.fr

Réf. : PR n°1910-0018

Estado del arte sobre las valorizaciones de la biomasa en energía



El proyecto ORHI (EFA142/16) está cofinanciado a altura del 65% a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), en el marco del

Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020).

Contacto cliente :

ESTIA - M. Iban LIZARRALDE i.lizarralde@estia.frESTIA - M. Aline DUPOUY a.dupouy@estia.fr**Agrobiomasse****18 cami de lacabanne – 64410 Lonçon**

Société par actions simplifiée unipersonnelle (SASU) - Capital de 5 000 €
SIRET: 844 607 457 00018 - NAF-APE: 7112B - RCS/RM: Pau - Num. TVA: FR23844607457

Tabla de materias

Definición de biomosas	7
Preámbulo sobre la biomasa.....	8
Energías renovables y biomosas	10
Las tecnologías maduras.....	12
Combustión (estufas y calderas).....	12
Combustión (producción combinada de calor y de electricidad).....	16
Biocarburantes – 1ª generación	20
La fermentación de etanol	22
Transesterificación en biodiesel	24
Hidrotratamiento (HVO)	28
Metanización	30
Principio	30
Desarrollo de la metanización en Francia	32
Funcionamiento	32
Metanización de vía líquida o de mezcla completa	33
Metanización de vía seca continua.....	34
Metanización de vía seca discontinua	34
Valorización del biogás producido.....	35
Cifras y referencias	38
CAPEX.....	38
OPEX.....	39
Ingresos	39
Constructores	39
Pequeña metanización en el departamento francés 64	40
Yacimiento de CO ₂ asociado a la metanización.....	43
Las tecnologías en desarrollo	44
Pre-tratamiento de la biomasa para facilitar la conversión en bioenergía o biocarburantes.....	45
Tratamientos físicos.....	45
Trituración	45
Torrefacción.....	45
Densificación energética	48
Pelletización.....	48
Tratamientos físico-químicos.....	49
Explosión de vapor	49
Utilización de líquidos iónicos (IL)	50
Proceso Plantrose (hidrólisis supercrítica)	50
Deslignificación abrupta de baja temperatura (LTSD).....	50
Cosolvente mejorado fraccionamiento lignocelulósico CELF	50
Agua caliente líquida (LHW)	50
Ozonólisis	51

Tratamientos químicos	51
Hidrólisis ácida.....	51
Hidrólisis alcalina	51
Proceso Organosolv	51
Tratamientos termoquímicos de la biomasa.....	52
Producción de bioaceites	53
Licuefacción hidrotermal.....	56
Pirólisis	58
Gasificación	63
Gasificación de biomasaas sólidas (o a menudo Pirogasificación)	63
Gasificación hidrotermal	74
Valorización du sintegás.....	77
Futuro del sector de la gasificación.....	81
Biocarburantes – 2ª generación	82
Yacimiento movilizable	83
Futuro del sector de los biocarburantes 2G en Francia	83
El etanol de origen lignocelulósico	85
El biodiésel de síntesis	89
Biocarburantes – 3ª generación	92
Almacenamiento de energía	95
Power 2 Gas o Metanación	96
Referencias	106

Tablas de Ilustraciones - Figuras

Figura 1: Constitución de una biomasa	8
Figura 2: Composiciones de biomásas (método Van Soest)	9
Figura 3: Diferentes vías de valorización de la biomasa para la producción de biocarburantes líquidos y gaseosos, fuente ETIP bioenergy	10
Figura 4: Esquema simplificado de los sectores potencialmente afectados por el Power 2 Gas	11
Figura 5: Ejemplo de caldera de leña automática	14
Figura 6: Caldera de pellets equipada de un depósito para alimentación automática	14
Figura 7: Caldera de virutas con un depósito contiguo	15
Figura 8: Dispositivo de preparación de pacas de paja para alimentar una caldera automática	15
Figura 9: Ejemplo del legendario automóvil gasógeno que circulaba por Europa	16
Figura 10: Cogenerador Jenbacher	17
Figura 11: Módulo ORC	17
Figura 12: Microsistema PCCE Wiesmann	18
Figura 13: Turbina de aire caliente	18
Figura 14: Principales líneas de cogeneración a partir de biomásas	19
Figura 11: Sectores franceses de biocarburantes de 1ª generación	20
Figura 16: Proceso de producción de etanol	22
Figura 17: Unidad de producción de bioetanol en la cuenca de Lacq (fuente: Lacq +)	23
Figura 18: Prensa de tornillo abierta	24
Figura 19: Filtro vertical (corte) de rejillas	24
Figura 20: Proceso de refinado de aceites vegetales	25
Figura 21: Industria extractora de aceite del grupo AVRIL en BASSENS (Trituración SAIPOLE + embotellamiento LESIEUR + esterificación SAIPOLE - EMHV)	26
Figura 22: Esquema de proceso simplificado para las dos etapas del hidrotratamiento	28
Figura 23: Ecuación de reacción del proceso de hidrotratamiento	29
Figura 24: Principio de la digestión anaeróbica	30
Figura 25: Esquema del principio de la metanización	30
Figura 26: Regímenes de digestión anaeróbica	31
Figura 27: Efectos de la digestión anaeróbica en el carbono (MO)	31
Figura 28: Efectos de la digestión anaeróbica en el ciclo del nitrógeno	31
Figura 29: Tipología de los proyectos de metanización – Fuente: SOLAGRO	32
Figura 30: Elección del proceso de metanización empleado – Fuente: APESA	33
Figura 31: Tipos de digestores empleados en mezcla completa	33
Figura 32: Esquema del principio de un digestor pistón	34
Figura 33: Esquema del principio de la vía seca discontinua en garajes - Fuente: Naskeo Méthajade	34
Figura 34: Valorizaciones posibles para el biogás proveniente de metanización	35
Figura 35: Principio de la depuración por membranas	36
Figura 36: Principio de la depuración por PSA	36
Figura 37: Principio de la depuración por lavado con agua	37
Figura 38: Principio de la depuración por lavado con aminas	37
Figura 39: Principio de la depuración criogénica	38
Figura 40: Solución en depósitos flexibles ARCBIOGAZ	40
Figura 41: Metanización en silo equipado de un revestimiento de estanques – VALOGREEN	41
Figura 42: Solución de tratamiento de purines BIOELECTRIC	41
Figura 43 : Vía seca discontinua en garajes – NASKEO METHAJADE (>100 kWe)	42
Figura 44: Vía seca discontinua con inmersión – SUD OUEST BIOGAZ	42
Figura 45: Metanizador vía seca continua modular talla S (30-150 kWe) - BIOGASTIGER	42
Figura 46: Integración del sector metanización en los nuevos sectores del gas verde 2G	43
Figura 47: Esquema de utilizaciones simplificado de la biomasa simplificada (Fuente: SOLAGRO)	44
Figura 48: Trituradoras automotoras	45
Figura 49: Esquema de principio del reactor TORSPYD de LMK Energy (antiguamente Thermya / AREVA)	46
Figura 50: 1ª unidad comercial en Francia (proceso THERMYA, finalizado con/por AREVA)	46
Figura 51: Proceso de torrefacción BIOGREEN (filial de ETIA GROUP)	47
Figura 52: Modelo 3D de la unidad propuesta por REVTECH	47

Figura 53: Evolución del mercado de los gránulos de madera	49
Figura 54: Implantaciones de unidades de pirólisis en el mundo (Fuente: IEA Bioenergy)	53
Figura 55: Principios de producción de bioaceites (Fuente: IEABioenergy)	54
Figura 56: Aceite de licuefacción hidrotermal, o biocrudo	56
Figura 57: Unidad de LICELLA - Somersby en Australie	57
Figura 58: Esquema de procesos ENSYN	59
Figura 59: Instalación de producción de Empyro [Pirólisis] en Hengelo (Países Bajos)	60
Figura 60: Presentación gráfica del posicionamiento de entrantes admisibles / valorización de proveedores del sector - Fuente REGATECH, Presentación de ENGIE (Olivier Guerrini)	65
Figura 61: Reparto de las unidades de gasificación (al margen de la cogeneración) - fuente: https://demoplants.bioenergy2020.eu/	66
Figura 62: Instalación XYLOWATT	68
Figura 63: Proceso puesto en aplicación por el proyecto GAYA (ENGIE)	69
Figura 64: Ilustración de las tablas precedentes con la curva de tendencia	73
Figura 65: Esquema de principio (Fuente: SCW Systems)	74
Figura 66: Pilotos de gasificación termal en Europa (Fuente: Estudio GRT)	76
Figura 67: Tecnologías de conversión del sintegás	77
Figura 68: Principio propuesto por WINDDIESEL (Proyecto GOBIGAS – Suecia)	78
Figura 69: Principio contemplado en el proyecto WOOD-HY en las Landas (CCLA - ENGIE)	79
Figura 70 : Proceso WOODROLL desarrollado por CORTUS Energy con el Instituto de Tecnología de Karlsruhe	80
Figura 71: Desarrollo provisional de la producción de gas de síntesis o sintegás	81
Figura 72: Esquema de principio de la producción de biocarburantes de 2ª generación	82
Figura 73: Esquema de principio de la producción de etanol 2G	85
Figura 74: Esquema de principio del proceso experimental PROCETHOL	86
Figura 75: Proyecto de fermentación de biomásas identificadas por el centro de competencias alemán BEST	86
Figura 76: Balance energético anunciado por CLARIANT	88
Figura 77: Implantación de una unidad CLARIANT Sunliquid	88
Figura 78: Principio del hidrotratamiento	89
Figura 79: Unidades de hidrotratamiento en el mundo	90
Figura 80: Principio retenido para el proyecto piloto BioTfuel	91
Figura 81: Raceway (abierto) y reactores (cerrado) pilotos de producción de algas	92
Figura 82: Estación Ifremer de Palavas-les-Flots – Suministro COLDEP (69)	92
Figura 83: Proyecto Vasco 2 (valorización del CO ₂ , emitido por las empresas industriales del sitio de Fos-sur-Mer por cultura de microalgas marinas)	93
Figura 84: Ilustración de ficocianina de espirulina	94
Figura 85: Comparación de las tecnologías de almacenamiento de electricidad (Specht et al. 2009)	95
Figura 86: Ejemplos de sectores afectados en diversas etapas por el Power 2 gas	95
Figura 87: Esquema de principio de la metanación acoplado a un electrolizador	96
Figura 88: Ejemplo de unidad de metanación acoplada a un electrolizador de 6MW (AUDI)	96
Figura 89: Curvas de concentración en CH ₄ , CO ₂ y O ₂ en el metanador AUDI	97
Figura 90: Tecnologías disponibles para la metanación de CO - Fuente: Camel MAKHLOUFI - CRIGEN	98
Figura 91: Ejemplo de reactores en curso de desarrollo - Fuente: Camel MAKHLOUFI – CRIGEN	98
Figura 92: Ejemplo de unidad de metanación biológica (Electroarchae)	99
Figura 93: Proyectos de metanación biológica en Europa	100
Figura 94: Ejemplo de inserción de un reactor biológico intermitente en un metanizador – Fuente: LEAF	100
Figura 95: Ejemplo 2 de inserción de un reactor biológico intermitente en un metanizador – Fuente: LEAF	101
Figura 96: Técnicas de electrólisis - Fuente REGATECH - G05_Camel_Makhloufi	102
Figura 97: Proveedores de soluciones de electrólisis	103
Figura 98: Sankey diagram of the PtG process Efficiency	105
Figura 99: Coste de aprovisionamiento del Power 2 Gas (extraído del estudio 100% gaz vert)	105

Tabla de ilustraciones - Tablas

Tabla 1: Comparación de productos madereros, bruto y densificado, con un Biocoal densificado	48
Tabla 2: Rendimientos de productos (a base de madera seca) por diferentes modos de pirólisis de la madera	58

Tabla 3: Resumen de las tecnologías de pirólisis (Fuente IEAbioenergy)	61
Tabla 4: Ejemplos de unidades de pirólisis (fuente: ETIP)	62
Tabla 5: Principales reacciones aparecidas durante la gasificación	64
Tabla 6: Número y grados de desarrollo de los procesos de gasificación, por tecnología	65
Tabla 7: Lista de las unidades de gasificación (al margen de la cogeneración) – Fuente : https://demoplants.bioenergy2020.eu/	66
Tabla 8: Lista de los proyectos de gasificación de los que se disponen algunos datos cifrados – Fuente : SOLAGRO	72
Tabla 9: Umbrales límites de impurezas contenidas en el sintegás	77
Tabla 10: Lista de proyectos en montaje o en funcionamiento (Fuente: IFPEN)	83
Tabla 11: Lista de los principales proyectos pilotos censados en Francia en 2014 (Fuente: IFPEN)	87
Tabla 12: Escenarios de producción de algas presentados en el estudio 100% gas verde	94
Tabla 13: Reacciones de metanación con el CO y el CO ₂	97
Tabla 14: Cantidad de CO ₂ disponible para el Power-to-gas a escala nacional	104

Definición de biomasas

Definición del Larousse :

“Cantidad total de materia viva presente en un momento dado en un biotopo bien definido. (Concebida así, la biomasa de un bosque comprende tanto los árboles, sus aves y sus insectos así como el sotobosque o la fauna microscópica del suelo; el clímax de un lugar es la biocenosis teniendo la mayor biomasa posible).

“Cantidad viva, considerada en términos energéticos, que podemos obtener por combustión o fermentación (gas de maleza, gas de estiércol o fuego de leña).

- Masse totale de l'ensemble des êtres vivants occupant, à un moment donné, un biotope bien défini. (Ainsi conçue, la biomasse d'une forêt comprend aussi bien les arbres, leurs oiseaux et leurs insectes que le sous-bois ou la faune microscopique du sol ; le climax d'un lieu est en général la biocénose ayant la plus forte biomasse possible.)
- Masse vivante, considérée du point de vue de l'énergie que l'on peut en obtenir par combustion ou fermentation (gaz de broussaille, gaz de fumier, feu de bois).

El término de biomasa comprende las materias orgánicas animales, vegetales y humanas pero también los residuos orgánicos generados por las actividades (efluentes de ganadería y avicultura, residuos domésticos, lodos de depuradora,...).

Así pues, son considerados como biomasa, en el estudio que sigue, los campos siguientes :

- Agrícolas :
 - o Efluentes de ganadería y avicultura,
 - o Residuos de cultivos,
 - o Cultivos energéticos,
 - o Residuos de la industria agroalimentaria (IAA).
- Madera y Bosques :
 - o Madera para energía,
 - o Relacionado con la madera aserrada y la industria.
- Desechos :
 - o Residuos domésticos.

Recordemos también que, desde un punto de vista semántico, un biocarburante, como el biogás, proviene de la biomasa.



Preámbulo sobre la biomasa

Primero de todo, parece útil observar la constitución de una biomasa.

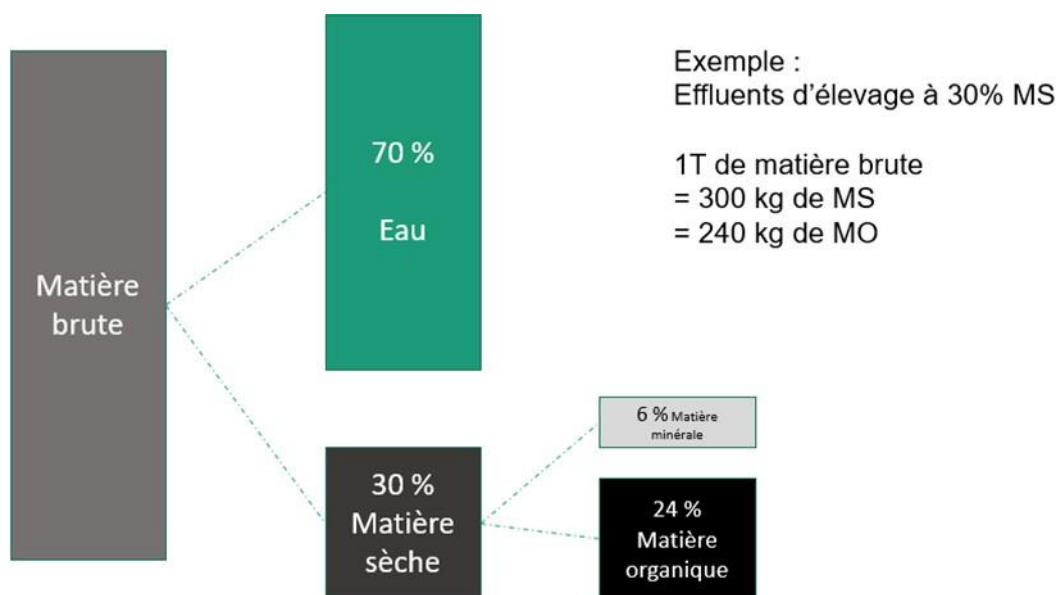


Figura 1: Constitución de una biomasa

La materia está constituida principalmente de agua, de materias orgánicas y de materias minerales. Estas dos últimas constituyen la materia seca.

La materia orgánica está constituida esencialmente de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Azote.

Los minerales están presentes normalmente en proporciones bastante inferiores. Los más presentes y conocidos son: el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Llegan después el calcio, el magnesio, el azufre, el sodio,...

Las materias orgánicas están constituidas por 3 tipos de macromoléculas :

- La celulosa, cuya unidad de base es la glucosa ($C_6H_{10}O_5$), está estructurada en microfibras rodeadas por una matriz de hemicelulosa y de lignina. Los grupos $-CH_2OH$ y $-OH$ forman puentes de hidrógeno que permiten así al polímero estructurarse (como un cristal) : las fibras de celulosa son mecánicamente muy resistentes e insolubles en la mayoría de solventes clásicos ni en el agua. Puede formar también puentes de hidrógeno con el agua, sin por ello ser soluble, es muy higroscópica.
- La hemicelulosa está constituida de monómeros de cortas cadenas de pentosas y de hexosas, juntadas de manera heterogénea. No hay enlaces químicos con la celulosa sino enlaces de hidrógeno y enlaces electrostáticos débiles de tipo van der Waals.
- La lignina que garantiza la rigidez de las materias. Es una mezcla de polímero de estructura fenilpropano que se unen por enlaces de éter.



Biomasse lignocellulosique	Nombre de valeurs*	Cellulose (kg·100 kg ⁻¹ MS)	Hémicelluloses (kg·100 kg ⁻¹ MS)	Lignine (kg·100 kg ⁻¹ MS)
Bagasse de canne à sucre (<i>Saccharum officinarum</i> L.) (1)	10	40,1 ± 6,7	26,3 ± 6,3	17,9 ± 6,8
Fétuque (<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.) (2)	5	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2
Maïs fibre (<i>Zea mays</i> L.) (3)	6	38,0 ± 3,8	27,4 ± 1,2	7,3 ± 1,6
Miscanthus (<i>Miscanthus</i> sp.) (4)	4	44,0 ± 4,8	25,4 ± 2,2	20,4 ± 4,8
Paille d'avoine (<i>Avena sativa</i> L.) (5)	5	35,5 ± 4,6	24,3 ± 6,5	13,7 ± 4,0
Paille de blé (<i>Triticum aestivum</i> L.) (6)	27	36,6 ± 5,7	29,8 ± 7,7	16,9 ± 4,7
Paille de maïs grain (<i>Zea mays</i> L.) (7)	12	37,3 ± 5,1	25,4 ± 4,3	15,8 ± 3,6
Paille d'orge (<i>Hordeum vulgare</i> L.) (8)	17	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6
Paille de riz (<i>Oryza sativa</i> L.) (9)	32	35,3 ± 4,5	26,7 ± 4,9	9,8 ± 5,5
Paille de seigle (<i>Secale cereale</i> L.) (10)	3	37,0 ± 3,0	28,9 ± 1,0	12,7 ± 9,6
Panic érigé (<i>Panicum virgatum</i> L.) (11)	36	38,3 ± 3,8	31,2 ± 2,9	8,4 ± 3,9
Ray-grass italien (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) (12)	4	23,1 ± 4,8	18,7 ± 6,3	4,3 ± 2,4
Sorgho fibre (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) (13)	7	42,3 ± 2,6	26,2 ± 0,6	8,0 ± 0,4
Sorgho fourrager (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) (14)	18	28,3 ± 4,6	22,8 ± 3,6	8,7 ± 3,9
Chanvre (<i>Cannabis sativa</i> L.) (15)	15	60,3 ± 6,2	16,8 ± 3,9	6,8 ± 3,4
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.) (16)	6	53,2 ± 4,1	18,4 ± 1,4	7,9 ± 1,2
Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i> L.) (17)	3	45,4 ± 1,9	27,9 ± 6,8	23,1 ± 1,3
Peuplier (<i>Populus</i> sp.) (18)	4	42,0 ± 2,9	22,0 ± 6,2	24,8 ± 3,8
Saule (<i>Salix</i> sp.) (19)	2	46,5 ± 13,5	18,5 ± 6,4	20,0 ± 1,4
Douglas (<i>Pseudotsuga</i> sp.) (20)	3	48,8 ± 7,6	21,1 ± 11,4	25,9 ± 2,2
Épicea (<i>Picea</i> sp.) (21)	4	44,3 ± 4,2	26,1 ± 3,7	28,4 ± 0,7

Figura 2: Composiciones de biomosas¹ (método Van Soest)

NB : la composición depende del sustrato Y de su madurez..

Como veremos más adelante, resulta difícil disponer de una tecnología adaptada al conjunto de estos constituyentes. De hecho, los procesos se adaptan normalmente a una matriz (+/- rica en celulosa por ejemplo) ; aunque es posible cambiar de matriz, en la medida en que esta disponga de una composición comparable, un proceso adaptado a todas las matrices no existe hasta el día de hoy.

¹ Fuente : <http://www.pressessagro.be/base/text/v14ns2/549.pdf>

Energías renovables y biomasa

En el marco del presente trabajo, nos hemos interesado, pues, por las energías provenientes de la biomasa, especialmente por los productos agrícolas y forestales. Como evocado más arriba, la valorización de biomasa en energías es generalmente fuente de 4 tipos de «productos finales» :

- El calor,
- La electricidad,
- El biogás,
- Los biocarburantes.

Un análisis (no exhaustivo) ha sido realizado para apreciar las diferentes vías innovadoras de valorización de estas biomasa. Se ha hecho hincapié en los sectores en vías de desarrollo, especialmente en lo que se refiere a las vías bioquímicas y termoquímicas que permiten la producción de biogás / sintegás o bien de biocarburantes de segunda generación.



Figura 3: Diferentes vías de valorización de la biomasa para la producción de biocarburantes líquidos y gaseosos, fuente ETIP bioenergy

Un capítulo se refiere a las tecnologías de Power 2 Gas ya que esta tecnología de conversión necesita carbono (a fortiori no fósil).

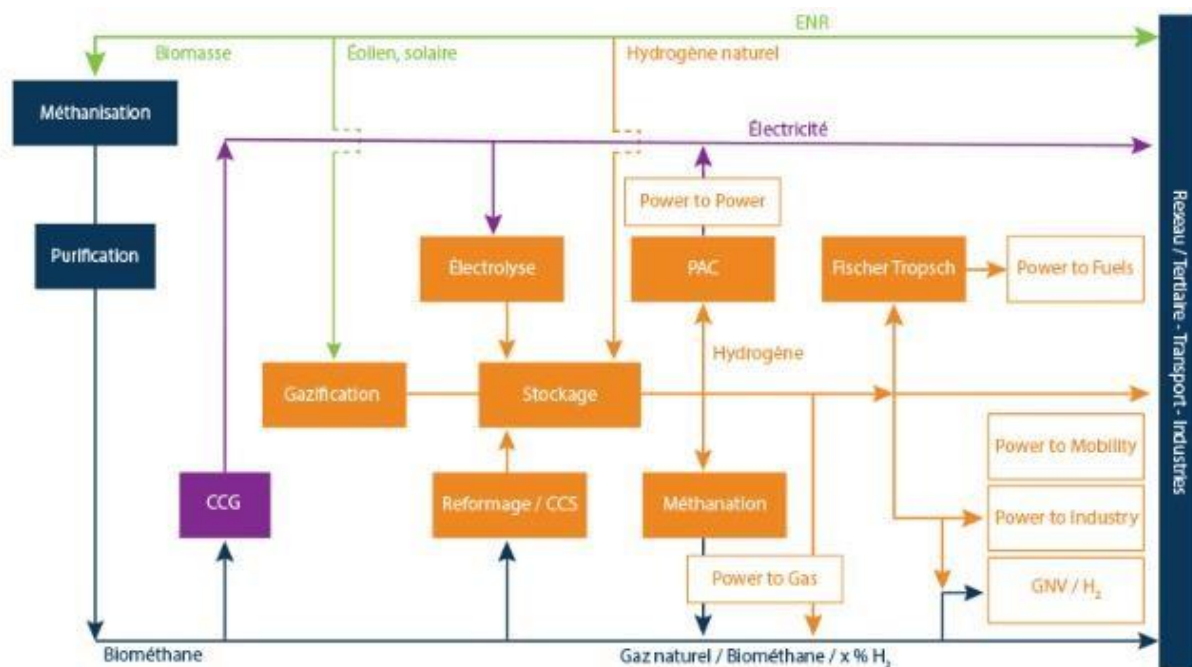


Figura 4: Esquema simplificado de los sectores potencialmente afectados por el Power 2 Gas

Por último, hemos estudiado a petición de ESTIA una solución alternativa de valorización de desechos de la IAA(ensilado de residuos de maíz). Esta consiste en producir larvas de moscas con el fin de extraer el aceite destinado a sectores aún por desarrollar, así como una matriz sólida empleada en la alimentación animal.

Las tecnologías maduras

Combustión (estufas y calderas)

Los radiadores de espacio transmiten el calor únicamente alrededor. Normalmente se hace por radiación térmica y en parte por convección. Suelen utilizarse como calefacción adicional o auxiliar.

La biomasa ya ha sido utilizada en el pasado con fines de cocción y de calefacción. En los países en desarrollo, la cocción y la calefacción se hacen todavía con hogares abiertos. Las emisiones emitidas ponen en peligro a las personas y al medioambiente. Los radiadores avanzados de biomasa tienen unas cámaras de combustión cerradas y transportan los gases de escape hacia el exterior. Actualmente, la biomasa puede ser quemada de manera eficaz y con emisiones débiles, utilizando sistemas de combustión avanzados.

Tipos de aparatos de calefacción

Existen numerosos y diferentes criterios para distinguir los aparatos de calefacción.

- Chimenea abierta – El aire de combustión es tirado directamente de la habitación y la calidad de la combustión es mala. Normalmente, la función de calefacción es menos importante que la vista de las llamas de la hoguera.
- Chimenea cerrada - Las chimeneas abiertas pueden cerrarse posteriormente para mejorar la calidad de la combustión. La mayor parte del calor se emite por radiación térmica.
- Calefacción adicional con leña - Estas estufas suelen tener una ventana de observación y una buena calidad de combustión. El calor se emite por radiación y convección.
- Estufa acumuladora – Estas estufas poseen una masa de almacenamiento elevada para acumular el calor de la combustión. Tienen una gran cantidad de calor radiante. Suele escogerse un principio de combustión superior.
- Cocina de biomasa residencial – Se utiliza tanto para la calefacción como para la cocina. Diferentes principios de combustión son posibles. Pueden ser concebidas también como calderas.
- Caldera de calefacción - Estas unidades están conectadas hidráulicamente a los sistemas de difusión y disponen de intercambiador térmico. Las calderas de calefacción suministran también agua caliente sanitaria.

Criterios de diferenciación

A continuación, las diferencias entre los radiadores autónomos se explican de manera más detallada.

- Combustible – En los radiadores de biomasa se suele usar madera y pellets. Las virutas de madera solamente se usan para unidades más importantes.
- Transferencia térmica - Si el caloportador es el aire se trata de una estufa y si es el agua, se trata de una caldera. Las dos pueden concebirse como unidades de calefacción, pero las estufas son más frecuentes.
- Masa de almacenamiento – Se trata de la capacidad de almacenamiento estructural del radiador por chamota o esteatita, etc. Indica la cantidad de calor que la estufa puede almacenar. La masa de almacenamiento del radiador puede ser débil, media o elevada. Una masa de almacenamiento elevada se conoce con el nombre de estufa acumuladora.
- Tecnología de alimentación - El radiador puede alimentarse manualmente o automáticamente. Los troncos suelen añadirse manualmente mientras que los pellets

suelen añadirse automáticamente. Existen diferentes maneras de desplazar los pellets en la cámara de combustión.

- Duración de funcionamiento - La duración de funcionamiento no significa las longitudes de la producción de calor, sino la duración del encendido y de la misma recarga. Por consiguiente, los radiadores con leña y las cocinas de biomasa residenciales acostumbran tener una vida útil larga mientras que una estufa de cerámica tiene una vida útil más corta. Una estufa de cerámica tarda prácticamente una hora en encenderse y la producción de calor dura hasta 12 horas.
- Transferencia de calor - La transferencia de calor puede producirse por radiación o por convección.
- Cámara de combustión - La cámara de combustión puede ser de metal o de cerámica. También existen cámaras de combustión de cerámica con una restricción para la alimentación de aire secundario. Para las cámaras de combustión de metal, existen versiones con y sin placa de protección.
- Condiciones de tiro - El tiro puede ser natural o garantizado por un ventilador de tiro.
- Principios de combustión - Existen cuatro tipos diferentes : combustión de corriente ascendente con rejilla, combustión de corriente ascendente sin rejilla, horno vertical de corriente descendente y horno lateral de corriente descendente.

Estufas

Una estufa es un radiador con una cámara de combustión completamente cerrada, con una puerta cortafuegos, que está cerrada normalmente. El calor está vehiculado por radiación y / o convección. Una estufa es de metal o de cerámica ignífuga. Es una unidad dentro de la cual se produce calor por la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o por la corriente eléctrica. El calor se usa para calentar o cocinar. El rendimiento típico de una estufa de calefacción está entre 5 y 10 kW. Son sistemas de tiro plano y necesitan de 1 a 3 kg de carburante por recarga. En razón de la débil cantidad de combustible, los intervalos de recarga son cortos.

Una estufa de pellets de alimentación automática se compone de un depósito de combustible, de un sistema de alimentación, de un motor, de un encendido eléctrico y de un ventilador de tiro.

Pueden añadirse sistemas de control, como una alimentación de aire controlada o un regulador de temperatura, etc. para mejorar por ejemplo su eficacia.

Las virutas de madera no se utilizan para las estufas. Convienen mejor a las grandes instalaciones, como las calderas.

Calderas

Una caldera es la parte generadora de calor de un sistema de calefacción central y puede ser concebida de maneras diferentes. Las calderas de calefacción central deben equiparse de un intercambiador de calor a agua y estar conectadas a un circuito de agua y de calefacción. Esto garantiza un transporte de calor controlado hacia las superficies de calefacción de las respectivas estancias.

Una caldera de leña alimentada manualmente se compone de una cámara de combustión con una alimentación de aire primario y secundario, un lecho de fuego y una zona de gasificación. Hay también una cámara de combustión secundaria y un intercambiador de calor para un mayor rendimiento. Los gases de escape pueden escaparse por la conexión de gases de escape. Un ventilador de tiro y

unos dispositivos para generar turbulencias son también frecuentes. Con el objetivo de almacenar el calor generado y así utilizarlo más eficazmente, se recomienda un acumulador.

Hoy en día, casi exclusivamente, el principio de la combustión de corriente descendente se usa para las calderas de calefacción central alimentadas manualmente. El rendimiento típico de una caldera se sitúa entre 20 y 50 kW. Las calderas de calefacción central de leña son sistemas de calefacción auxiliar y necesitan alrededor de 30 a 50 kg de leña para el encendido. Existen modelos con alimentación y eliminación de cenizas automáticos.



Figura 5: Ejemplo de caldera de leña automática

Las calderas de pellets de alimentación automática tienen una estructura similar, pero incluyen también un sistema de alimentación. Los pellets se desplazan del almacenamiento hacia la cámara de combustión por un transportador de rosca o un sistema neumático. Existen tres tipos frecuentes de sistemas de alimentación en la cámara de combustión: sub-alimentación, inserción transversal y conducto.



Figura 6: Caldera de pellets equipada de un depósito para alimentación automática

Otra posibilidad es una caldera calentada con virutas de madera. Se usan con diferentes gamas de potencias. El límite inferior es de alrededor 10 kW pero pueden alcanzar potencias de 60 MW. Como la caldera de pellets, el combustible es transportado automáticamente a la cámara de combustión.



Figura 7: Caldera de virutas con un depósito contiguo

Por último, siguiendo este mismo principio, existen sistemas adaptados a los productos agrícolas. Así, numerosas calderas de grano (cereales) fueron instaladas en los años 2010, pero también numerosas calderas de paja.

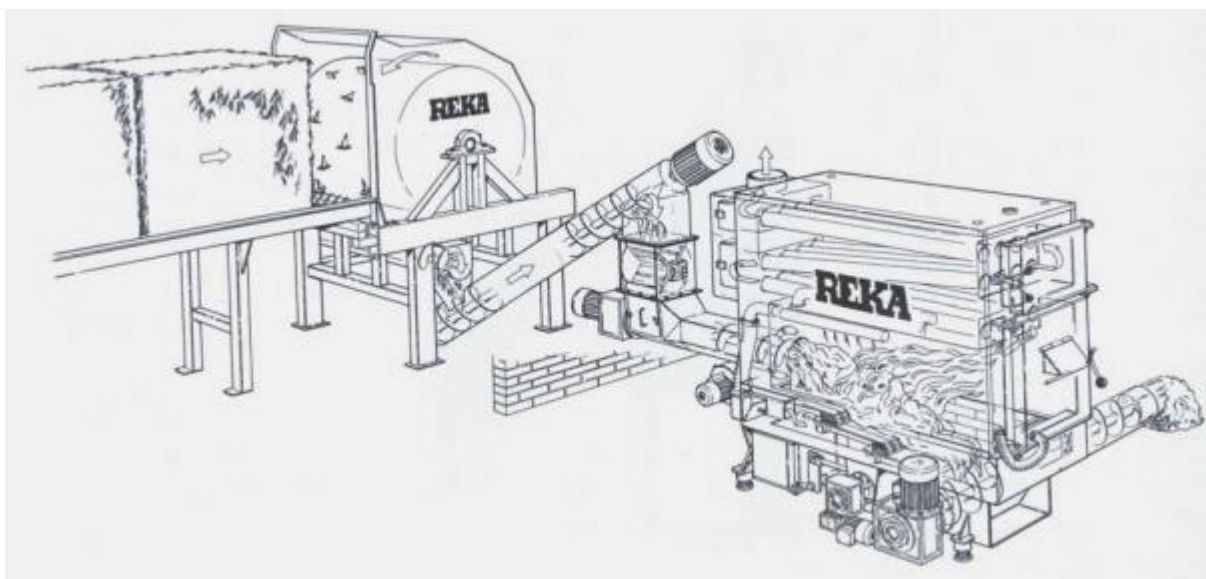


Figura 8: Dispositivo de preparación de pacas de paja para alimentar una caldera automática

Combustión (producción combinada de calor y de electricidad)

La producción simultánea de electricidad y de calor se llama cogeneración o calor y electricidad combinados (Combined Heat & Power - CHP). Al contrario de las centrales térmicas, la cogeneración usa el calor perdido que se emite durante producción de electricidad y aumenta así la eficacia del proceso hasta más del 80%.

Construcción de una fábrica de cogeneración

Se requieren los componentes siguientes para la conversión de la energía combustible almacenada químicamente en energía eléctrica y en calor utilizables :

- Tratamiento del carburante (filtro del combustible, limpieza del combustible...),
- Motor de conversión de energía almacenada químicamente en energía cinética y en calor (motor de combustión, turbina de gas, máquina de vapor, motor stirling,...),
- Generador para convertir la energía cinética en energía eléctrica y en calor,
- Sistemas de intercambiadores de calor para recuperar la energía calorífica (pérdidas de calor del motor, circulación de aceite, gas de escape...),
- Diversos aparatos eléctricos y dispositivos de mando para la distribución de la corriente y la gestión de los motores,
- Equipamiento hidráulico para la distribución de calor.

Tecnologías de conversión

Existen diversos procesos de producción de electricidad y de calor a partir de la biomasa. Los ejemplos incluyen la gasificación de la biomasa (gasificación de lecho fijo o de lecho fluidizado), la combustión de la biomasa y la utilización del biogás proveniente de la digestión anaeróbica.

Aquí abajo se menciona un extracto de estas tecnologías.

- Motor de combustión - Esta tecnología es puntera. El motor de combustión puede funcionar con biogás o gas de síntesis (sintegás) proveniente de un (piro)- gasificador.



Figura 9: Ejemplo del legendario automóvil gasógeno que circulaba en Europa



Figura 10: Cogenerador Jenbacher

- Ciclo Orgánico de Rankine - Actualmente, se usa principalmente para las unidades de más de 400 kW_e, aunque existen experiencias con potencias inferiores.



Figura 11: Módulo ORC

- Turbina de vapor - Esta tecnología es también puntera. Se utiliza para potencias superiores a 1MW_e.



- Motor Stirling - Esta tecnología puede utilizar biomasa sólida para el proceso. Los motores Stirling convienen a potencias pequeñas, inferiores a 35 kW_e.



Figura 12: Microsistema PCCE Wiesmann

- Turbinas de aire caliente - La producción de electricidad se efectúa por un ciclo llamado «Brayton» de combustión externa. El aire ambiente está comprimido, calentado a varios centenares de °C en el intercambiador por los gases de combustión calientes de la caldera y después fluye y se expande en la turbina, que a su vez acciona un generador.

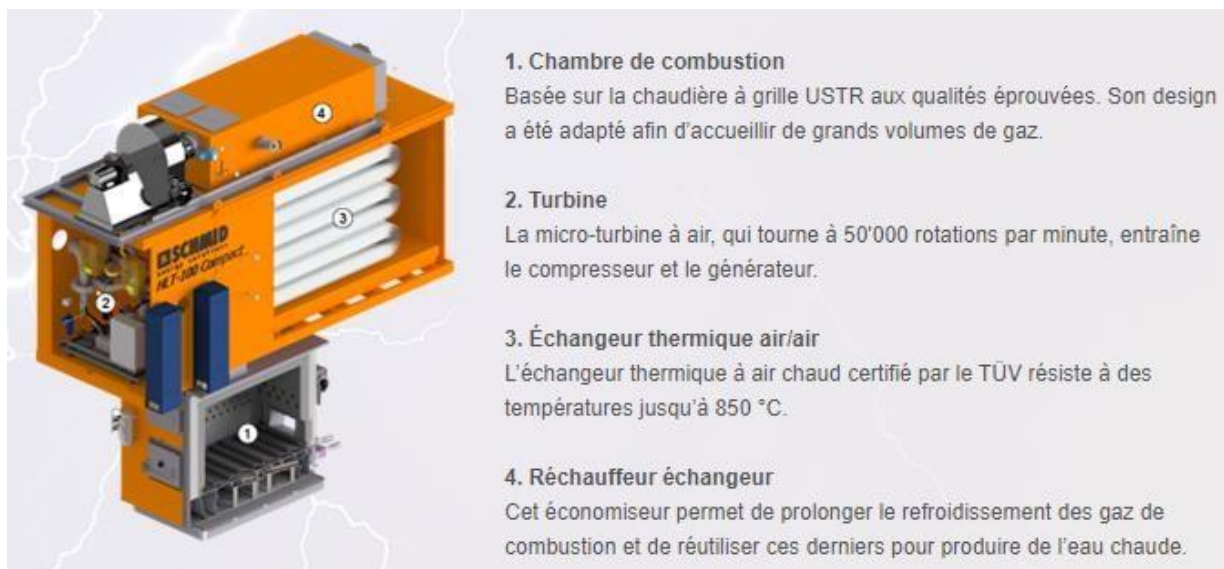


Figura 13: Turbina de aire caliente

Es posible usar la biomasa sólida en los procedimientos siguientes : motor alternativo, máquina de vapor de rosca, generador termoeléctrico², etc. Estos parece que están todavía en fase de demostración.

La turbina de gas invertida y la micro-turbina de gas pueden funcionar con biogás. Puede también funcionar con gas de síntesis, pero sigue siendo objeto de investigaciones. Teóricamente, una pila de combustible puede funcionar también con biogás purificado, pero con las tecnologías actuales no es viable económicamente.

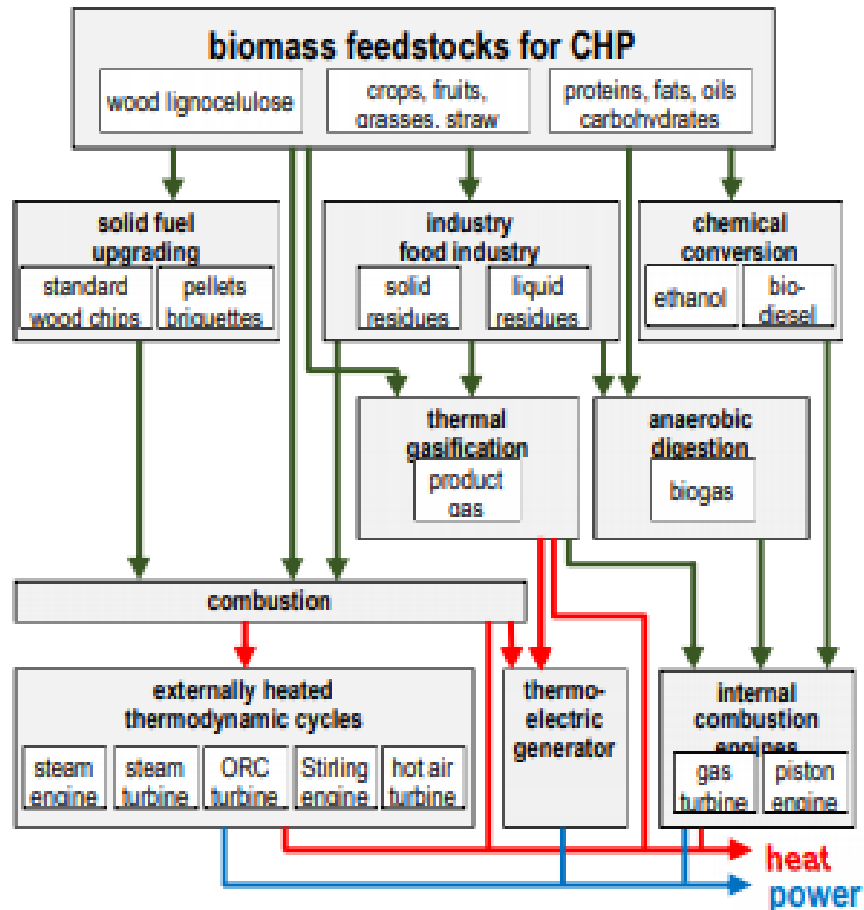


Figura 14: Principales líneas de cogeneración a partir de biomasa

² La UPPA (Universidad de Pau et des Pays de l'Adour) trabaja en esta temática ya que hemos consultado las publicaciones de Daniel CHAMPIER : Maître de conférences - Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique(SIAME) Université Pau et Pays de l'Adour (UPPA), Pau, France.

Biocarburantes – 1ª generación

En materia de biocarburantes, hubo grandes sectores que se estructuraron en los años 2000-2010. Francia eligió desarrollar los sectores del etanol, obtenido por vía bioquímica (fermentación alcohólica), y del éter metílico de aceite vegetal (EMHV, comúnmente llamado Diester® en Francia), obtenido por extracción mecánica y transformación química.

Los cultivos para estos biocarburantes son principalmente :

- El maíz, el trigo, la remolacha, la patata y la caña de azúcar (DOM-TOM) para la producción de etil ter-butil éter de etanol, después de ETBE³ o,
- El girasol, la soja, la palma de importación y la colza para la producción de éster metílico de ácido graso (EMAG⁴). Estos ésteres se pueden obtener a partir de aceites vegetales (EMHV), de grasas animales (EMHA) o incluso de aceites usados (EMHU). Es posible también producir EEHV (el etanol reemplaza entonces al metanol para la producción d'Éster Etilico).

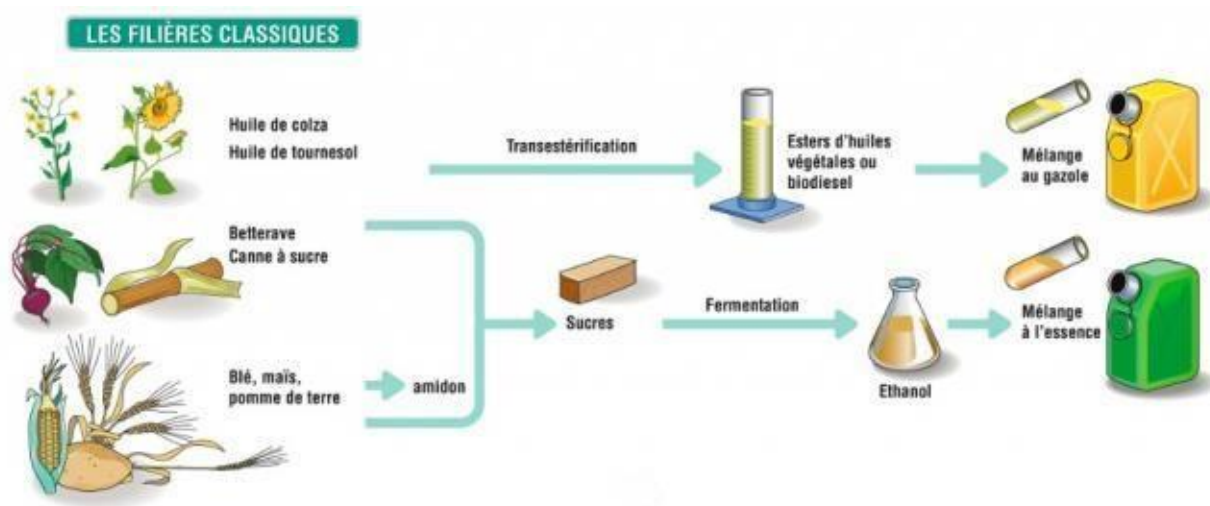


Figura 15: Sectores franceses de biocarburantes de 1ª generación

En la región de Nueva Aquitania, las principales unidades de producción son:

- BIOENERGIE DU SUD OUEST en Mont (64), que produce 250 000 t/año de ETBE,
- SAIPOL en Bassens (33) que tritura oleaginosas (el girasol y la colza) y esterifica una parte de su producción (250 000 t/año de Diester®),

³ El ETBE se produce a partir de etanol y de isobutileno (actualmente de origen químico). El ETBE constituye la vía privilegiada de incorporación de etanol en la gasolina ya que supone menores dificultades técnicas que el etanol a la hora de ser incorporado. El ETBE es un compuesto de origen parcialmente renovable, a diferencia del bioetanol que es 100% de origen renovable. En el recuento de las cantidades de biocarburantes incorporados en los carburantes, solamente la parte energética de origen renovable (37% para el ETBE) se tiene en cuenta.

⁴ El EMAG (y entonces el EMHV, HMHA y EMHU) se obtiene por mezcla del metanol.

- COC en Chalandray (86) que tritura oleaginosas (colza) y esterifica su producción (120 000 t/año de Diester®).

Son casi 620 000 toneladas de biocarburantes de 1ª generación que se producen en el territorio de la Nueva Aquitania cada año. Esto representa casi 6,9 TWh/año de energía final o incluso cerca de 0,6Mtep.

Estos biocarburantes de primera generación se introducen en mezclas en los carburantes vendidos en las gasolineras. Así, hoy en día, cada automovilista consume, a su pesar, cerca de un 7-8% de biocarburante, conforme a la directiva europea 2018/2001 del 11 de diciembre del 2018.

Con el contexto de crisis actual, especialmente del sector del petróleo, estos sectores se están poniendo a prueba. De hecho, el umbral de rentabilidad de estos sectores se sitúa más bien a 40\$ por barril.

La fermentación de etanol

El etanol (C_2H_5OH) es un alcohol ligero y es un líquido volátil, incoloro e inflamable con un olor característico. Se le conoce también con el nombre de alcohol etílico. El modo de producción más frecuente es la fermentación del azúcar o del almidón de los cultivos agrícolas, por levaduras o bacterias.

SCHEMATIC DIAGRAM OF PRODUCTION PROCESS OF BIOETHANOL AND DDGS FROM GRAINS AND SUGAR SYRUPS

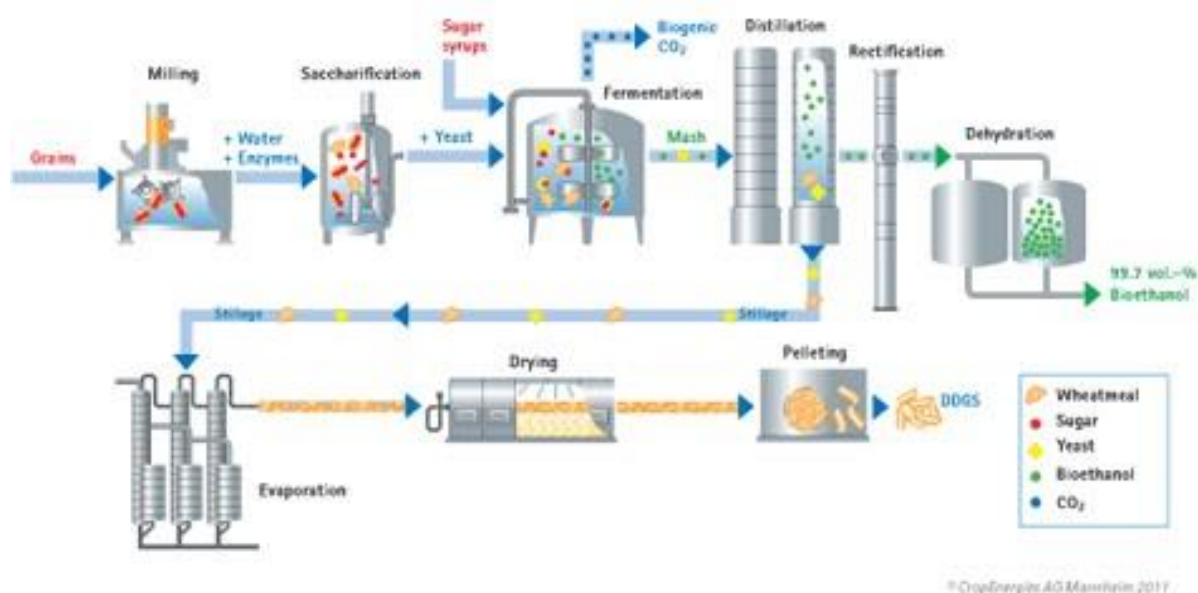


Figura 16: Proceso de producción de etanol

El etanol puede utilizarse ya sea en mezcla elevada (E85) en vehículos de combustible flexible, ya sea en mezcla débil en la mayoría de vehículos actuales sin modificaciones. Normalmente el porcentaje de mezcla es hasta un 10%.

PROCESO DE PRODUCCIÓN⁵

Materia prima

La materia prima para la producción de etanol puede ser cualquier materia que contiene cantidades apreciables de azúcar o de sustancias que pueden ser convertidas en azúcar. La producción convencional utiliza azúcar (de caña de azúcar y de la remolacha), del almidón (el maíz,

⁵ Fuentes : *Le potentiel et les défis des biocarburants à usage unique*, IEA Bioenergy Task 39, 2014

el trigo o la patata) u otros polisacáridos. El proceso de producción de etanol de 2ª generación, también llamado alcohol celulósico, utiliza una materia prima celulósica (por ejemplo a partir de residuos agrícola) que necesita un pre-tratamiento suplementario.

Conversión metabólica

En un proceso de fermentación, el azúcar (glucosa, fructosa u otros monosacáridos) se convierte en etanol por unos microbios (principalmente variedades de levadura *Saccharomyces cerevisiae*), que son inoculados a la materia prima. Los monosacáridos provienen ya sea directamente de disacáridos, que se descomponen a través de unos enzimas invertasas, ya sea de almidón hidrolizado con enzimas amilasas. Además del etanol, del agua y del dióxido de carbono que son también distribuidos.



Los procesos frecuentes producen un caldo de fermentación con una concentración del 5% al 10% de etanol por volumen, ya que el etanol por sí mismo es tóxico para los micro-organismos. Unas instalaciones más avanzadas son capaces de aumentar la concentración hasta el 20% gracias a la utilización de levaduras adaptadas y especializadas.

Puesta a nivel

La valorización incluye la recuperación y la concentración de etanol del caldo de fermentación. Por consiguiente, se aplican las siguientes etapas tecnológicas:

- Evaporación del etanol: en esta etapa, se efectúa la primera evaporación del etanol con el fin de obtener el etanol "bruto" con una concentración de alrededor del 45% por volumen,
- Rectificación: en la etapa de rectificación, la concentración de etanol se aumenta al 96% por volumen,
- Deshidratación: por deshidratación, el agua azeotrópica restante se elimina con el fin de obtener una concentración requerida del 98,7% por masa y un contenido de agua inferior al 0,3% por masa.



Figura 17: Unidad de producción de bioetanol en la cuenca de Lacq (fuente: Lacq +)

Transesterificación en biodiesel

Los aceites vegetales y animales, compuestos al 100% de carbono o casi, deben antes de nada ser extraídos de los materiales que los contienen. Es la etapa de la trituración / prensado. Normalmente se realiza con una prensa de tornillo en la que se suceden los elementos (montaje) que permiten que avance la materia que luego es prensada en unas semicarcasas, constituidas por barras apretadas, cuya malla de los intersticios está fijada por la pureza buscada del aceite.



Figura 18: Prensa de tornillo abierta

La materia sólida obtenida es tratada y se vuelve a prensar para extraer los últimos litros de aceite, lo que favorecerá su estabilidad en el almacenamiento. El aceite bruto producido se filtra con la ayuda de los elementos en suspensión (cáscaras). Esta operación se realiza con un filtro vertical.



Figura 19: Filtro vertical (corte) de rejillas

Normalmente el aceite obtenido de esta manera se refina. Esta etapa, realizada con ayuda de un proceso químico y térmico complejos no se detallará aquí. Luego, podrá incorporarse en los sectores de valorización industriales (aceite refinado, Diester).

La esterificación viene precedida forzosamente por una etapa de refinado. Existe una variante en producción biológica (con el fin de evitar el uso de productos químicos) pero esta técnica trata volúmenes ínfimos.

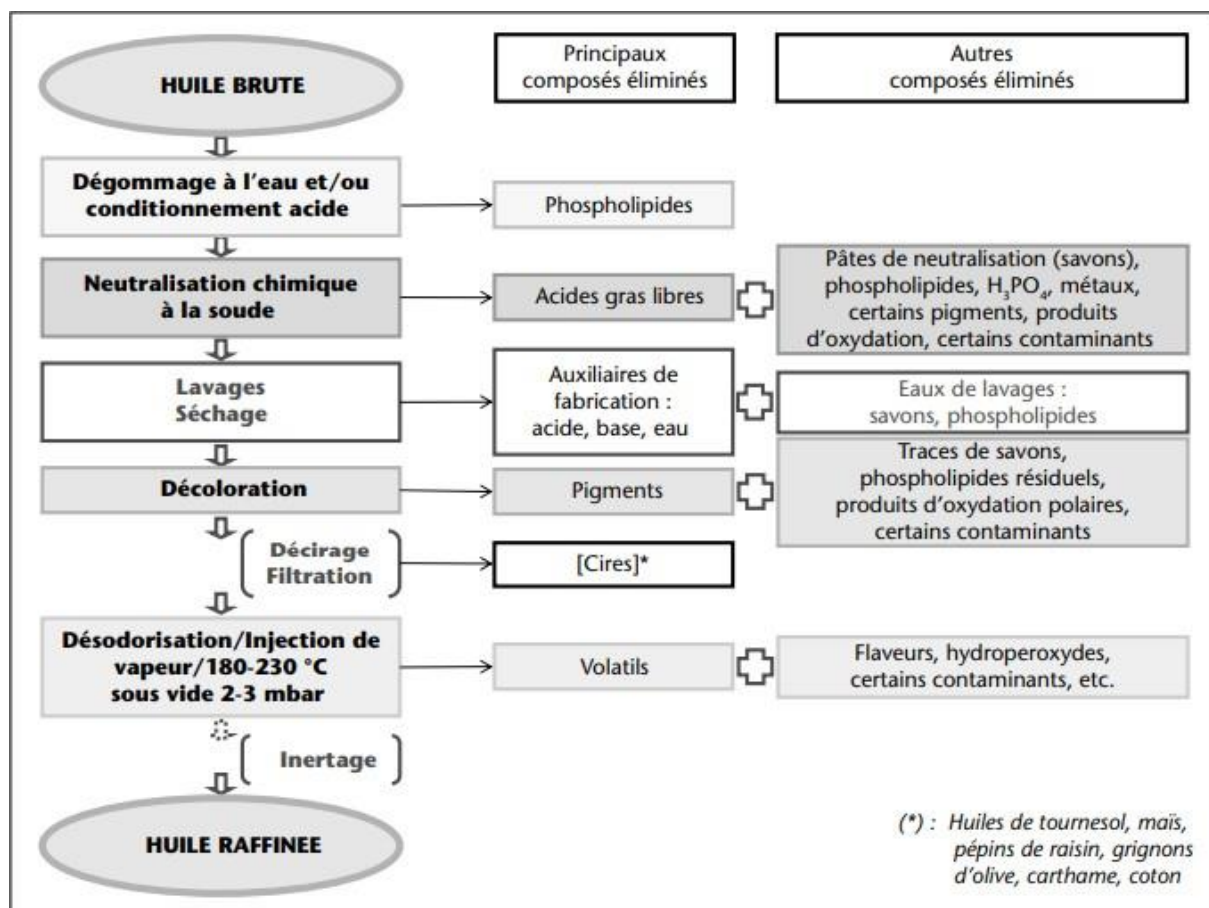


Figura 20: Proceso de refinado de los aceites vegetales

La transesterificación de los aceites vegetales, de las grasas animales o de los aceites de cocina usados es el proceso detrás del biodiesel convencional. En el proceso de transesterificación, un glicérido reacciona con un alcohol (típicamente metanol o etanol) en presencia de un catalizador que forman ésteres de alquilo de ácido graso y de un alcohol.

PROCESO DE PRODUCCIÓN⁶

Materia prima

⁶ Fuentes : Rapport - Technologie de production de biodiesel, US ENERGY NREL - Laboratorio nacional de energías renovables, julio 2004 (NREL / SR-510-36244).

La materia prima para la transesterificación puede ser todo ácido graso de origen vegetal o animal, o los aceites de cocina usados. Los aceites vegetales utilizados normalmente provienen de la colza, del girasol, de la soja y de la palma de aceite.

Según el origen de los aceites y de las grasas, es necesario un pre-tratamiento antes del tratamiento.

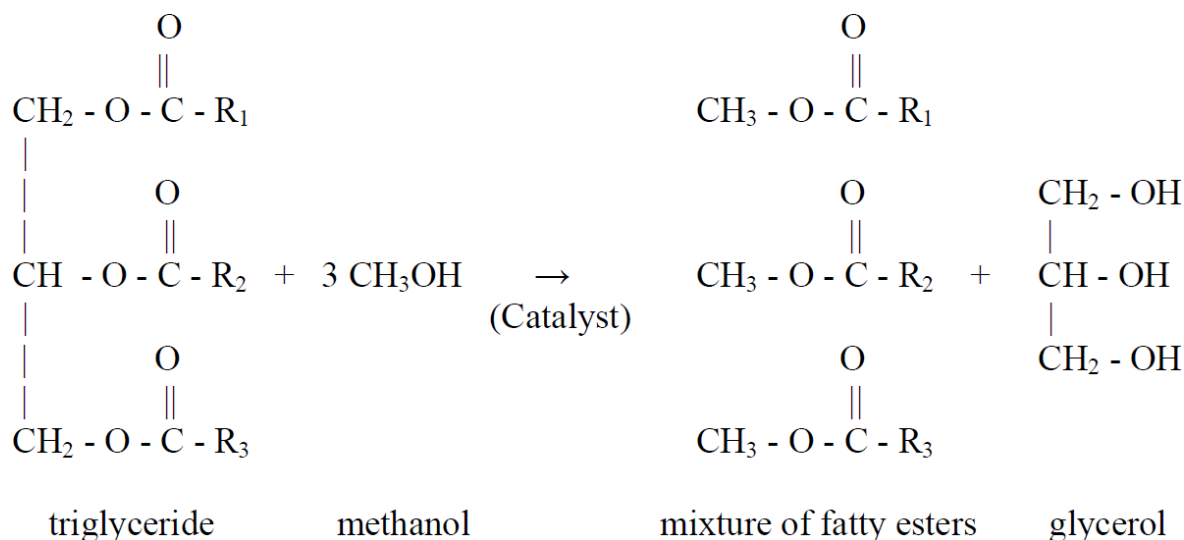
- En cualquier caso, se elimina el agua ya que provoca la hidrólisis de los triglicéridos durante la transesterificación, catalizada por una base, produciendo jabón en lugar de biodiesel.
- Los aceites vírgenes se refinan,
- En los aceites de colza, la eliminación de los fosfolípidos y otras materias vegetales se realiza por desgomado,
- Los aceites reciclados como aceites de cocina usados son purgados de sus impurezas tales como la suciedad o los alimentos carbonizados.



Figura 21: Industria extractora de aceite del grupo AVRIL en BASSENS (Trituración SAIPOL + embotellamiento LESIEUR + esterificación SAIPOL - EMHV)

La transesterificación

El proceso de transesterificación es una reacción reversible y realizada mezclando los reactivos - ácidos grasos, alcohol y catalizador. Una base fuerte o un ácido fuerte puede utilizarse como catalizador. A escala industrial, se utiliza principalmente el metilato de sodio o de potasio. Los productos finales del proceso de transesterificación son el biodiesel bruto y el glicerol bruto. En otro proceso, estos productos brutos se someten a una etapa de limpieza. En caso de utilización de metanol como alcohol, se produce FAME (éster metílico de ácido graso). El glicerol purificado puede ser utilizado en las industrias alimentarias y cosméticas, así como en la industria oleoquímica. El glicerol también puede usarse como sustrato para la digestión anaeróbica.



Ecuación de reacción del proceso de transesterificación

Fuente: NREL 2004

Los productos finales

- Las características físicas de los ésteres de ácido graso se acercan mucho a las de los carburantes diesel fósiles; la viscosidad elevada de los aceites vegetales puros se reduce por el proceso de transesterificación. Las propiedades exactas del biodiesel terminado dependen de la materia prima. El biodiesel es no tóxico y biodegradable.
- Algunas propiedades del biodiesel son diferentes de las del diesel fósil y para un comportamiento correcto a baja temperatura y para frenar los procesos de oxidación, el biodiesel necesita un conjunto de aditivos diferente del diesel fósil. Las impurezas, tales como los metales, deben limitarse para un uso como carburante.



Hidrotratamiento (HVO)

El hidrotratamiento es la primera parte del proceso de hidrotratamiento que tiene dos etapas para la producción de una gama de carburantes a partir de aceites y de grasas. Los productos del hidrotratamiento son los hidrocarburos con propiedades superiores al biodiesel convencional y al diesel fósil. El hidrotratamiento puede utilizar una amplia gama de materias grasas y de aceites residuales como materias primas, de ahí que las siglas en inglés HEFA (Hydroprocessed Esters & Fatty Acids) se utilicen cada vez más. El producto es un diesel sin azufre, oxígeno, azote y aromáticos que puede usarse sin modificación en los motores diesel. Estos hidrocarburos de tipo diesel, también conocidos como aceite diesel renovable, pueden incluso adaptarse para responder como carburante de aviación. El hidrotratamiento es, pues, un procedimiento alternativo a la esterificación para producir un sustituto diesel a partir de la biomasa.

Proceso de hidrotratamiento

El hidrotratamiento utiliza el hidrógeno para convertir compuestos insaturados como los alcanos y los aromáticos en alcanos saturados (parafinas) y cicloalcanos, que son más estables y menos reactivos. La conversión es un proceso que consta de dos etapas.

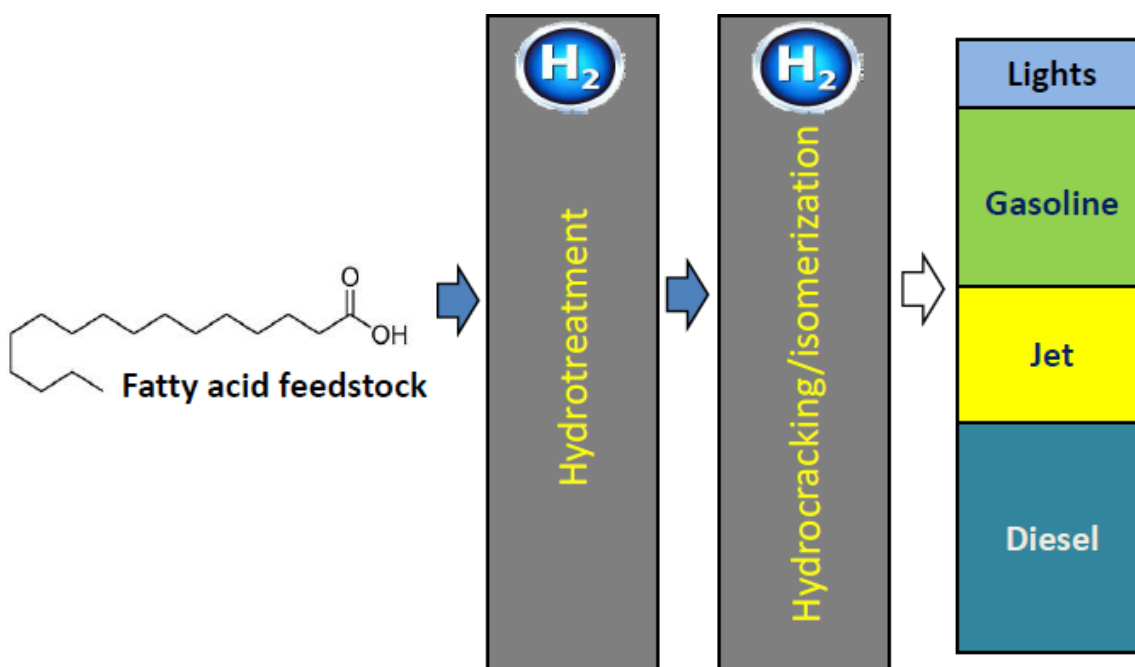


Figura 22: Esquema del proceso simplificado para las dos etapas del hidrotratamiento

La primera etapa, dicha de hidrotratamiento, tiene lugar con temperaturas de reacción comprendidas entre 300 ° C y 390 ° C. Al principio, se añade hidrógeno para saturar los dobles enlaces de triglicéridos de los aceites vegetales insaturados. A continuación, se añade más hidrógeno para eliminar el esqueleto de propano, convirtiendo así los triglicéridos de aceite vegetal saturado en ácidos grasos. Por último, los ácidos grasos se someten sea a una hidro-oxigenación, sea a una descarboxilación, o una combinación de ambas. El resultado es una mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena lineal, de cadena ramificada y cíclica.

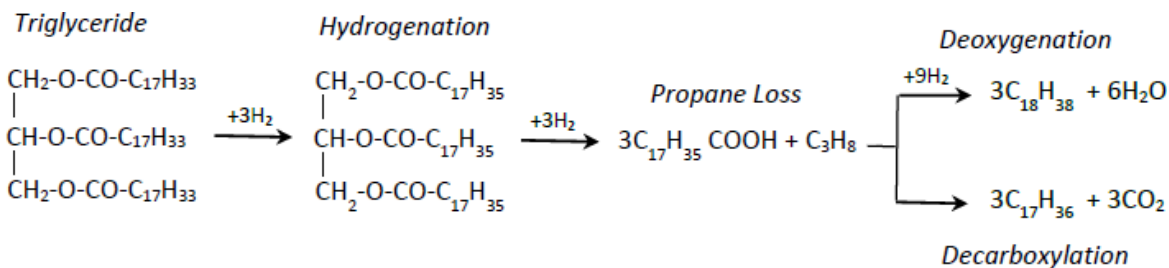


Figura 23: Ecuación de reacción del proceso de hidrotratamiento

La segunda etapa del hidrotratamiento implica la isomerización y la ruptura de alcanos que lleva al biocombustible a una calidad igual o mayor a las especificaciones de los combustibles convencionales de petróleo.

Materia prima

- Aceites vegetales corrientes (cultivos alimentarios) de colza, de girasol, de soja así como de aceite de palma y otros,
- Aceites no comestibles alternativos como la jatrofa y el aceite de algas,
- Residuos de grasas como las grasas animales o los aceites de cocina usados (UCO).

Los productos finales

Los HVO / HEFA son hidrocarburos parafínicos de cadena lineal que carecen de aromáticos, de oxígeno y de azufre y poseen un alto índice de cetano. Los HEFA ofrecen mayores ventajas en relación con los FAME (Fatty Acid Methyl Esters), como por ejemplo las emisiones reducidas de óxidos de nitrógeno, una mejor estabilidad de almacenamiento y mejores propiedades en condiciones de frío. Las propiedades son similares a los combustibles diesel de la biomasa de líquido (BTL) producidos por la síntesis de Fischer-Tropsch (FT), así pues, el HEFA puede utilizarse normalmente en todos los motores diesel.

Instalaciones comerciales

Las siguientes empresas explotan unidades de producción de HVO.

- NESTE OIL,
- Total SA,
- ENI,
- Renewable Energy Group Inc.

Metanización

La metanización permite tratar cualquier materia orgánica, excepto la madera ya que la lignina se degrada poco con la digestión anaeróbica.

Principio

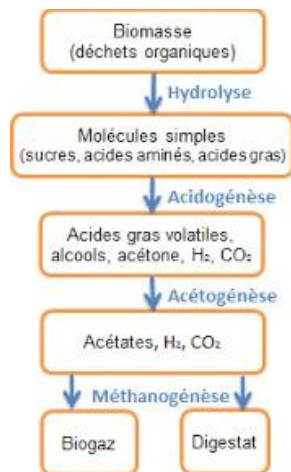


Figura 24: Principio de la digestión anaeróbica

Un metanizador es capaz de digerir materias orgánicas para sacar energía, emitida en el ambiente bajo forma de biogás. Este último puede ser valorizado en combustión, en cogeneración, en inyección e incluso en carburante.

La digestión permite, a través de 4 reacciones biológicas de degradar la materia orgánica no leñosa en biogás. El producto residual se llama digestato. Este último se utiliza especialmente como compost en los campos pero a veces también se realizan tratamientos avanzados.

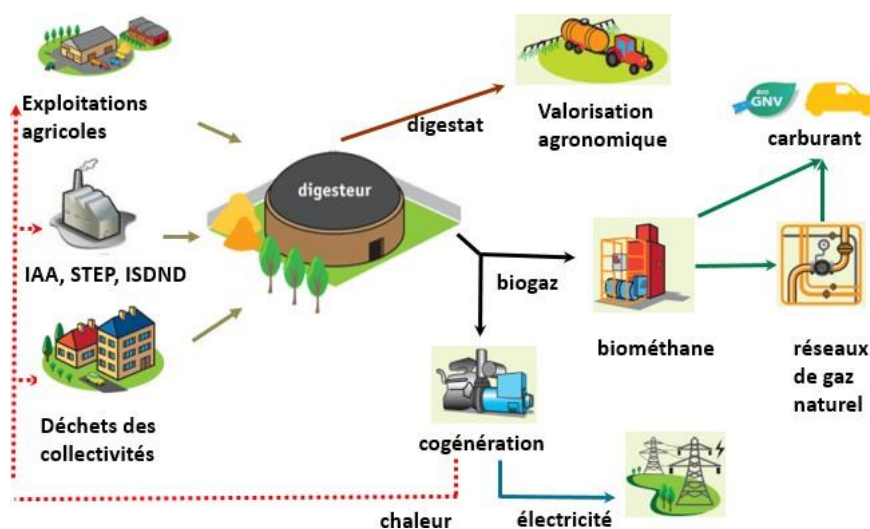


Figura 25: Esquema de principio de la metanización

Existen 3 regímenes de digestión que actúan en diferentes franjas de temperaturas. Cuanto más caliente es el ambiente, más rápida es la digestión.

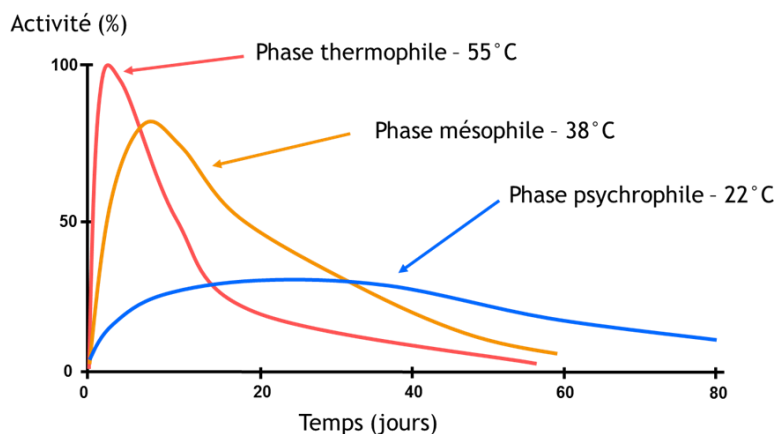


Figura 26: Régimes de digestion anaerobica

La digestion tiene efectos en las materias tratadas:

- La carga organica a la salida (porcentaje de MO) es bastante inferior a la de la entrada, consecuencia de la mineralizacion del carbono, exportado bajo forma de CH_4 ,

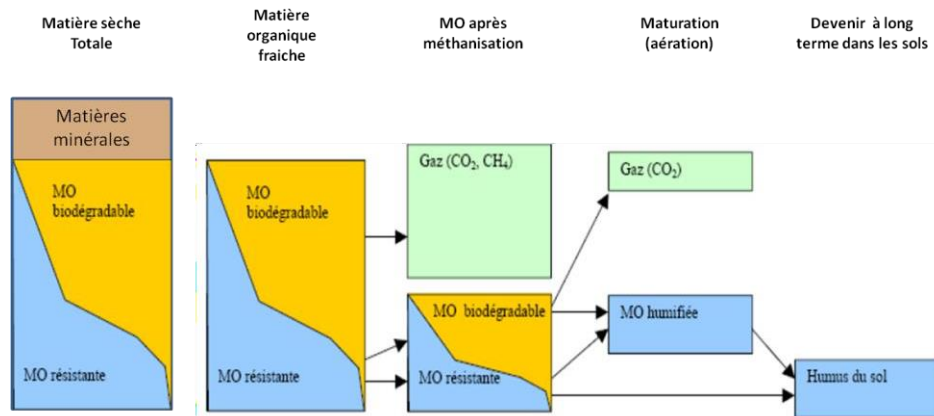


Figura 27: Efectos de la digestion anaerobica en el carbono (MO)

- El azote organico presente en la MO digerida es mineralizada y queda en la fracción líquida (el digestato).

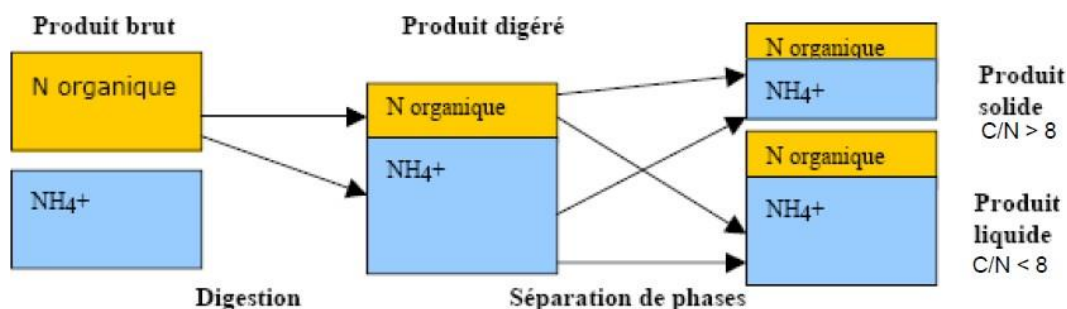


Figura 28: Efectos de la digestion anaerobica en el ciclo del azote

La metanización es un nuevo puesto de consumo de biomásas. Entra, de alguna manera, en competencia con los suelos ya que consume materias orgánicas que les son destinadas a ellos en principio. Se trata, pues, de acompañar el enfoque de la metanización con prácticas de cultivo razonables, tanto del punto de vista de las rotaciones como de los itinerarios técnicos que deben aplicarse (sembrado directo, reducción de las compactaciones, rotaciones y aportes de materias orgánicas). De hecho, se trata de maximizar la producción de biomásas por hectárea (almacenamiento de energía solar) - con el doble cultivo porejemplo²², al mismo tiempo que se reducen las pérdidas por mineralización (reducción del trabajo de suelo). Sin estas acciones de fondo, que deberían ser acciones previas, un proyecto de metanización puede transformarse a veces e ir en contra la referencia agronómica. Globalmente es lo contrario lo que sucede y se constata ya que muy a menudo la metanización es una puerta de entrada hacia un razonamiento agrícola resiliente.

Desarrollo de la metanización en Francia

El parque francés está compuesto a finales del 2019 de 900 unidades, de las cuales 123 en inyección de biometano (el 14% del parque). La cantidad de energía inyectada representa por su parte el 48% de la energía producida, con 2 158 GWh/año contra 2 300 GWh eléctrico en cogeneración.

Asistimos a una intensificación de este tipo de valorización que parece más pertinente que la producción de electricidad desde un punto de vista económico pero también energético (parte de energía final entregada > en la cogeneración).

La promoción de estos proyectos es variada y puede integrar colectividades, privados, asociaciones, cooperativas en los comités de seguimiento o de montaje del proyecto.

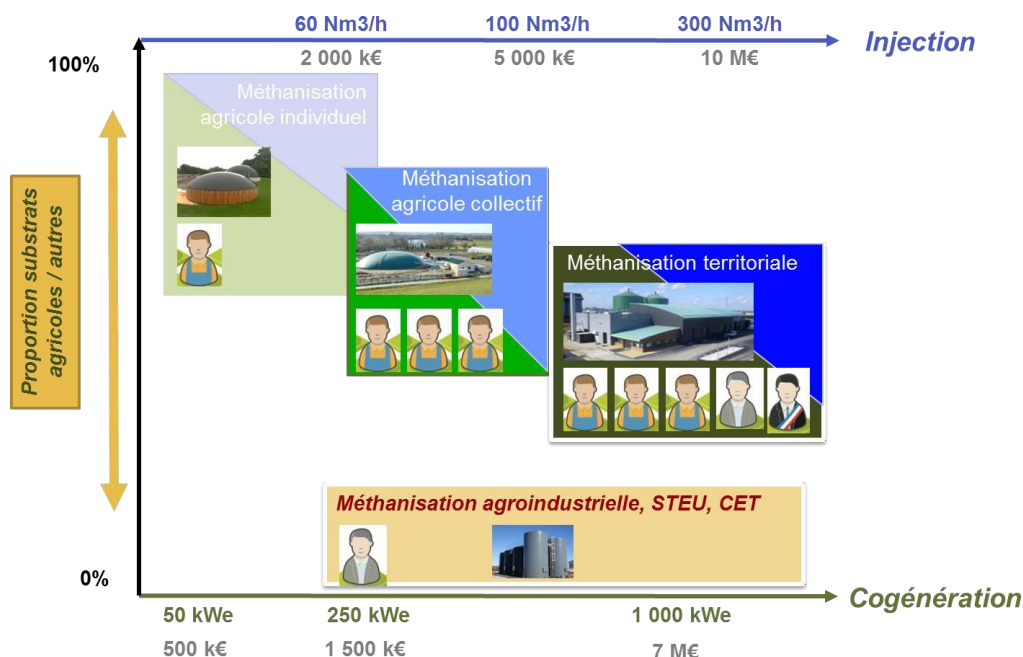


Figura 29: Tipología de los proyectos de metanización – Fuente: SOLAGRO

Funcionamiento

Existen diferentes tecnologías de metanización que permiten adaptarse a la diversidad de materias primas. Las tecnologías detalladas más abajo son adaptadas de una mezcla: efluentes de ganadería y avicultura / materias vegetales / residuos de colectividades.

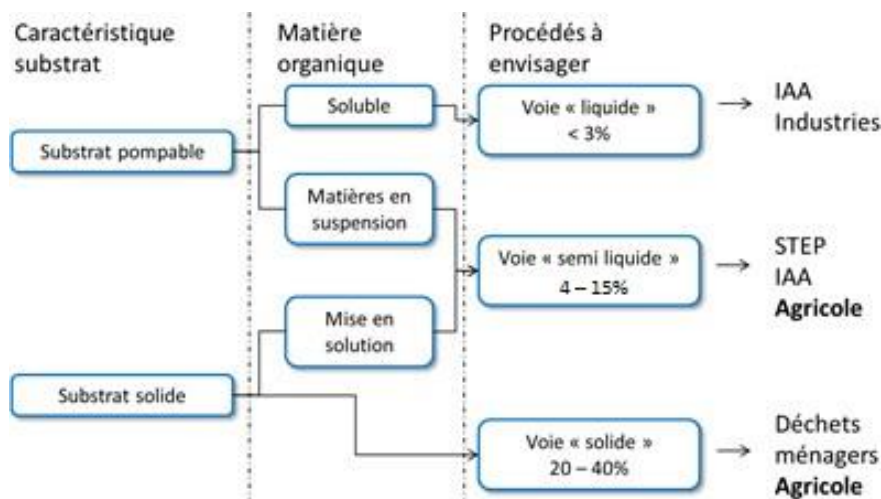


Figura 30: Elección del procedimiento de metanización empleado – fuente: APESA

Metanización de vía líquida o de mezcla completa

El reactor de mezcla completa es la tecnología más utilizada y más madura. El principio consiste en la agitación de una cisterna cilíndrica de manera que se homogeneice el interior de la cisterna. Existen dos tipos de reactores de mezcla completa:

- Torre digestor, con una relación anchura/altura de 1/1 y una agitación central provocada por la parte superior de la fosa. Normalmente se completan por un post-digestor.
- Digestor agrícola clásico, construido con el principio de depósitos de purines, menos alto (6 m.) que ancho (25 à 35m.), normalmente equipados de agitadores laterales y de un gasómetro de doble membrana.

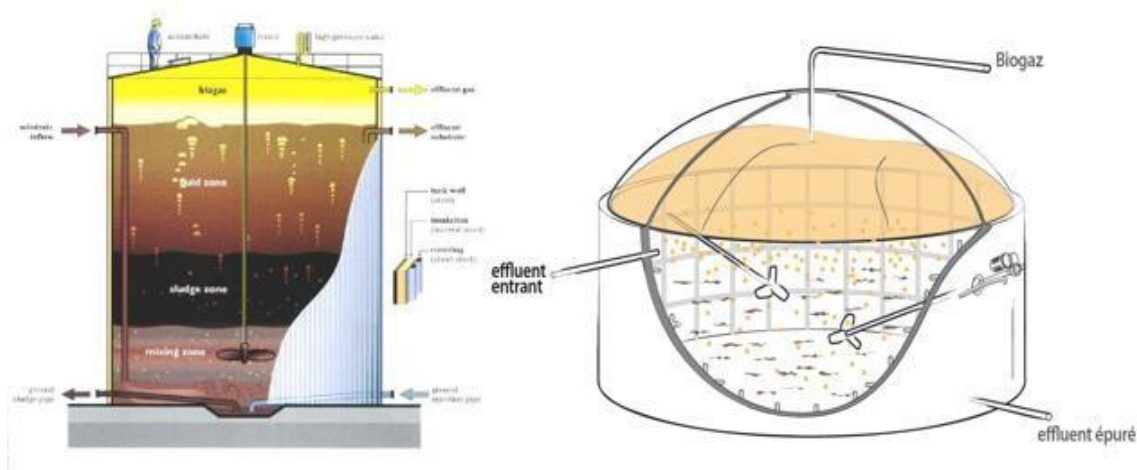


Figura 31: Tipos de digestores empleados de mezcla completa

La agitación puede realizarse también con biogás bajo presión o por re-circulación del digestato. Estos digestores funcionan con un porcentaje de materia seca (en el interior del digestor) que puede ir hasta el 12-14%. La sequedad en entrada puede alcanzar tasas elevadas de MS (hasta el 50%) pero ello necesita un ciclo de re-circulación y un sistema de preparación de materias adaptado a las matrices para mezclar.

Metanización de vía seca continua

La vía seca se desarrolla tímidamente en Francia. Inicialmente, se empleaba para los residuos domésticos. El principio se basa en un reactor de flujo pistón, que garantiza que cada partícula introducida se quede el mismo tiempo en el digestor. Las fases de digestión se suceden a medida que la materia avanza en el reactor, un poco a imagen de un tubo digestivo.

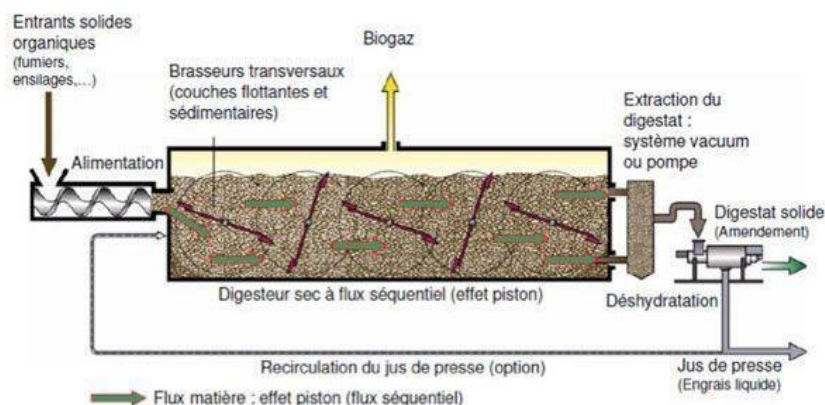


Figura 32: Esquema del principio de un digestor pistón

El porcentaje de materia seca admitido en digestión en este tipo de digestor es de alrededor 20-25%. En la entrada, una bomba de pistón, u otro sistema rústico y potente, debe canalizar la materia hacia el digestor, a pesar de las fuertes pérdidas de carga generadas por el líquido que debe transportarse.

Metanización de vía seca discontinua

La vía seca discontinua consiste en introducir la materia que debe metanizarse en un «garaje». El mantenimiento está asegurado con un cargador. Una vez introducida la materia permanecerá en el reactor entre 40 y 70 días. Una re-circulación de líquido, llamado lixiviado, activa o frena la reacción y mantiene en temperatura la materia.

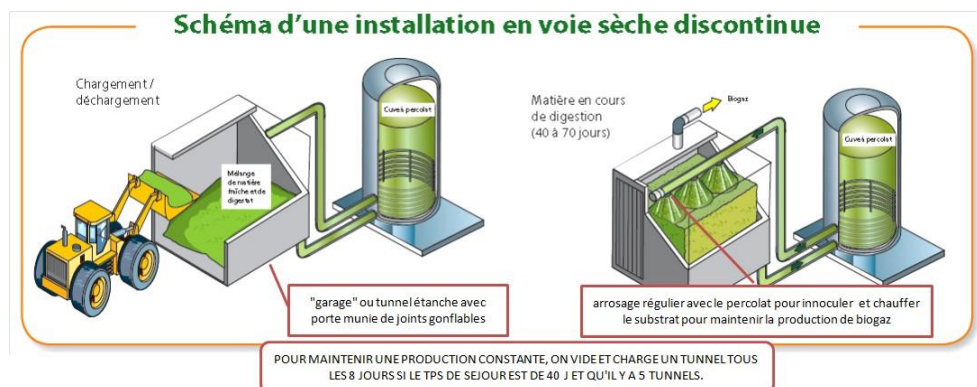


Figura 33: Esquema del principio de vía seca discontinua en garajes - fuente: Naskeo Méthajade

El porcentaje de materia seca aceptado en los digestores es más elevado que en las tecnologías descritas anteriormente, puede ir hasta el 30%. No obstante, el porcentaje de expresión del potencial metanógeno de los entrantes es inferior al porcentaje observado en las vías continuas.



Valorización del biogás producido

El biogás generado por la metanización se valoriza principalmente por cogeneración o por inyección en la red de gas, después de la depuración (en gran parte del CO₂).

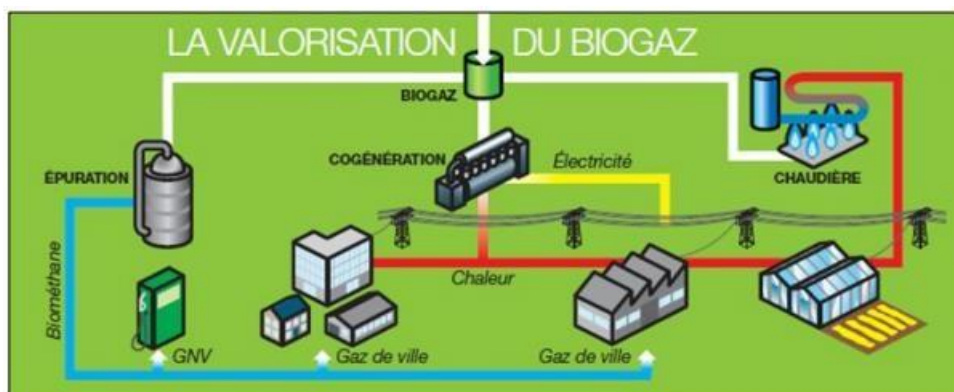


Figura 34: Valorizaciones posibles para el biogás proveniente de la metanización

Combustión

El mercado del calor se emplea principalmente en las industrias que, a partir de productos conexos, reducen la parte de energía importada. Normalmente se trata de instalaciones antiguas que han sido creadas antes de la puesta en aplicación de las tarifas de compra (< 2006).

Cogeneración

La técnica de cogeneración es bastante frecuente ya que se trata de un motor térmico al que están adosados una generadora y un intercambiador de placas. El rendimiento eléctrico se acerca al 35% pero puede alcanzar más del 42% en algunos motores de alto rendimiento. Por contra, en las gamas de pequeñas potencias (< 50 kWe), los rendimientos pueden estar por debajo del 30%.

La generación de calor es inversamente proporcional al rendimiento eléctrico. Es, de alguna manera, el subproducto de la cogeneración, cuya producción se valoriza raras veces en su integralidad. El rendimiento térmico de una cogeneradora es del 40 al 50% más o menos. Normalmente, se constata del 10 al 20% de pérdidas relacionadas con los rozamientos del motor y pérdidas térmicas.

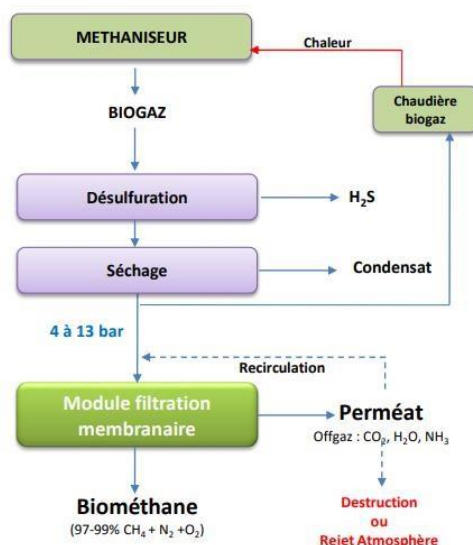
Inyección

Las técnicas de depuración son más recientes. Como en la cogeneración, se debe alcanzar un determinado umbral (estimado aquí a 60-70 Nm³/h instalados) para permitir una rentabilidad compatible con los objetivos de los financiadores. El biogás puede ser depurado por 3 tecnologías en las que encontramos algunas variantes :

- La separación por membranas,
- La separación por PSA,
- La separación por lavado: con agua o aminas.

Estas 4 técnicas (3 de las cuales una tiene 2 variantes) se ilustran aquí abajo⁷.

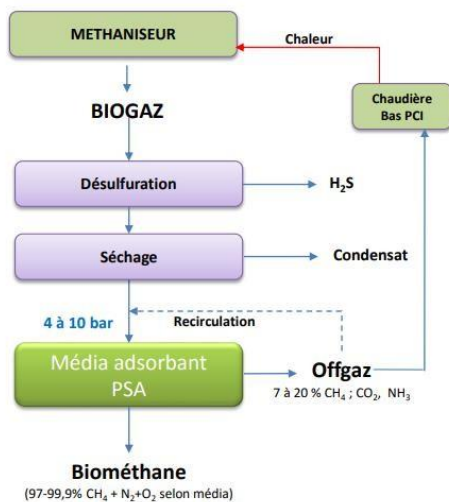
Épuration membranaire



Combinaison de modules membranaires
Source : DMT (membranes Evonik)

Figura 35: Principio de la depuración por membranas

Épuration par PSA (Pressure Swing Adsorption)



Skid PSA
Source : Xebec - VerdelMobil
Mortagne sur Sevrès (85) 65 Nm³/h



Figura 36: Principio de la depuración por PSA

⁷ Fuente: Panorama des solutions d'épuration du biogaz – ASTRADE (Jacky BONNIN) - <https://site.grdf.fr/documents/7903441/c938ef2e-1060-4549-83aa-1d1b821fd338>



Épuration par lavage à l'eau

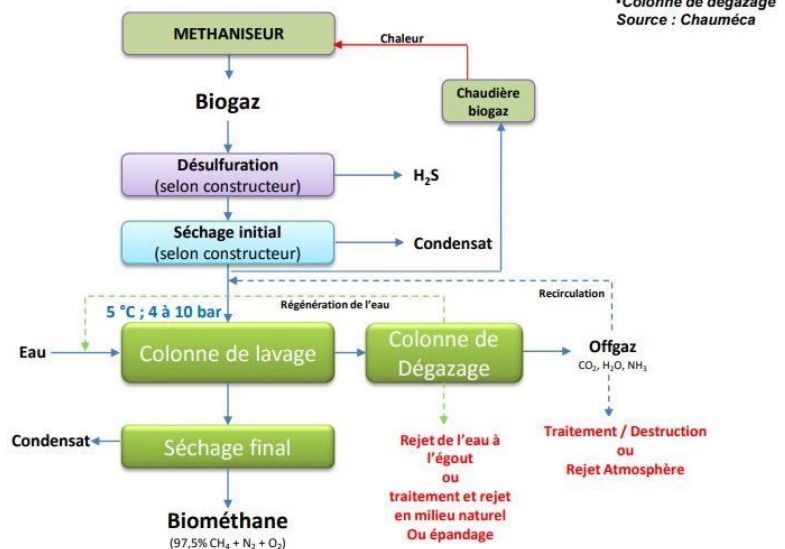


Figura 37: Principio de la depuración por lavado con agua

Lavage aux amines

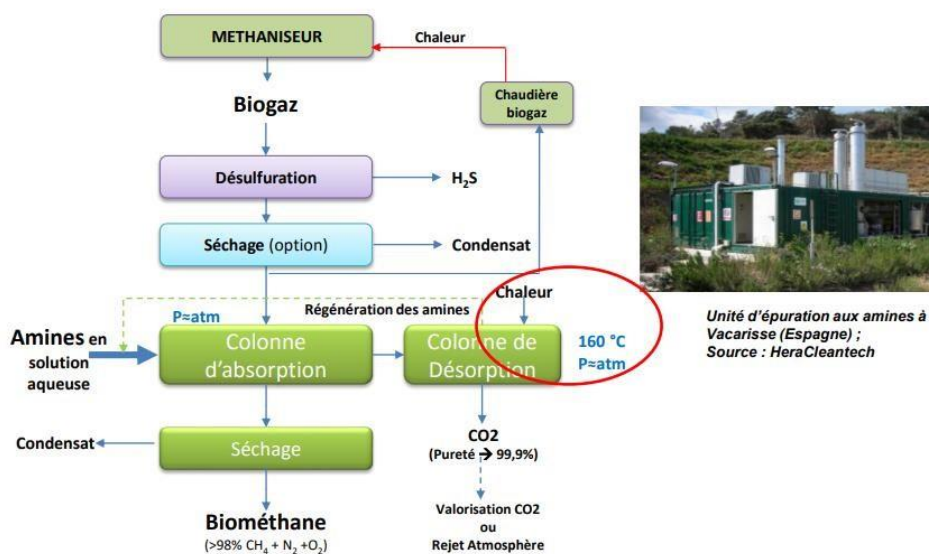


Figura 38: Principio de la depuración por lavado con aminas

El parque francés está equipado en su mayoría de sistemas de membranas.

Por último, existe una tecnología suplementaria que se emplea también de manera experimental: la separación criogénica.

Esta consiste en enfriar el biogás producido hasta alcanzar temperaturas de licuación de los diferentes compuestos. Estos son valorizables después del transporte hacia un lugar de consumo.

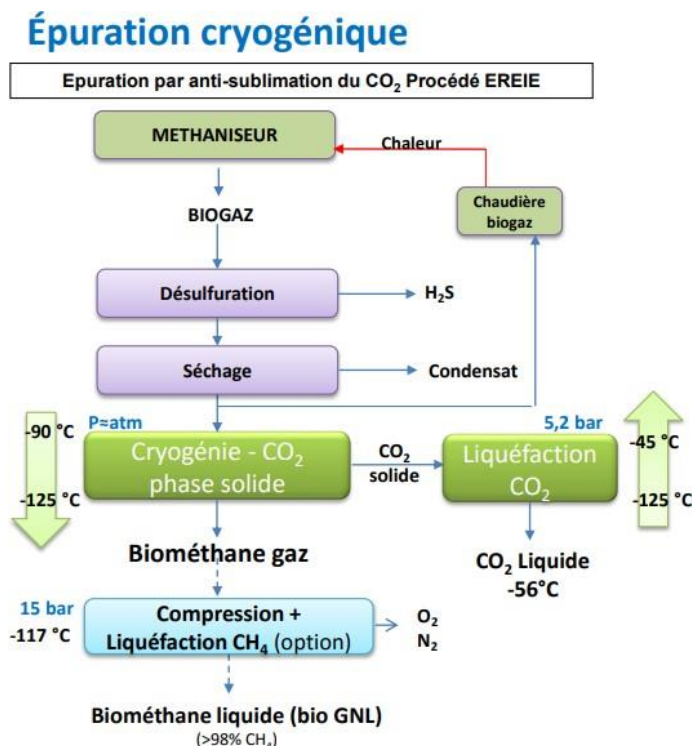


Figura 39: Principio de la depuración criogénica

Hasta el día de hoy, el CO₂ proveniente de los diferentes dispositivos de depuración se valoriza muy poco. Solamente algunos proyectos lo valorizan, en cultivos de invernaderos principalmente. El yacimiento es, pues, movilizable para técnicas de metanización, pero es preferible que estén a proximidad inmediata de los proyectos. De hecho, el transporte de CO₂ en su forma gaseosa es difícil de contemplar sino es a través de tuberías. Cualquier cambio de estado conlleva un gasto elevado que afecta a su atraktividad.

Cifras y referencias

CAPEX

Las inversiones en una unidad de metanización se aprecian generalmente por unidad de potencia instalada. Estas oscilaciones son muy amplias y reflejan las disparidades importantes constatadas.

- En cogeneración, las inversiones oscilan entre 5 000 y 10 000 €/kW_e instalado,
- En inyección de biometano, se oscila entre 20 000 a 50 000 €/Nm³/h instalado.

Estos gastos conciernen:

- La adquisición del terreno,
- La excavación,
- El saneamiento,
- Genio civil,
- El pesaje,
- Proceso de metanización,
- Proceso de depuración,



- Las obras de almacenamiento del producto final (digestato),
- Edificio,
- Electricidad,
- Las diferentes conexiones (agua, gas y/o electricidad),
- Parque móvil,
- Material de carga,
- Gastos de estudios,
- Gastos bancarios y seguros.

OPEX

Los costes de explotación rondan los 50 a 70 €/MWh producidos y están constituidos de:

- Compra de las materias de entrada,
- Mano de obra, salarios,
- Gastos de análisis y seguimiento biológico,
- Electricidad,
- Transporte de las materias de entrada,
- Transporte y esparcido del digestato,
- Gastos de mantenimiento de la metanización
- Gastos de mantenimiento acerca de la valorización del biogás,
- Gastos de mantenimiento y de análisis acerca del puesto para la inyección alquilado al gestor de red (TEREGA, GRDF,...),
- Gastos diversos: tasas, seguros, contabilidad,...

Ingresos

Los ingresos provienen casi exclusivamente de la reventa de energía. Algunas unidades consiguen percibir algunas tasas pero las tensiones en el mercado, inducidas por el desarrollo del sector, tienden a la reducción de estos productos.

Dos decretos tarifarios permiten fijar la tarifa de compra de la energía entregada. Para la cogeneración, le MWh eléctrico se vende entre 130 y 210 € mientras que en inyección, se habla más bien de 70 a 120 €/MWh_{PCS}.

Constructores

Vía líquida de mezcla completa:

- Arkolia,
- Sud-ouest biogaz,
- Evalor,
- Naskeo,
- Planet biogaz,
- Envitec biogas,
- Valgo,
- Archbiogaz,
- Xergi,
- BTS biogas,
- Hitachi Zosen Inova,
- ...

Vía seca:

- CH4 système,
- Sud-ouest biogaz (discontinua),
- Strabag,
- Naskeo Méthajade (discontinua),
- Ogin,
- ...

Pequeña metanización en el departamento francés 64

En el País Vasco Francés, las explotaciones agrícolas son pequeñas estructuras en las que parece difícil movilizar grandes tonelajes, excepto las organizaciones colectivas. Así, el montaje de proyectos importantes en esta zona geográfica parece complicado. A petición de ESTIA, presentamos algunas tecnologías adaptadas a la pequeña metanización agrícola.

Destacamos, además, que el biogás producido por metanizador pequeño se valoriza normalmente en cogeneración. De hecho, los depuradores de biogás solamente son viables a partir de 60 Nm³/h inyectados, es decir un equivalente eléctrico de 250-300 kW_e, lo que ya no entra en el ámbito de la pequeña metanización que tiene como límite plafonne, según pensamos, los 100 kW_e (+/- 25 Nm³/h).

Pequeña metanización de vía húmeda

Algunos constructores proponen la realización de unidades de mezcla completa. Teniendo en cuenta los costes fijos de construcción de las cisternas pequeñas de cemento, la mayoría proponen soluciones alternativas que pueden parecer menos robustas y menos seguras. Sin embargo, estas unidades son competitivas y la mayoría pueden ser desmontadas fácilmente al final de su vida útil.



Figura 40: Solución de depósitos flexibles ARCBIOGAZ



Figura 41: Metanización en silo equipado de un revestimiento de estanque – VALOGREEN

El principio de estas técnicas es el mismo que una unidad clásica. Las materias sólidas se diluyen en una pre-fosa antes de llegar a los digestores. La dilución en pre-fosa se realiza con una re-circulación que proviene del digestor.



Figura 42: Solución de tratamiento de purines BIOELECTRIC

La solución de aquí arriba se adapta a los purines, sin co-sustratos sólidos. Es montada en kit sobre una losa de hormigón. El montaje se realiza en varios días solamente.

Metanización de vía seca

En materia de vía seca, Francia no ha trabajado mal en la técnica discontinua. A nuestro juicio, esta técnica especial solamente puede ser posible y eficaz si los entrantes se inmergen un poco en agua ya que sin ello la digestión es heterogénea.



Figura 43: Vía seca discontinua en garajes – NASKEO METHAJADE (>100 kWe)

No obstante, algunas técnicas propuestas permiten una inmersión completa de los insumos durante su estancia en digestión (fosa barco) ; en estas unidades constatamos un buen rendimiento.



Figura 44: Vía seca discontinua con inmersión – SUD OUEST BIOGAZ

Por último, la vía seca continua es una técnica interesante que ha quedado corroborada en Suiza y que ve posicionarse a nuevos proveedores. El constructor histórico Kompogas ha sido comprado por Hitachi Zosen INOVA; la tecnología estrella no parece disponible por debajo de una cierta escala. Aún así, podemos presentar a un proveedor capaz de posicionarse.



Figura 45: Metanizador vía seca continua modular de talla S (30-150 kWe) - BIOGASTIGER

Para terminar, para todas estas técnicas, l'autoconstrucción parece una vía de reflexión, como en Suiza, especialmente en el momento de las puestas en vigor de las normas de ganadería.

Los pioneros de la metanización han trabajado a menudo así y han tenido éxito financiero. Esta opción necesita una cierta formación/experiencia de la metanización o un acompañamiento adaptado.

Yacimiento de CO₂ asociado a la metanización

Este yacimiento de carbono podría, a través de un proceso de metanación, por ejemplo, permitir la producción (o la conversión) de CH₄/año. Es evidente que esto solamente es posible con el suministro de hidrógeno que puede producirse por electrólisis (exceso de almacenamiento de electricidad en la red) o bien por gasificación.

Además, el digestato constituye un recurso para la conversión de biomasa por vía termoquímica. Cuidado : esta exportación intensificaría las exportaciones de MO provenientes de la agricultura.

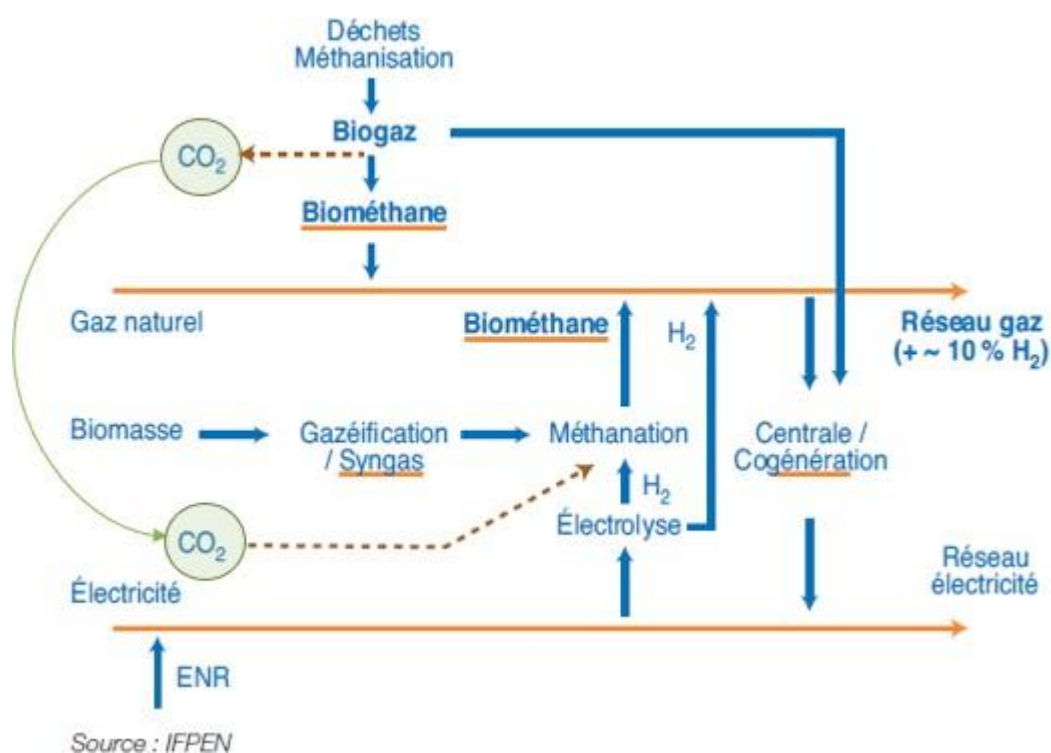


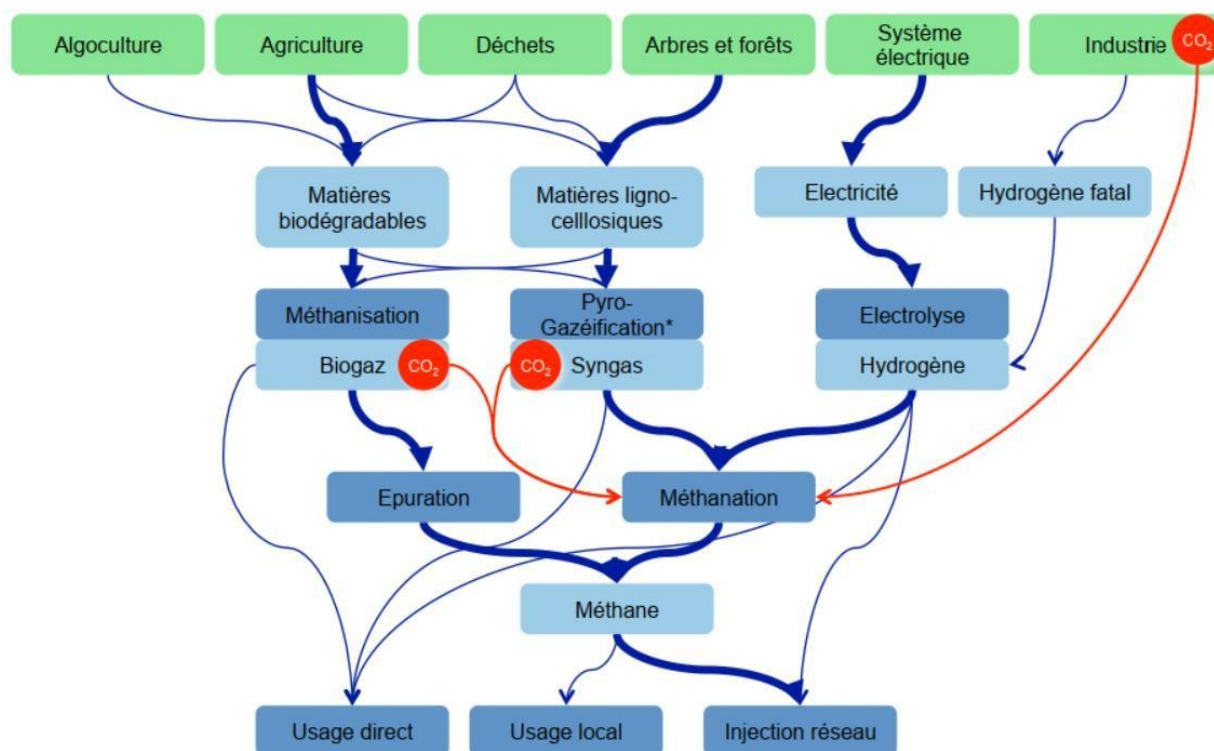
Figura 46: Integración del sector de la metanización en los nuevos sectores del gas verde 2G

Las tecnologías en desarrollo

Las tecnologías en vías de desarrollo descansan en la valorización de productos múltiples a partir de un mismo yacimiento. Es una condición que parece inevitable para la viabilidad de los sistemas contemplados. Esta vía pasa, pues, por el concepto de la biorefinería.

Los sectores de los biocarburantes no parecen constituir una prioridad y el reto es, de hecho, el de sustituir la primera generación que entra en competencia con la alimentación. Además, los bioaceites (producidos por pirólisis por ejemplo) parecen que deben ser refinados.

Para los sectores de producción de gas de 2ª generación, como explicado más arriba, deben poder producir una parte importante del gas consumido para antes del 2050, fecha de vencimiento. El esquema de las utilidades de la biomasa simplificada, propuesta en el marco del estudio 100% gas verde en 2050, se presenta aquí y permite conocer los sectores y los circuitos contemplados.



*y compris gazéification hydrothermale

Figura 47: Esquema de utilidades simplificado de la biomasa simplificada (fuente: SOLAGRO)

Más abajo, abordaremos algunas técnicas ilustradas aquí:

- La producción de biocarburantes de 2ª y 3ª generación,
- Pirogasificación,
- Gasificación hidrotermal,
- Metanación (o Power 2 gas),
- La producción de larvas de moscas (petición complementaria de ESTIA).

Sin embargo, antes de abordar estas tecnologías, conviene hablar de las técnicas de preparación indispensables para su aplicación.



Pre-tratamiento de la biomasa para facilitar la conversión en bioenergía o biocarburantes

Antes de que los cultivos energéticos o los residuos orgánicos puedan ser convertidos, se requiere normalmente alguna forma de preparación, ya sea por métodos físicos (mecánicos), químicos, termoquímicos o bioquímicos.

Tratamientos físicos

Trituración

Generalmente, la primera etapa consiste en tratar mecánicamente la materia prima (por ejemplo los desechos de madera, paja, etc.) para reducir el tamaño por trituración. Esta etapa puede realizarse en el sitio de producción de la biomasa, un almacenamiento intermedio (en general, donde la biomasa puede secarse) o en el lugar de valorización (puesto fijo).



Figura 48: Trituradoras automotoras

Esta etapa se realiza a veces par fresado, extrusión. Ello permite:

- Facilitar el mantenimiento,
- Fluidificar el producto,
- Aumentar la superficie de intercambio,
- Disminuir la cristalinidad,
- Reducir el grado de polimerización.

A esta etapa le sigue una puesta en montones durante varias semanas con el fin de iniciar el secado (por auto-calentamiento del montón) hasta el 20-25% de humedad en bruto.

El aumento de la superficie de intercambio es imprescindible para favorecer un secado homogéneo y rapido.

Torrefacción

La torrefacción es un proceso termoquímico que normalmente se realiza:

- Entre 200 y 300 ° C,
- En ausencia de oxígeno,
- Con presión atmosférica,
- Con velocidades débiles de calentamiento de las partículas



- Con un tiempo de reacción de una hora.

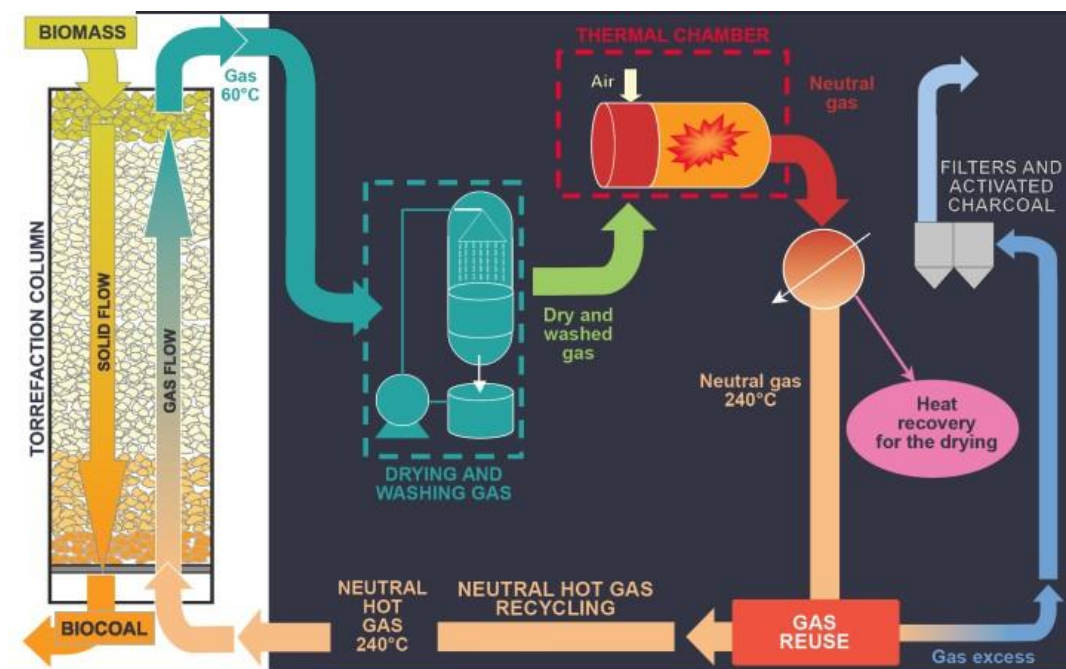


Figura 49: Esquema de principio del reactor TORSPYD de LMK Energy (antiguamente Thermya / AREVA)

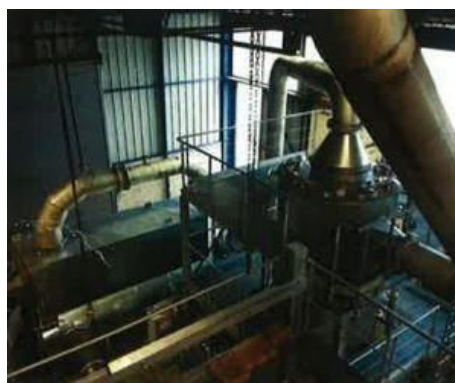


Figura 50: 1ª unidad comercial en Francia (proceso THERMYA, finalizado con/por AREVA)

Existen diversos procedimientos con técnicas diversas y variadas. Presentamos aquí 2 otros procedimientos franceses. No es fácil encontrar otros proveedores extranjeros de esta tecnología.

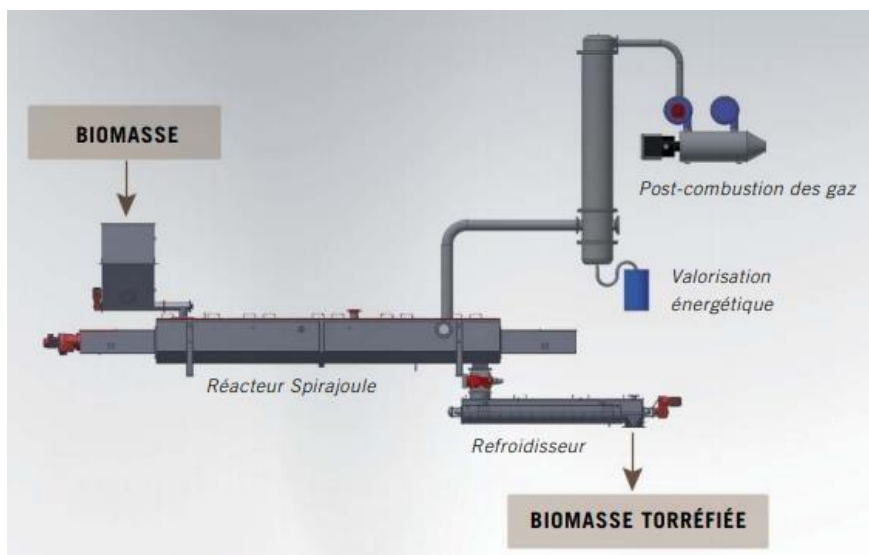


Figura 51: Procedimiento de torrefacción BIOGREEN (filial de ETIA GROUP)

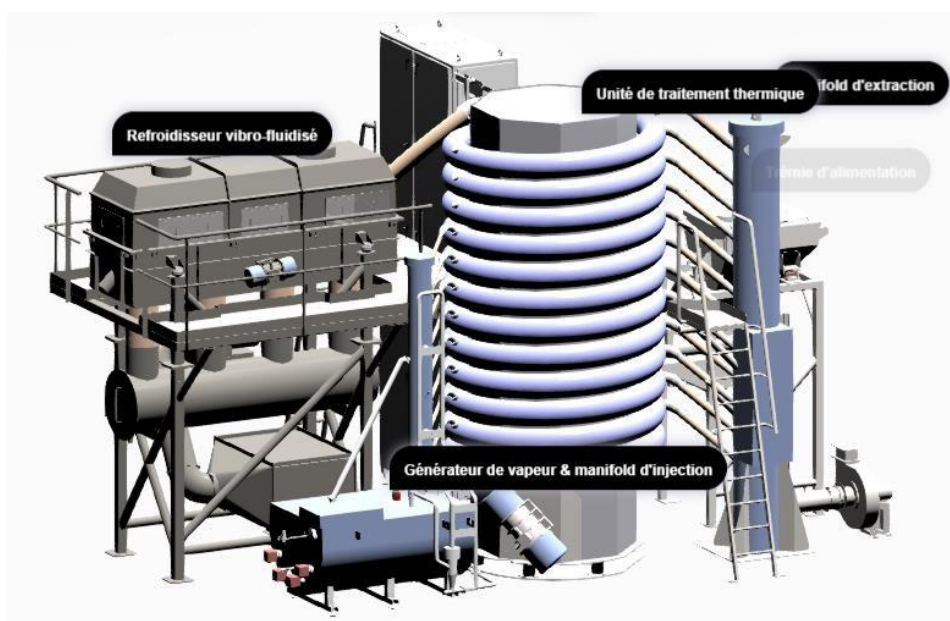


Figura 52: Modelo 3D de la unidad propuesta por REVTECH

Debido a la alta temperatura, durante el proceso de torrefacción, los compuestos de la biomasa se descomponen. Los compuestos de energía débil de la biomasa se transfieren a la fase gaseosa. Primero, el agua es expulsada, luego la hemicelulosa se descompone, y en parte también la lignina. El proceso crea la biomasa torrefactada o el producto carbonizado final, también llamado «biocoal » o «biochar».

Este producto tiene la particularidad de ser anhidro (<1% de agua) y de ser muy friable comparado con la matriz bruta. Esto permite realizar una densificación fácil (gránulos, briquetas...) ya que el producto no opone resistencia y es menos desgastado para el material empleado.

Por último, su bajo contenido en agua le otorga un importante poder calorífico.



Tabla 1: Comparación de productos madereros, bruto y densificado, con un Biocoal densificado

	Crushed wood	Wood pellets	BIOCOAL briquettes
Lower Heating Value	7.4 to 11.4 MJ/kg 2 to 3.2 kWh/kg	17 to 18 MJ/kg 4.7 to 5 kWh/kg	20 to 21 MJ/kg 5.5 to 5.8 kWh/kg
% Moisture	30 to 50%	< 10%	< 1%
Transport density	250 to 400 kg/m ³	650 kg/m ³	900 kg/m ³
Energetic density	815 kWh/m ³ mean	3 150 kWh/m ³ mean	5 085 kWh/m ³ mean

Aunque la biomasa torrefactada se emplea desde hace tiempo en algunos sectores (vinificación⁸ especialmente), el biochar no es muy frecuente. Las primeras producciones destinadas a la energía han sido consumidas sobre todo en centrales eléctricas de carbón, en co-cocción.

Sin embargo, constituye en algunos proyectos una fase de preparación (en el proyecto BioTFuel por ejemplo). La biomasa es torrefactada, secada y triturada en polvo con el fin de permitir su inyección bajo presión en un gasificador a través de un sistema de fluidización.

Densificación energética

La preparación contribuye a mejorar la densidad energética de la biomasa, lo que le permite ser transportada de manera más eficaz desde el punto de producción (campo, bosque o instalación bioindustrial) hasta el punto de utilización. La biomasa se tritura/seca previamente para ser después comprimida en gránulos, briquetas u otros, o tratada con el calor y la presión (por ejemplo pirólisis, torrefacción) para crear «biocarbón» o «bioaceite» como se describe más detalladamente aquí abajo.

Pelletización

El secado y la compresión de la biomasa triturada para formar gránulos de combustible mejora el mantenimiento del producto con propiedades de flujo similares a los granos (la conservación en silos). Los gránulos se entregan más fácilmente a domicilio, las empresas y las centrales eléctricas y, en función de su tamaño y de su forma constante, pueden introducirse de manera automática

⁸ El biochar se usa desde hace mucho tiempo en la vinificación. De hecho, la infusión de esta madera torrefactada, en diversos grados, aporta al vino taninos y sabores amaderados, sin haber alojado el vino en barricas... el líder mundial de estas virutas de madera está en Aire / Adour en las Landas (Boisé France).

en las calderas de gránulos avanzadas de manera controlada y calibrada. La producción de gránulos de madera ha sido multiplicada por 7 entre 2006 y 2018 para alcanzar más de 55 millones de toneladas⁹.

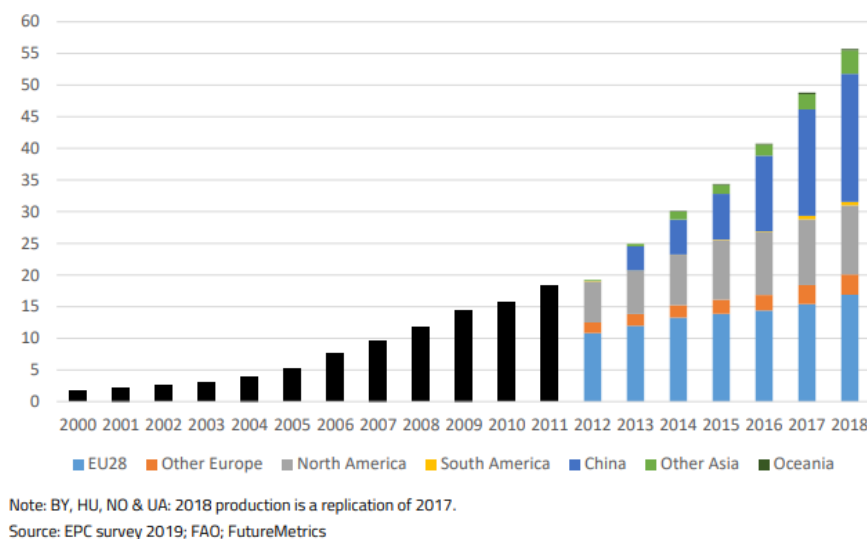


Figura 53: Evolución del mercado de gránulos de madera

Tratamientos Físico-químicos

El fraccionamiento físico-químico de la biomasa (la mayoría de veces por explosión de vapor) convierte las cargas de alimentación lignocelulósicas en tres fracciones distintas de lignina, de celulosa y de hemicelulosa. El rendimiento y la pureza de las tres fracciones es una ventaja clave en las aplicaciones posteriores. Esto permite a las fracciones de ser tratadas de manera más eficaz en una biorefinería (donde un cierto número de productos diferentes se producen en el mismo sitio en un proceso en cascada que maximiza el valor de la materia prima de la biomasa, por ejemplo la producción de calor y de electricidad, los aditivos para combustibles, el etanol, los productos bioquímicos).

Explosión de vapor

La explosión de vapor es la preparación más utilizada de la biomasa y usa métodos físicos y químicos para romper la estructura del material lignocelulósico gracias a un tratamiento hidrotermal. La biomasa se trata con vapor de alta presión y alta temperatura durante un corto periodo de tiempo, luego se despresuriza rápidamente y la estructura de las fibrillas queda destruida por esta descompresión explosiva. Esta desfibración y la extraordinaria autohidrólisis mejoran significativamente la digestibilidad y la bioconversión del sustrato así como su reactividad hacia otras reacciones catalíticas. La descompresión brutal baja la temperatura, parando el proceso.

⁹ Fuente: Bioenergy Europe Statistical report 2019



La explosión de vapor produce también compuestos tóxicos que deben ser eliminados antes de la fermentación. Los ácidos diluidos pueden utilizarse en combinación con una explosión de vapor.

Unos procesos similares a la explosión de vapor comprenden:

- Explosión de fibra de amoníaco AFEX - La biomasa se trata con amoníaco líquido a alta temperatura y presión. Cuando la presión se suelta, el amoníaco se vaporiza y puede recuperarse.
- Explosión de dióxido de carbono supercrítico - Ver Prétraitement de la biomasse lignocellulosique - L'utilisation du dioxyde de carbone supercritique comme solvant vert, TingyueGu, 2013.

Utilización de líquidos iónicos (IL)

Los IL son compuestos únicamente de iones con enormes combinaciones de aniones y de cationes. Poseen propiedades ampliamente acordadas, como la hidrofobicidad, la polaridad y el poder disolvente. Diversos IL han sido estudiados para la preparación de la biomasa y hay nuevos trabajos que estudian la utilización de líquidos iónicos provenientes del tratamiento de ligninas.

Proceso Plantrose (hidrólisis supercrítica)

Renmatix Inc. ha desarrollado y patentado su proceso «Plantrose» que usa el agua en su estado supercrítico para hidrolizar la biomasa y producir así azúcares celulósicos y ligninas de elevada pureza a bajo coste. Los inversores de Renmatix son BASF, Kleiner Perkins Caufield & Byers y Total.

Deslignificación abrupta de baja temperatura (LTSD)

El LTSD, desarrollado por Bio-Process Innovation Inc., utiliza pocos aportes de productos químicos no tóxicos, de oxígeno y de base, en unas condiciones de reacción suaves para descomponer las materias primas lignocelulósicas. En febrero del 2015, la empresa anunció el inicio de una fábrica piloto de una tonelada/h en Indiana, tras diez años de optimización de los procesos. Ahora, la tecnología está disponible en el comercio para un uso en las biorefinerías.

Co-solvente para la mejora del fraccionamiento lignocelulósico CELF

El CELF utiliza tetrahidrofurano (THF) renovable y miscible con agua con ácido sulfúrico diluido para fraccionar la biomasa celulósica y obtener rendimientos elevados en azúcares para la fermentación o el furfural, el 5-hidroximetilfurfural y el ácido levulínico para la conversión catalítica en los combustibles y los productos químicos. La tecnología desarrollada por la Universidad de California ha sido autorizada por CogniTek. Una nueva empresa "MG Fuels" está creándose para comercializar la tecnología.

Agua caliente líquida (LHW)

LHW (conocido también bajo el nombre de agua caliente presurizada o hidrotermólisis) conlleva una inmersión de la biomasa en el agua a 180-230°C a alta presión. Esto libera unos compuestos ácidos en la biomasa que la descomponen por «autohidrólisis».



Ozonólisis

El pretratamiento de la biomasa con el ozono antes de la hidrólisis enzimática ha sido estudiado¹⁰.

Tratamientos químicos

Hidrólisis ácida

Unos trabajos recientes presentan resultados bastante prometedores relacionados con este proceso de hidrólisis bajo presión realizada en medio ácido (oxálico y sulfúrico). Este proceso permitiría saltarse la etapa de secado de la biomasa en entrada.

Hidrólisis alcalina¹¹

La hidrólisis alcalina permite tratar la biomasa con una concentración elevada de alcalino a una temperatura más baja durante un periodo de tiempo más largo.

Proceso Organosolv

Organosolv fue desarrollada en su origen como una alternativa al proceso de pasta KRAFT y usa solventes orgánicos (como el etanol, el metanol, el butanol, el ácido acético, etc.) para solubilizar la lignina y la hemicelulosa. Está en vías de desarrollo para los sistemas de biorefinería y la producción de etanol celulósico.

American Science and Technology (AST) ha desarrollado y patentado un proceso Organosolv (a escala piloto, utilizando ácido sulfúrico, butanol y otros solventes orgánicos) para convertir la biomasa lignocelulósica en azúcares, lignina pura, pulpa y productos bioquímicos de valor añadido. El proceso de fraccionamiento opera a 140-180°C bajo una presión añadida autógena a 50-60 psi (200-280 psi en temperatura máxima). El proceso de hidrólisis funciona a 40-60°C y 4-5 psi. El proceso de fraccionamiento da un 40-55% de celulosa, un 20-30% de lignina y un 20-25% de hemicelulosas. Este proceso es muy eficaz para producir más del 95% de rendimiento en azúcares. La lignina ofrece también una pureza superior al 95%.

Además, Lignol Energy Corporation ha utilizado un proceso Organosolv a base de etanol para producir lignina de alta calidad. Tecnologías similares con diversos solventes han sido desarrolladas, por ejemplo Organocell (metanol), Compagnie Industrielle de la Matière végétale CIMV (ácido acético / ácido fórmico) y Chempolis (ácido fórmico).

¹⁰ Association of wet disk milling and ozonolysis as pretreatment for enzymatic saccharification of sugar cane bagasse and straw, Rodrigo da Rocha Olivieri de Barrosa y otros, Bioresource Technology, Mayo 2013.

¹¹ Ver Hydrolyse de la biomasse lignocellulosique : état actuel des processus et technologies et perspectives futures , Alessandra Verardi y otros, ENEA, Italia. Este artículo compara también las ventajas y los inconvenientes de los diferentes métodos de tratamiento.

Tratamientos termoquímicos de la biomasa

La pirólisis y la gasificación aplicadas a los residuos son medios de convertirlos en líquidos y en gases combustibles, lo que abre un amplio campo de posibilidades de valorizarlos eficazmente.

La pirólisis y la gasificación de residuos consiste en calentarlos sin oxígeno a fin de que las sustancias generadas bajo el efecto de la temperatura (sólidos, líquidos y gaseosos) no se inflamen espontáneamente, lo que ofrece posibilidad de valorizarlos en una segunda fase.

El mercado está esencialmente compuesto de soluciones para yacimientos homogéneos. Las tecnologías de gasificación de residuos heterogéneos no son maduras y deben todavía ser objeto de trabajos durante un período de tiempo estimado por la ADEME de 10 años.

Extrait de la [fiche technique gazéification déchets ADEME](#) – janvier 2019 :

« La difficulté technique est d'adapter le procédé de pyrogazéification à l'hétérogénéité des intrants. Il est ainsi nécessaire de disposer d'une maîtrise efficace des conditions de fonctionnement. Par ailleurs, une vigilance doit être portée sur la sécurité avec la mise en place d'équipements et de contrôle adaptés destinés à éviter des réactions de combustion incontrôlée voire des explosions en cas d'entrée d'air parasite dans le four de pyrolyse ou dans les canalisations de transport du gaz de synthèse. Concernant l'exploitation de l'unité, le comportement en phase d'arrêt et de démarrage est difficile à évaluer. Des hydrocarbures peuvent se former et se condenser sur certaines parties de l'unité provoquant des colmatages. »

Como indicado en el mismo documento ADEME, no existe ningún balance anual energético de las unidades en funcionamiento, que seguramente sería muy diferente del rendimiento de conversión puro anunciado por los proveedores de estas soluciones. De hecho, los procesos de pirogasificación son procesos endotérmicos, consumidores de energías, y solamente este tipo de ejercicio permitiría comparar los rendimientos de estas tecnologías con otras tecnologías de tratamiento.

Producción de bioaceites

Los biocrudos y los bioaceites son biomásas en forma líquida que es más fácilmente bombeable, almacenable, transportable y tienen el potencial de extracción de diversos productos químicos útiles.

Existe una gran variedad de aplicaciones comercializadas que han tenido éxito y que funcionan con ese principio (1ª comerciales) y una unidad comercial (facilitada por ENSYN) está en construcción en Canadá.



Figura 54: Implantaciones de unidades de pirólisis en el mundo (Fuente: IEA Bioenergy)

La comercialización sigue encontrando obstáculos económicos y otros obstáculos no técnicos cuando intenta penetrar los mercados de la energía. Sin embargo, existe una variedad creciente de empresas y de tecnologías que han realizado aplicaciones comercializadas.

Las aplicaciones notables comprenden especialmente (para las más conocidas) :

- [Empyro](#) – Pirólisis
- [Fortum/Valmet](#) – Pirólisis
- [Ensyn](#) (distribuido también en joint-venture por [Envergent technologies](#)) – Pirólisis
- [Licella](#) – Licuefacción
- [Steeper Energy](#) – Licuefacción
- [Genifuel](#) – Licuefacción

Como indicado aquí arriba, dos principios permiten producir estos bioaceites, la pirólisis y la licuefacción (solvotermal o hidrotermal). La pirólisis se orienta más bien hacia yacimientos sólidos, secados en entrada, mientras que la licuefacción permite tratar yacimientos más húmedos.

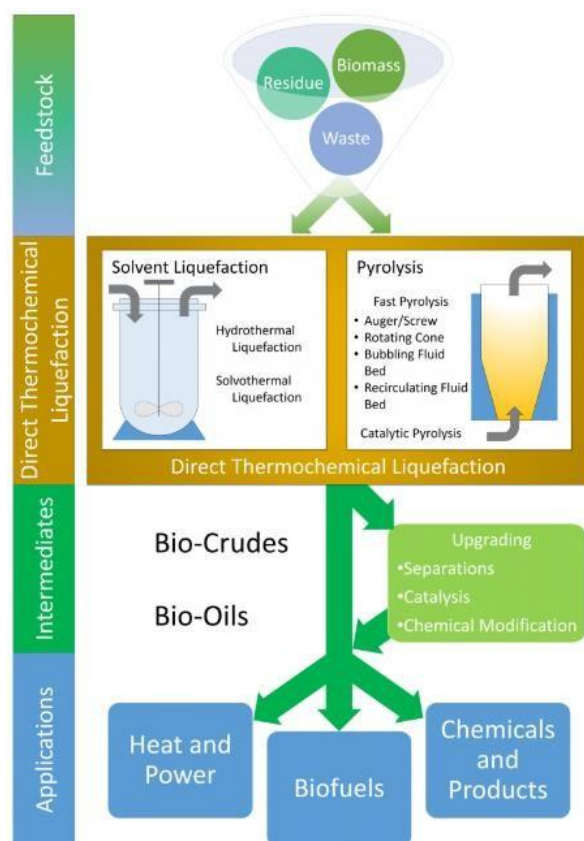


Figura 55: Principios de producción de Bioaceites (Fuente: IEAbioenergy)

Los biocarburos provenientes de los bioaceites y de los biocrudos pueden utilizarse «tal y como son producidos» en aplicaciones como los combustibles de caldera y los motores diesel estacionarios que han sido ajustados para funcionar con ellos. Sin embargo, muchas aplicaciones de carburantes hidrocarbonados pueden usar bioaceites y biocrudos una vez que los aceites han sido químicamente o físicamente modificados en un proceso llamado «upgrading» o «puesta a nivel». Estos procesos pueden incluir:

- El hidrotratamiento: utilizando hidrógeno y catalizadores para eliminar el oxígeno y ajustar el peso molecular,
- Combustibles sintéticos: para reformular la estructura molecular del biocrudo y de los bioaceites en carburantes específicos,
- Mezclas: para meter biocrudos y bioaceites en aplicaciones existentes por dilución,
- Esterificación: para formar compuestos con propiedades de tipo diesel,
- Fractura: por catálisis para reducir el contenido de oxígeno y ajustar el peso molecular.

La utilización de bioaceites como producto presenta algunos desafíos específicos:

- Incertidumbre de las estimaciones de los costes a largo plazo,
- Es necesario establecer nuevas normas reconocidas para el uso y la distribución,
- Puntos de inserción racionales de biopetróleo y del biocrudo en la economía de los hidrocarburos (no totalmente compatible),
- Conocimiento del bioaceite,
- Incompatibilidad material con el sistema de mantenimiento del carburante existente.

Los Retornos de Experiencias de los sitios en funcionamiento y las pistas de mejora son necesarios para juzgar la viabilidad del sector en su futuro. Respecto a la mejora de las tecnologías, los puntos en los que se debe prestar atención son:

- El funcionamiento a largo plazo de los sistemas de reactores de gran escala,
- Demostración de los costes reales de producción,
- Establecer una calidad de producto mínima con normas y estándares para los productores,
- Comprender las medidas para una manipulación, un transporte y una utilización en total seguridad,
- Apoyar las aplicaciones pioneras e identificar nichos de mercado para los biocrudos y los bioaceites.

Licuefacción hidrotermal

La licuefacción de solventes es la conversión termoquímica de la biomasa en combustibles líquidos e intermediarios tratando una suspensión de biomasa en un solvente caliente y bajo presión. El producto se llama biocrudo y es diferente del bioaceite.

Esto se produce por el mecanismo de conversión del contenido polímero de la biomasa sólida en compuestos principalmente líquidos. Así, se trata esencialmente de la pirólisis de la biomasa en un entorno de solvente líquido, especialmente adaptado a los insumos bombeables a altas temperaturas.

Esto incluye ejemplos conocidos como la licuefacción hidrotermal efectuada en el agua, la licuefacción solvotérmica efectuada en una variedad de solventes, así como variantes catalíticas de estos. Como la desoxigenación de la biomasa se produce en el marco de la degradación térmica, una cierta cantidad de agua líquida o de vapor, según las condiciones, estará presente.



Las condiciones normales de tratamiento son de 250°C a 370°C y presiones de 4 a 22 MPa, al acercarse al punto supercrítico del agua, pero pueden ser efectuadas por encima de estas condiciones en solventes con puntos supercríticos superiores.

Estos enfoques son contemplados para convertir los flujos de biomasa húmeda, donde la eliminación del agua puede considerarse como un coste prohibitivo, y para aprovechar las condiciones de reacción iónica en el marco de la química termolítica manteniendo unas condiciones en las que un solvente líquido es el principal medio reaccional.

Figura 56: Aceite de licuefacción hidrotermal, o biocrudo

Las condiciones de tratamiento de solventes pueden dividirse en 3 modos diferentes:

1. El tratamiento a baja temperatura se conoce con el nombre de carbonización al solvente, efectuado por debajo de los 250°C a fin de formar un material carbonizado sólido,
2. El tratamiento a temperatura intermedia se llama licuefacción, efectuado en gran parte entre 250°C y 370°C para la producción de un combustible líquido o intermediario,
3. Por último, a altas temperaturas, la gasificación del solvente puede producirse por encima de los 400°C, donde los compuestos de la biomasa pueden ser convertidos en gases no condensables de manera que el solvente, en fase móvil, no es consumido durante el proceso. Este principio se desarrolla más abajo en el capítulo «gasificación hidrotermal».

Mientras que los catalizadores están presentes de manera inevitable en forma de álcali y de solvente iónico, algunas formas de licuefacción conllevan la adición deliberada de catalizadores suplementarios a fin de incitar las reacciones de despolimerización o de favorecer productos específicos.

El producto de licuefacción por solvente es llamado también biocrudo y, comparado al bioaceite de pirólisis rápida, tiene un contenido en oxígeno y en agua inferiores, una estabilidad térmica más elevada, una viscosidad a menudo más elevada y suele ser menos denso que los bioaceites. Sin embargo, a pesar de ser más débil en oxígeno que el biopetróleo, el biocrudo

no se parece al petróleo bruto, ya que contiene mucho más oxígeno y su estructura química recuerda la materia prima de la biomasa.

En el curso del último decenio, las tecnologías de licuefacción de solventes han conocido una reaparación y han sido objeto de investigaciones en laboratorio y de trabajos de comercialización suplementarios.

Principio de funcionamiento

Un sistema de licuefacción termoquímica directa consiste en una serie integrada de operaciones unitarias que empiezan por la entrega de una materia prima de biomasa orgánica regular u ocasional. Conviene tener en cuenta el tamaño y la movilidad de las fábricas a fin de determinar si, en una circunstancia dada, es más rentable transportar y almacenar la biomasa no densificada o utilizar sistemas de licuefacción más pequeños, distribuidos o móviles. Una vez en forma líquida, los bioaceites y los biocrudos pueden manipularse o transportarse más fácilmente que la biomasa bruta.



Figura 57: Unidad de LICELLA - Somersby en Australia

Referencias

Parece que una sola unidad de tamaño industrial está en funcionamiento, en Australia, pero nos ha resultado imposible encontrar datos técnicos y económicos de esta unidad.

Pirólisis

La pirólisis es una descomposición térmica que se produce en ausencia de oxígeno. Es también la primera etapa de los procesos de combustión y de la gasificación donde le sigue una oxidación total o parcial de los productos primos.

Una temperatura de proceso más baja y unos tiempos de residencia en vapor más largos favorecen la producción de carbón vegetal. Una temperatura elevada y un tiempo de estancia más largo aumentan la conversión de la biomasa en gas; por último, una temperatura moderada y un tiempo de residencia corto en vapor son óptimos para la producción de líquidos. La distribución de los productos obtenidos a partir de diferentes modos de procesos de pirólisis queda resumida en la tabla de más abajo. La pirólisis rápida para la producción de líquidos presenta actualmente un interés particular ya que los líquidos son transportables y almacenables.

Tabla 2: Rendimientos de productos típicos (a base de madera seca) obtenidos por diferentes modos de pirólisis de madera

Modo	Condiciones % en peso	Líquido	Carbón	Gas
Rápido	~ 500 °C, tiempo de residencia vapor corto ~ 1 s	75%	12%	13%
Intermedio	~ 500 °C, tiempo de residencia vapor caliente ~ 10-30 s	50%	25%	25%
Lento - Torrefacción	~ 290 °C, tiempo de residencia de sólidos ~ 30 min	-	82%	18%
Lento - Carbonización	~ 400 °C, tiempo de residencia vapor largo h -> días	30%	35%	35%
Gasificación	~ 800 °C	5%	10%	85%

El principio de la pirólisis rápida puede ponerse en aplicación en diferentes tipos de reactores. Se produce en unos segundos o menos. Por consiguiente, no solamente la cinética de las reacciones químicas, sino también los procesos de transferencia del calor y de masa, así como los fenómenos de transición de fase, juegan un papel importante. El problema crítico es llevar la partícula de biomasa que reacciona a la temperatura óptima del proceso y minimizar su exposición a las temperaturas intermedias (inferiores) que favorecen la formación de carbón vegetal. Este objetivo puede alcanzarse utilizando pequeñas partículas, por ejemplo en los procesos de lecho fluidizado. Otra posibilidad consiste en transferir el calor muy rápidamente únicamente a la superficie de las partículas que entran en contacto con la fuente de calor.

En pirólisis rápida, la biomasa se descompone para generar principalmente vapores, aerosoles y carbón vegetal. Después del enfriado y la condensación, se forma un líquido móvil marrón oscuro que tiene un poder calorífico de alrededor de la mitad del fuel convencional. Aunque esté vinculada a los procesos de pirólisis tradicionales para la fabricación de carbón vegetal, la pirólisis rápida es un proceso avanzado, con parámetros cuidadosamente controlados para dar elevados rendimientos de líquido. Las características esenciales de un proceso de pirólisis rápida para producir líquidos son:

- Calentamiento y porcentaje de transferencia de calor muy elevados en la interfaz de reacción, lo que necesita generalmente una alimentación en biomasa finamente triturada,
- Temperatura de reacción de pirólisis cuidadosamente controlada de alrededor 500 °C y temperatura de fase vapor de 400 a 450 °C,
- Tiempos de residencia en vapor cortos generalmente inferiores a 2 segundos,
- Enfriamiento rápido de vapores de pirólisis para dar el producto bioaceite.

El producto principal, el bioaceite, se obtiene con rendimientos pudiendo llegar hasta el 75% en peso en base de la alimentación en materia seca.

Además, los otros sub-productos (carbón vegetal y gas) son utilizados en el proceso para responder a las necesidades en calor de manera que no hay otro flujo de residuos que los gases de combustión y las cenizas.

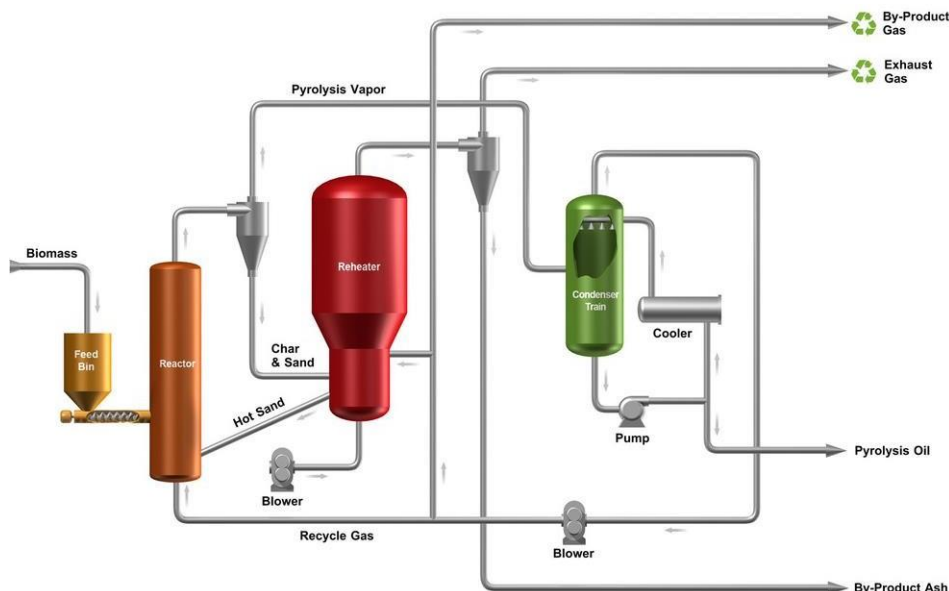


Figura 58: Esquema de proceso ENSYN

Un proceso de pirólisis rápida comprende el secado de la alimentación a menos de 10% de agua a fin de minimizar el agua en el aceite líquido producido (incluso hasta 15% puede ser aceptable), la trituración de la alimentación (a más o menos 2 mm en el caso de reactores de lecho fluidizado) para dar unas partículas lo suficientemente pequeñas que garanticen una reacción rápida, una reacción de pirólisis, una separación de sólidos (char), un temple y una recogida del producto líquido (bioaceite). Prácticamente toda forma de biomasa puede ser contemplada para una pirólisis rápida, aunque la mayoría de trabajos hayan sido efectuados en la madera debido a su consistencia y a su comparabilidad entre los tests,

En el centro de un proceso de pirólisis rápida se encuentra el reactor que representa alrededor del 10 al 15% del coste total de capital de un sistema integrado. La mayoría de actividades de investigación y desarrollo se han concentrado en el reactor, aunque se otorga una atención creciente al control y a la mejora de la calidad del líquido, incluido la mejora de la recogida.

El resto del proceso comprende la recepción, el almacenamiento y el mantenimiento de la biomasa, el secado y la trituración de la biomasa, la recogida, el almacenamiento y, si es necesario, la valorización de los productos.

Economía

Es difícil encontrar elementos económicos de este sector, especialmente en lo relacionado con los OPEX. A nivel de CAPEX, constatamos que la unidad construida en los Países Bajos representa una inversión de 19 000 000 €, para una producción cotidiana de 500 barriles de biocrudo más o menos, o sea 80 000 L/día, el equivalente a unos 23 000 tep/año.



Figura 59: Instalación de producción de Empyro [Pirólisis] en Hengelo (Pays Bas)

Principios de reactores conocidos

Existen hoy en día 6 grandes principios de reactores para la pirólisis (lista no exhaustiva) :

- El lecho fluidizado : de construcción bastante sencilla, la temperatura de reacción y el tiempo de residencia de los gases son controlables fácilmente. Garantiza una buena transferencia de calor a la biomasa por convección con el gas de fluidización y/o un material inerte para partículas del orden de 2-3 mm. El tiempo de residencia de las partículas sólidas depende de su tamaño y de la hidrodinámica del reactor.
- El lecho de combustible en polvo : Permite tratar cantidades más importantes: 20 kg/h en VTT, (Finlandia) hasta 1,5 t/h para Dynamotive (Canada). El carbón producido durante la reacción de pirólisis y la arena son transportados a un segundo reactor donde se quema el carbón y se calienta la arena. En tal reactor, los tiempos de residencia del carbón, los vapores y los gases son idénticos. La hidrodinámica sigue siendo compleja; el tamaño de las partículas es de varios centímetros.
- La pirólisis ablativa: puesta a punto por Lédé (de disco rotatorio, «spinning disk») y Diebold (hilo caliente, «hot wire»), el calor es transferido a la partícula por contacto directo con una superficie caliente móvil. Podemos, pues, utilizar partículas mayores que son prensadas contra una superficie caliente (proceso en desarrollo por la empresa Pytec en Alemania). La velocidad del fenómeno de ablación depende de la presión ejercida sobre la partícula, de la temperatura de pared y de la velocidad relativa entre la partícula y la superficie caliente. El ciclón funciona según este principio, produciendo mayoritariamente líquidos o gases según las condiciones operatorias. Además, el reactor Vortex permite maximizar la producción de vapores de pirólisis que son fracturadas a continuación.
- El reactor de cono rotatorio, «rotating cone», (inventado en la universidad de Twente, Países Bajos): su principio está próximo al lecho de combustible en polvo. Las partículas son dirigidas fuera del reactor por la fuerza centrífuga creada por la rotación del reactor cónico de pirólisis. El carbón es quemado en un segundo lecho y la arena reciclada por un "riser". La empresa BTG ha desarrollado una instalación que trata 200 kg/h de biomasa.
- El reactor de «doble tornillo sin fin» (puesto a punto por Lurgi): es utilizado en el centro de investigación de Karlsruhe (Alemania). La biomasa (partículas de algunos cms) está mezclada con arena caliente (550°C) con una relación arena/biomasa comprendida entre 5 y 20. Todo ello es empujado por dos tornillos sin fin cuyo paso se alterna. La arena se separa del carbón y es reciclada. El caudal máximo de biomasa tratada es de 10 kg/h.

- La pirólisis al vacío: la biomasa es transportada sobre placas calientes situadas en un reactor al vacío (20 kPa). Es mezclada y conducida hacia el exterior por un sistema de rastrillos. Los vapores son evacuados directamente, no sufren reacción de craqueo. Este proceso Pyrovac (capacidad: 3 t/h) ha sido desarrollado por unos canadienses de la Universidad de Laval aunque la instalación de producción de aceites ha dejado de funcionar.

Algunas ventajas del proceso de pirólisis: utiliza la biomasa entera, no hay sub-producto CO₂ como sucede con la fermentación, no es necesario desarrollar enzimas costosas u otros micro-organismos exóticos y se evitan los problemas con la intensificación de la fermentación.

Algunos inconvenientes: El bioaceite no puede utilizarse como carburante de transporte. Sin embargo, puede ser transformado en un aceite estable a través de un proceso conocido con el nombre de hidrotratamiento, que extrae el oxígeno durante una reacción con el hidrógeno que produce agua pura como sub-producto. Es un proceso utilizado en la industria petroquímica, y ha sido utilizado con éxito para eliminar el exceso de oxígeno de residuos orgánicos y aceites vegetales para convertirlos en diesel y en carboreactor.

Tabla 3: Resumen de las tecnologías de pirólisis (Fuente IEAbioenergy)

Propriété	Statut	Rendement bio-huile sur biomasse sèche	Complexité	Spécification de la taille du flux	Besoins en gaz inerte	Taille spécifique du réacteur	Qualité du gaz
Lit fluide	Commercial	75% en poids	Moyen	Haute	Haute	Moyen	Faible
CFB et lit transporté	Commercial	75% en poids	Haute	Haute	Haute	Moyen	Faible
Cône rotatif	Commercial	70% en poids	Haute	Haute	Faible	Faible	Haute
Écoulement entraîné	Laboratoire	60% en poids	Moyen	Haute	Haute	Moyen	Faible
Ablatif	Laboratoire	75% en poids	Haute	Faible	Faible	Faible	Haute
Vis ou vis sans fin	Manifestation	60% en poids	Moyen	Moyen	Faible	Faible	Haute

Comercial	2 t / h - 20 t / h
Manifestación	200-2000 kg / h
Laboratorio	1-20 kg / h

Ejemplo de unidades en funcionamiento



Tabla 4: Ejemplos de unidades de pirólisis (Fuente: ETIP)

Operator:	Twence Hengelo, Netherlands Fast pyrolysis
Application:	Heat and power production
El. power:	2200 MWh annually
Pyrolysis oil:	3200 kg/h
Technology:	Rotating cone reactor
Fuels:	Wood chips, bagasse, empty fruit bunch etc.

Operator:	Fortum Joensuu, Finland Fast pyrolysis
Application:	Heat and power production
El. power:	52 MW _{el}
Thermal capacity:	180 MW _{th}
Pyrolysis oil:	6300 kg/h
Technology:	Fluidized bed

Operator:	KIT Karlsruhe Intitut für Technologie Karlsruhe, Germany Fast pyrolysis
Application:	Biocrude and syngas for transportation fuel production
El. power:	-
Thermal capacity:	5 MW _{th}
Pyrolysis oil:	500 kg/h
Technology:	Bioliq: Twin-screw reactor

Gasificación

Como para la técnica de pirólisis, existen 2 variantes de gasificación:

- La gasificación de matrices sólidas (secas),
- La gasificación de matrices húmedas (o vaporización hidrotermal).

Gasificación de biomasa sólida (o a menudo Pirogasificación)

Principio

La gasificación es una descomposición térmica completa de partículas de biomasa en un gas combustible, de volátiles y de cenizas en un reactor cerrado (gasificador) en presencia de todo oxidante proveniente del exterior (aire, O_2 , H_2O , CO_2 , etc.) siempre y cuando la relación equivalente (ER) es <1 .

ER = 1 si la cantidad estequiométrica de agente oxidante está presente. La cantidad estequiométrica es la cantidad teórica de aire o de todo otro agente oxidante necesario para quemar completamente el carburante.

La gasificación es una etapa intermedia entre la pirólisis y la combustión. Se trata de un proceso endotérmico en dos etapas, es por ello que se habla de pirogasificación. Durante la primera etapa, los compuestos volátiles del carburante son vaporizados con temperaturas inferiores a $600^{\circ}C$ por un conjunto de reacciones complejas. Ningún oxígeno es necesario en esta fase del proceso.

Los gases de hidrocarburos, el hidrógeno, el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, el alquitrán y el vapor de agua se incluyen en los vapores volátiles. El carbón (carbono fijo) y las cenizas son los subproductos del proceso que no son vaporizados. En la segunda etapa, el carbón es gasificado por las reacciones con el oxígeno, el vapor y el hidrógeno. Una parte del carbón no quemado es quemado para liberar el calor necesario a las reacciones de gasificación endotérmica.

Los productos de gasificación, su composición y su cantidad están muy influenciados por el agente de gasificación, la temperatura, la presión, la velocidad de calentamiento y las características del combustible (composición, contenido de agua, granulometría). Los productos gaseosos formados durante la gasificación además pueden utilizarse para el calentamiento o la producción de electricidad. Los principales compuestos gaseosos son el CO , el CO_2 , el H_2O , el H_2 , el CH_4 y otros hidrocarburos. Las principales reacciones químicas encontradas en este proceso se presentan en la Tabla 5.



Tabla 5: Principales reacciones aparecidas durante la gasificación

Primary devolatilization				
		Primary tar (CH _x O _y)		
Biomass	→	CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , H ₂ O		[eq. 1]
		Carbon		
Tar cracking and reforming				
		Secondary tar		
Primary tar	→	CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , H ₂		[eq. 2]
Homogenous gas-phase-reactions		ΔH		
Secondary tars	→	C, CO, H ₂		[eq. 3]
H ₂ + 0,5 O ₂	→	H ₂ O	-242 kJ/mol	H ₂ – Combustion (oxidation) [eq. 4]
CO + 0,5 O ₂	→	CO ₂	-283 kJ/mol	CO - Combustion (oxidation) [eq. 5]
CH ₄ + 0,5 O ₂	→	CO + 2 H ₂	-110 kJ/mol	CH ₄ - Combustion (oxidation) [eq. 6]
CH ₄ + CO ₂	→	2 CO + 2 H ₂	+247 kJ/mol	Dry reforming reaction [eq. 7]
CH ₄ + H ₂ O	→	CO + 3 H ₂	+206 kJ/mol	Steam reforming methanisation [eq. 8]
CO + H ₂ O	→	CO ₂ + H ₂	-40,9 kJ/mol	Water-gas-shift reaction [eq. 9]
Heterogenous reactions				
C + O ₂	→	CO ₂	-393,5 kJ/mol	Partial carbon oxidation [eq. 10]
C + 0,5 O ₂	→	CO	-123,1 kJ/mol	Boudouard equilibrium [eq. 11]
C + CO ₂	→	2 CO	+159,9 kJ/mol	Water gas reaction (steam reforming) [eq. 12]
C + H ₂ O	→	CO + H ₂	+118,5 kJ/mol	Steam reforming [eq. 13]
C + 2 H ₂	→	CH ₄	-87,5 kJ/mol	Methane production (hydrogasification) [eq. 14]

La gasificación de desechos sólidos es la técnica más frecuente hoy en día. Consiste en calentarlos a temperaturas más importantes que la pirólisis, es decir comprendidas generalmente entre 900 y 1 200 °C en presencia de una débil cantidad de oxígeno. Al margen de la fracción mineral del desecho y de una pequeña cantidad de carbono fijo no convertido que constituyen el residuo sólido, el conjunto del desecho es convertido así en un gas que se llama gas de síntesis (llamado también sintegás). Cuando la reacción de gasificación es realizada a presión atmosférica, el gas de síntesis está en general constituido principalmente de CO y H₂ y algunos por cientos de CH₄. Según los procesos, contiene también una proporción mayor o menor de dióxido de carbono (CO₂) y de azote (N₂). Contiene también una débil cantidad de cadenas hidrocarbonadas largas llamadas alquitranes, de los cuales es necesario eliminar el gas para algunas aplicaciones tales como la utilización en motores de gas o la conversión química del sintegás en metano o mezcla de hidrocarburos.

Tabla 6: Número y grados de desarrollo de procesos de gasificación, por tecnología

Technologie	Concepteur	Pression opératoire	Utilisation du gaz de synthèse	Degré de développement	Capacité (t/jour de déchets traités)
Lit fluidisé bouillonnant	Advanced Plasma Power	19 à 31 Bars	Electricité	Pilote	1,8
	Enerkem	5 Bars	Méthanol, éthanol	Démonstrateur	40-45
Lit fluidisé circulant	Envirotherm	<1,5 Bar	- Fours de cimenteries ou chaudières	Industriel	500
	Milena (Energy Research Center of The Netherlands)	n.r	- Moteurs ou turbines à gaz	Pilote	3,8
	Rentech	Atmosphérique	- Chaleur + électricité	Démonstrateur (arrêté)	350
Lit fluidisé stationnaire	Kopf	n.r	Electricité	Démonstrateur	7
Lit fixe	Wartsila (Novel)	n.r	Combustible moteurs	Pilote	n.r
	Xylowatt	Atmosphérique		Pilote	0,8
Lit circulant	Alter-NRG	n.r	Electricité + chaleur ou éthanol	Industriel	40
	Ecoloop			Démonstrateur (en construction)	115
Four Tournant	Basse Sambre	Atmosphérique	Electricité + chaleur Substitution énergétique en procédé industriel	Industriel Démonstrateur (en projet)	34

Mercado

Como veremos más adelante, el sintegás producido puede valorizarse de diversas maneras. La tecnología de gasificación está adaptada según los entrantes que deben tratarse y, si hasta hoy las unidades funcionan a menudo en cogeneración, la tendencia general se orienta hacia la producción de gas renovable (SNG). El gráfico de abajo ilustra el posicionamiento de algunos constructores en estos dos ejes (tipos de entrantes en abscisas, tipo de valorización del sintegás en ordenadas).


Figura 60: Presentación gráfica del posicionamiento de entrantes admisibles / valorización de proveedores del sector - Fuente REGATECH, Presentación de ENGIE (Olivier Guerrini)

La mayoría de proveedores que proponen este tipo de soluciones están a nivel de piloto o de demostrador.



Figura 61: Reparto de las unidades de gasificación (al margen de la cogeneración) - fuente :
<https://demoplants.bioenergy2020.eu/>

Tabla 7: Lista de las unidades de gasificación (al margen de la cogeneración) – fuente:
<https://demoplants.bioenergy2020.eu/>

Owner	Name	Location
Advanced Plasma Power Ltd	BioSNG pilot plant	United Kingdom
BioTfuel-consortium	BioTfuel pilot	France
Cutec	Synthesis Cutec Clausthal-Zellerfeld	Germany
ECN	MILENA Gasifier	Netherlands
Enerkem	Synthesis Enerkem Sherbrooke	Canada
Enerkem	Westbury commercial demonstration facility	Canada
GTI Gas Technology Institute	GTI gasifier Des Plaines	United States
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)	bioliq	Germany

Owner	Name	Location
Sunshine Kaidi	pilot Wuhan	China
Tembec Chemical Group	Synthesis Tembec Chemical Quebec	Canada
ThermoChem Recovery International (TRI)	Fully Integrated BioRefinery	United States
TNO	Ambigo	Netherlands
TUBITAK	TRIJEN (Liquid Fuel Production From Biomass and Coal Blends)	Turkey
Vanerco (Enerkem & Greenfield Ethanol)	Varennnes Cellulosic Ethanol	Canada
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd	Pressurized FB for synthesis gas production	Finland
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd	Dual fluidized-bed steam gasification pilot plant	Finland
West Biofuels	LLC Thermal Reformer Synthesis West BiofuelsWoodland , CA	United States

Las unidades en funcionamiento en Francia

La pirogasificación sigue despertando interés en Francia con varios proyectos de I&D. Las unidades identificadas y mencionadas más abajo son unidades industriales alimentadas por los desechos (de los cuales una parte de origen biomasa).

- EQIOM en Rochefort-sur-Nénon (21), trata los lodos metálicos con un horno NESA. Los residuos metálicos entran en la composición del «crudo» del horno de cemento, el gas es alimentado en inyector. Puesta en servicio: 2000.
- El piloto CHO POWER en Morcenx (40), alimentado en madera y astillas, y DAE (máx 20 %) ; producción electricidad y calor. Puesta en servicio: 2014
- El piloto Alpha-Recyclage en Brévan (39), pirólisis de neumáticos. Puesta en servicio: 2017.
- El demostrador Bonnefoy en Villers-sous-Montrond (25), que utiliza un proceso de gasificación de LLT (Leroux & Lotz), alimentado en madera B y astillas, producción electricidad y calor y CSR (20 % máx); producción electricidad y calor.

Debemos destacar que las empresas Leroux & Lotz y CHO POWER (grupo PINAULT) son actores dinámicos de este sector con numerosos proyectos en montaje.



Figura 62: Instalación XYLOWATT

Otra ilustración de este interés por la pirogasificación: la creación en 2014 del Club Pirogasificación que cuenta actualmente más de cincuenta miembros, y reagrupa la casi totalidad de los instaladores franceses del ámbito, pero también algunos energetistas, los principales actores del mundo de los desechos, numerosos grandes consumidores de energía, los operadores de redes de gas, las empresas proyectistas, los laboratorios de investigación, etc.

Los proyectos Europeos

Demostración de Gas Natural Sintético (SNG) en Güssing

La fábrica de cogeneración de biomasa de Güssing, que empezó a funcionar en 2002, tiene una capacidad de combustible de 8 MW_{th} y una potencia eléctrica de alrededor de 2 MW_{el} con una eficacia eléctrica del 25% más o menos. Las virutas de madera con un contenido de agua del 20 al 30% son utilizadas como combustible. La fábrica se compone de un gasificador de vapor de lecho fluidizado doble, de un sistema de depuración de gases de dos plantas, de un motor de gas con un generador eléctrico y de un sistema de utilización del calor, ofreciendo así una demostración completa de la cadena de valor de la biomasa leñosa en SNG.

La etapa final de conversión comprende tres etapas individuales: el acondicionamiento del gas, la síntesis del SNG y la valorización del gas. Los trabajos de I&D en los 8 primeros años en Güssing han tratado sobre el acondicionamiento de gas y la síntesis de SNG. La escala piloto ha demostrado que la síntesis de SNG en lecho fluidizado es posible. El conjunto de la cadena de proceso alcanza rendimientos de conversión elevados y presenta un potencial de inversión y de costes de explotación inferiores a los de la tecnología de síntesis SNG convencional.

Proyecto de demostración de Gaya

El proyecto de demostración de Gaya, avanzadilla de ENGIE, apoyado por la CE, quiere demostrar una vía comercial para la gasificación y la metanación de los residuos (por ejemplo madera, paja) para producir biometano sintético a escala industrial.

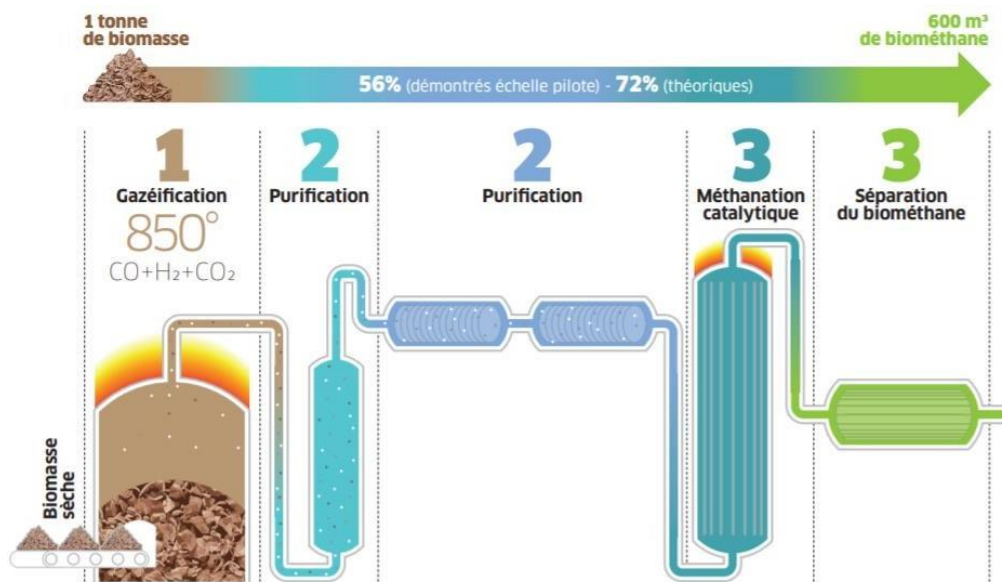


Figura 63: Proceso puesto en aplicación por el proyecto GAYA (ENGIE)

Dong Pyroneer Plant, Dinamarca

DONG Energy (convertido en ORSTED al parecer) ha desarrollado la tecnología de gasificación Pyroneer, que utiliza la tecnología de lecho fluidizado de circulación, que convierte la biomasa en gas a temperatura relativamente baja. En 2011, estableció una fábrica de demostración de 6 MW adyacente a la central eléctrica de Asnæs cerca de Kalundborg. La fábrica de demostración Pyroneer ha suministrado tests y demostraciones sobre cómo la biomasa de débil valor y difícil puede ser gasificada.

Fábricas de gasificación de desechos en energía en el Reino Unido:

Birmingham Bio Power Plant y Hoddesdon

Una fábrica de gasificación de la biomasa de 10,3 MW en Tyseley, en el Reino Unido ha sido desarrollada por Carbonarius, una joint-venture entre O-Gen UK y UNA Group, con una inversión de 47,8 millones de libras esterlinas por el UK Green Investment Bank y el Foresight Group. La fábrica fue puesta en servicio en 2016 et desde esa fecha, un segundo proyecto ha nacido en el Reino Unido (Welland Waste Wood Power).

Gasificación de desechos en energía Lahti, Finlandia

El gasificador de desechos térmico de 160 MW en Lahti, en Finlandia, utiliza CSR (Combustible Sólido de Recuperación) como materia prima. Se trata principalmente de textiles triturados, de madera, de papel, de cartón y de plástico, etc. que de otra manera se verían destinados a los vertederos. El gas es enfriado y limpiado antes de ser enviado a la caldera.

Cortus WoodRoll® Technology Suecia

Cortus ha construido una fábrica de producción integrada donde el secado, la pirólisis y la gasificación de diferentes biocarburantes son ejecutados a escala de 500 kW. En febrero del 2012, se anunció que la fábrica había logrado producir gas de síntesis a partir de biomasa libre de hidrocarburos. Este «avance» facilita el uso del gas de síntesis para una producción de carburante más rentable.

Tras el éxito de estos ensayos, el objetivo fue construir una fábrica de demostración diez veces mayor en Höganäs. Terminada en junio del 2018, Cortus anunció en marzo del 2020 la producción del primer gas sintético ultrapuro a escala industrial, proveniente de su nueva fábrica de gasificación de la biomasa en Höganäs.

BioProGReSS - Soluciones del reformado del gas de los productos de biomasa (BESTF)

BioProGReSS es un proyecto de 5,3 millones de euros durante 3 años. El objetivo es desarrollar, poner en aplicación y demostrar una limpieza avanzada del gas de síntesis basada en un reformado en un ciclo químico en una fábrica piloto y una fábrica de bioSNG a escala industrial. Además, una nueva técnica de medición desarrollada en TU Berlin será probada y puesta en aplicación a fin de vigilar y controlar el proceso de gasificación.

Esta nueva técnica de medición del alquitrán en línea está basada en los diodos electroluminiscentes (LED) para la espectroscopia de fluorescencia. En diciembre del 2016, fue instalada en la fábrica Gobigas de Göteborg. Gracias a ello, es posible medir los cambios en el nivel de alquitranes detectados y también si hay un cambio hacia alquitranes más pesados o más ligeros durante el funcionamiento. Este avance técnico tiene el potencial de revolucionar la vigilancia y el control de los procesos de gasificación de la biomasa en el mundo entero.

Proyecto Bio-SNG (FP6)

Demostración de la producción y de la utilización de gas natural sintético (SNG) a partir de biocombustibles sólidos (Bio-SNG).

El objetivo del proyecto Bio-SNG (2006-2009) era demostrar la producción de SNG (Gas Natural Sintético) a partir de biocombustibles sólidos e integrar este Bio-SNG en infraestructuras energéticas existentes (p.e.: las gasolineras para vehículos, las redes de gas natural).

Se ha demostrado que el conjunto de la cadena del procesos (de la madera al Bio-SNG) es realizable y que responde a las exigencias en términos de eficacia. Esta tecnología puede aplicarse en la industria de la energía para la producción de combustibles sostenibles sustituyéndose a los combustibles fósiles. El usuario potencial interesado por esta tecnología es el sector de la energía, en particular la industria de gas natural (distribuidores). Dado que la Unión Europea ha decidido reemplazar parcialmente los combustibles fósiles, esta tecnología puede cubrir parte de esta brecha. La tecnología todavía no está completamente madura, pero un primer pequeño proyecto industrial permitirá a la tecnología alcanzar su madurez. Dicho proyecto está planificándose.

Con el fin de hacer funcionar el catalizador del proceso, el gas de síntesis debe ser purificado en gran medida de azufre. Una etapa de tratamiento ha sido desarrollada con el fin de eliminar los alquitranes que contienen azufre en una medida aún desconocida con ayuda de solventes biogénicos regenerables. Tal proceso puede ser aplicado no solamente para la producción de Bio-SNG sino también para otros gases de síntesis (por ejemplo a partir del carbón) o para otros procesos posteriores (por ejemplo Fischer Tropsch).

Proyecto E.ON Bio2G

El proyecto E.ON Bio2G en Suecia implicaba el diseño, la construcción y la puesta en servicio de una fábrica de gasificación de una potencia de 200 MW. La puesta en servicio estaba prevista para el 2015 en espera de la aprobación de la planificación.

KIT DemoSNG Technology

El Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT), en Alemania, desarrolló una nueva tecnología evolutiva utilizando un catalizador de níquel de panal para producir metano y agua a partir de dióxido de carbono, de monóxido de carbono y de hidrógeno. El sistema «DemoSNG» ha sido probado en una fábrica de gasificación de biomasa en Köping, en Suecia.

Tecnología de gasificación Concord Blue / Blue Tower

En Alemania, Blue Tower (Concord Blue) desarrolla una tecnología de gasificación para convertir una amplia gama de desechos en energía a través de un sistema de gasificación con una eficacia que puede alcanzar el 80%.

El proyecto ECN / HVC para BioSNG

ECN desarrolló un sistema para la conversión de la biomasa lignocelulósica seca en gas de calidad de gas natural: BioSNG o gas natural de sustitución a partir de la biomasa. Las decisiones tecnológicas se han basado en el deseo de disponer de fábricas BioSNG a gran escala de alta eficacia global. El concepto ECN está basado en lo que se llama la gasificación indirecta MILENA y la eliminación del alquitrán OLGA.

El concepto ECN ofrece una eficacia del 70% de la biomasa en BioSNG. Un sistema a escala de laboratorio está disponible en ECN. Un sistema piloto de 1 MW en ECN está poniéndose en servicio para las dos partes principales del sistema: el gasificador MILENA y la eliminación del alquitrán OLGA. HVC es una empresa de gestión de desechos que extiende sus actividades a las energías renovables. Unirse al desarrollo del concepto BioSNG se inscribe perfectamente en las ambiciones de HVC a medio y largo plazo. HVC tiene la intención de realizar dos fábricas de demostración para mostrar el concepto ECN.

La primera fábrica de demostración será una central de cogeneración de ~ 10 MW para demostrar la combinación de los procesos MILENA y OLGA. La segunda fábrica de demostración será una central SNG de ~ 50 MW en la que MILENA y OLGA serán puestas a escala y otras depuraciones y metanizaciones de gas serán añadidas. Estas unidades suplementarias serán suministradas por un gran EPC, que estará pronto implicado en el desarrollo.

Referencias cifradas

El estudio 100% gas verde en 2050 muestra una tabla de los proyectos de los que han sido comunicadas algunas cifras de manera pública. Estas cifras conciernen:

- Los insumos así pues la cantidad de energía en entrada,
- La cantidad de energía producida,
- Las inversiones.

Estos datos permiten apreciar un rendimiento teórico (57-71%) de las unidades y una inversión específica por unidad de potencia instalada (623 a 8 212 €/ kW CH₄ instalados).



Tabla 8: Lista de los proyectos de gasificación de los que se disponen algunos datos cifrados.
Fuente: SOLAGRO

Site	Source	Pu in	Pu out	Pu out PCS	rend PCI	Invest	Invest. spé.
		MW _{PCI}	MW _{PCI}	MW _{PCS}	MW _{PCI}	M€	€/kW _{CH4 PCS}
Gobigas	1	32	20	22	63%	168	7 565
EON Sweden	1	345	200	222	58%	473	2 128
Vetaani. VTT Finland	1	100	60	67	60%	120	1 801
NNFFC/E4 Tech 2010	1	41	27	30	66%	68	2 260
NNFFC/E4 Tech 2010	1	135	88	98	65%	148	1 518
Taylor. BMBF Verbundproject	1	60	34	38	57%	53	1 415
Värnamo. BMBF Verbundproject	1	60	36	40	60%	74	1 856
ECN report E-06-018 2006	1	100	67	74	67%	102	1 374
ECN report E-06-018 2007	1	1000	670	744	67%	464	623
ECN, IGRC paper Seul 2011	1	1000	670	744	67%	525	706
Bio-SNG feasibility study NEPIC,..	1	50	33	37	66%	97	2 644
Bio-SNG feasibility study NEPIC,..	1	300	195	217	65%	272	1 256
Agnion Heatpipe	1	1,4	1	1	71%	4	3 746
Bluetower	1	31	20	22	65%	72	3 227
Cortus Woodroll	1	31	20	22	65%	58	2 598
GoGreenGas	2	4,6	2,9	3	63%	26,45	8 212
GoGreenGas futur1	2	66	42	47	64%	124	2 663
GoGreenGas futur2	2	132	84	93	64%	174	1 861
ECN 2016	3	100	69,1	77	69%	231	3 010

Sources : (1) ²²⁹, (2) ²³⁰, (3) ²³¹

²²⁹ DGC, « Bio-SNG and RE-gases Detailed analysis of bio-SNG technologies and other RE-gases ».

²³⁰ gogreengas, « FIRST PROJECT PROGRESS REPORT ».

²³¹ ECN et Hyet, « Co-production of green, high quality hydrogen and bio SNG using electrochemical hydrogen compression ».

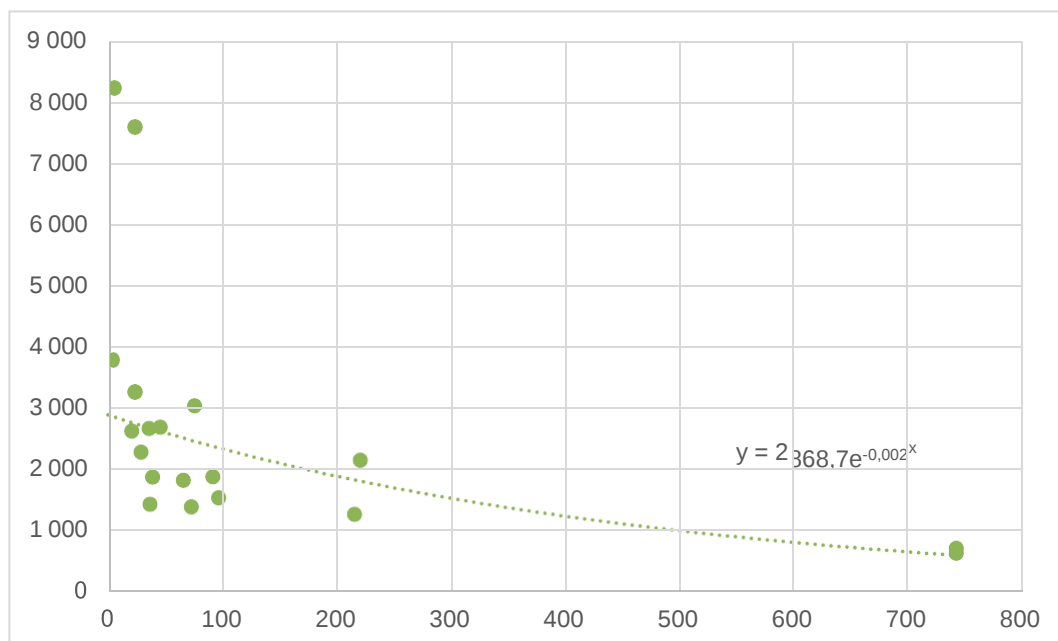


Figura 64: Ilustración de las tablas precedentes con curva de tendencia

Gasificación hidrotermal

La tecnología de gasificación hidrotermal (o vaporización hidrotermal) es un derivado de la licuefacción hidrotermal. Esta tecnología está desarrollándose y llegará a madurez para un despliegue industrial¹² entre 2023-2025.



Figura 65: Esquema de principio (Fuente: SCW Systems)

El reactor es llevado a unos 400°C y con presión (>220 bars) a fin de alcanzar el estado supercrítico del agua que favorece la extracción de materias carbonadas.

Principio

La gasificación hidrotermal se presenta como una alternativa a otras tecnologías de conversión en gas renovable para tratar la biomasa líquida. De hecho, permite una tasa de conversión en carbono muy alta (potencialmente superior al 90%) y alcanzar, para una biomasa líquida determinada, tasas de producción de metano superiores a las de otros procesos, tanto en la metanización (cuyas tasas de conversión de carbono están comprendidas normalmente entre el 40 y el 70%) como en la pirogasificación.

La gasificación hidrotermal aporta también un potencial suplementario de valorización para entrantes difícilmente tratables por otros métodos de conversión por razones de composición: licor negro por ejemplo, o entrantes que contienen ciertos contaminantes (por ejemplo micropartículas de plásticos que el proceso sería capaz también de convertir en gas). Además, el tiempo de residencia muy corto (de 1 a 10 minutos) de la gasificación hidrotermal permite tratar caudales importantes conservando una instalación compacta, dejando una huella de suelo limitada. El gas de síntesis producido está disponible a presión elevada, lo que permite contemplar después de su depuración y sin necesidad de compresión, una inyección directa en la red de transporte de gas. Es posible contemplar la alimentación directa de una estación de bioGNV a proximidad de una instalación de gasificación hidrotermal, limitando la energía necesaria a la compresión del carburante (distribución del GNV a 200 bars).

El proceso permite también extraer las sales minerales y el amonio presentes en el entrante que, una vez separados, podrán ser valorizados en forma de fertilizantes por ejemplo. Por último, la gasificación hidrotermal restituye un agua clara compatible para un vertido en el medio natural después de desnitrificación y filtración de carbono.

Además de posicionarse como una alternativa posible, la gasificación hidrotermal puede integrarse en complemento posterior de una instalación de metanización. Instalando una unidad de

¹² Fuente: [Etude GRTgaz : Potentiel de la gazéification hydrothermale en France](#)

gasificación hidrotermal en salida de un metanizador, se puede contemplar el tratamiento de digestatos difícilmente o nada valorizables por razones de límite de superficies o prohibiciones de esparcido. Esta conversión suplementaria permitiría una producción adicional de gas para un mismo entrante inicial. Se evita así todo transporte de estos digestatos y aporta una solución alternativa a las eventuales prohibiciones (por ejemplo a causa de contenidos en metales pesados, micropartículas de plástico, tasa de azote demasiado importante). Además, la gasificación hidrotermal no solamente permite recuperar las sales minerales y el azote presentes en el digestato sino que también aporta la posibilidad de valorizarlos en forma de abonos separados, después de la transformación específica que permite su dosificación precisa.

Yacimientos potenciales

Varios grupos de entrantes responden a las características técnicas requeridas por la gasificación hidrotermal, especialmente:

- **Los lodos de las estaciones de depuración municipales e industriales:** estos lodos son generados por el tratamiento de aguas usadas municipales e industriales y pueden contener tasas elevadas de materias orgánicas. A nivel industrial, los lodos más interesantes se encuentran en los sectores de las industrias agroalimentarias (sectores lácteos, cárnicos, de bebidas, frutas y verduras) y las de papel y cartón, pero también en posteriores usos en algunas fábricas (petro) químicas y farmacéuticas.
- **Los digestatos de metanización:** son los coproductos líquidos y sólidos generados por la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos de origen agrícola, urbano e industrial. **Los efluentes de ganadería y avicultura (los purines y el estiércol):** provienen de las actividades ganaderas (bovinas, ovinas y porcinas) y de avicultura. Solamente se consideran los efluentes recuperados en los criaderos.
- **Los efluentes líquidos de origen agrícola:** se trata de todo tipo de desechos de biomasa líquidas que no son o lo son difícilmente valorizables por metanización y residuos (lixivias) provenientes del almacenamiento de recogida de vegetales o de sus desechos con una tasa de materia seca relativamente baja.
- **Los residuos y coproductos de las industrias agroalimentarias:** los procesos de las industrias agroalimentarias generan numerosos coproductos líquidos a fin de elaborar sus productos terminados. Podemos citar las materias orgánicas provenientes de los mataderos, el lactosuero de las industrias lecheras, los desechos de las industrias de transformación de frutas y verduras, los coproductos de transformación de la remolacha azucarera (pulpa y vinaza), los bagazos de cervecería, los coproductos de la industria vinícola (orujo y vinaza), los orujos de aceituna de la transformación oleícola, las materias residuales de la almidonería y de la feculería (pulpa y soluble de patata), etc.
- **Los efluentes y residuos industriales:** algunas industrias no agroalimentarias generan efluentes y residuos ricos en materia orgánica: los efluentes de la industria papelera (licor negro), los residuos de la producción de biodiesel (glicerina), los residuos de la producción de bioetanol (pulpa y vinasse de betterave), etc.
- **Los desechos orgánicos urbanos:** reagrupan los desechos generados por la actividad urbana (residuos tanto sólidos como líquidos) así como los desechos recogidos por las municipalidades, los residuos alimenticios de la restauración comercial y los desechos de los supermercados.

Los proyectos europeos en curso

Existen numerosos pilotos basados en este principio como se ve más abajo. Cabe destacar que el SIAAP (saneamiento de París y sus alrededores), que desea tomar esta vía, ha seleccionado 2 agrupaciones de empresas que desarrollan un proceso adaptado al yacimiento. Uno de estos procesos está ilustrado aquí en el CEAtch de Grenoble.

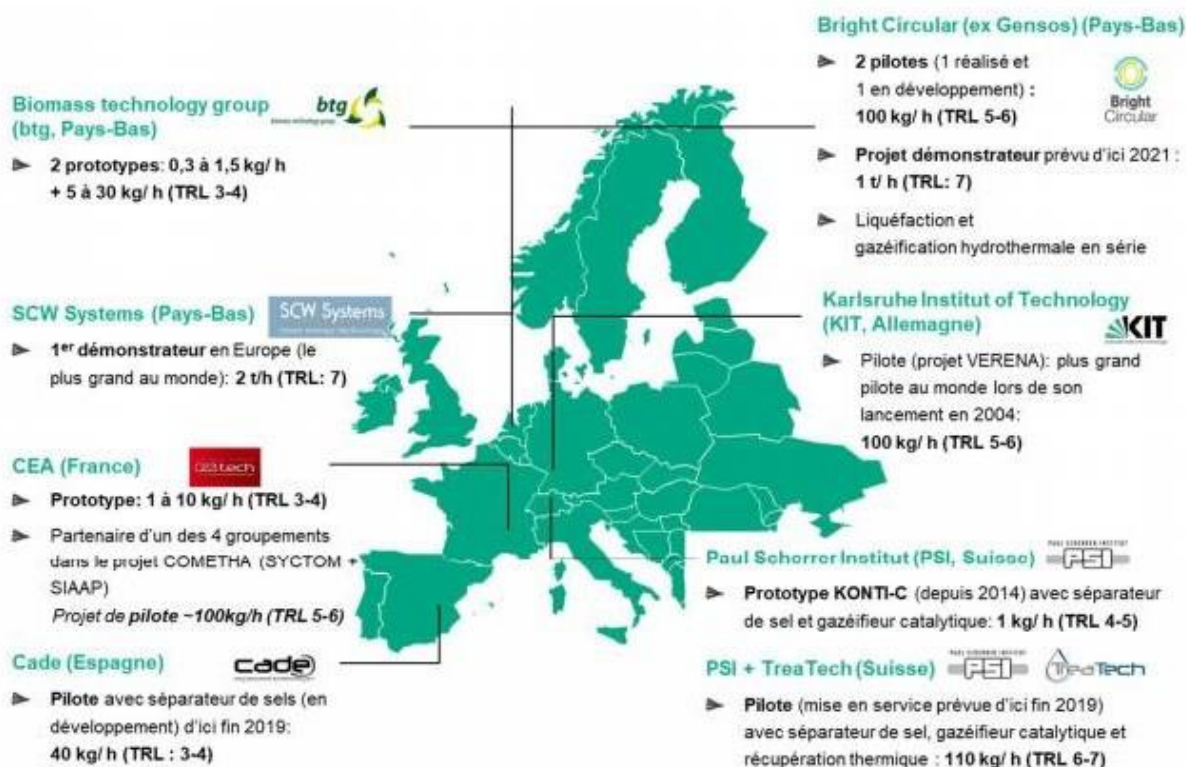


Figura 66: Pilotos de gasificación termal en Europa (Fuente: Estudio GRT)

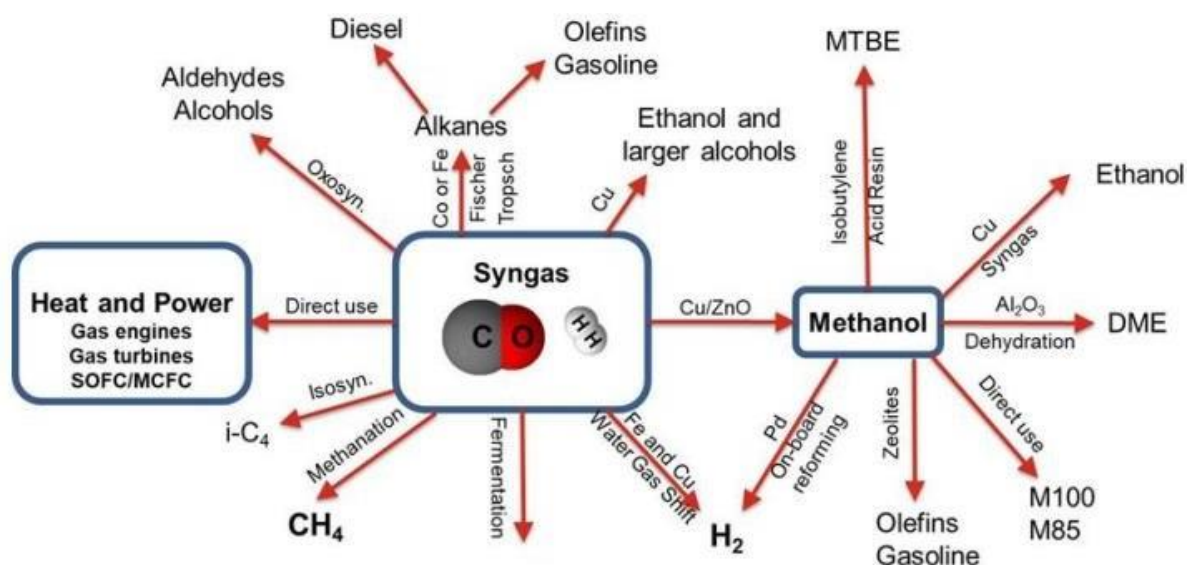
Un estudio reciente de GRT Gaz identifica un potencial de tratamiento de 100 millones de toneladas de efluentes líquidos de entre los 340 millones producidos anualmente en Francia. Así, un solo tratamiento de los efluentes de ganadería y avicultura, de los lodos de las estaciones depuradoras y los digestatos de metanización producirían para 2050 un volumen anual de gas renovable comprendido entre 58 y 138 TWh PCS, cifras que se acercan del consumo de gas esperado en ese mismo año, es decir, entre 280 y 360 TWh.

De manera general la tecnología está hoy a un nivel de TRL (Technology Readiness Level) de alrededor 7. El suizo Tretech empezó en 2019 un demostrador de una capacidad de 110kg/h. El mayor demostrador del mundo se sitúa en los Países Bajos y ha sido desarrollado por SCW Systems. Su capacidad de tratamiento es de 2 toneladas/hora. En Francia, el CEA Liten desarrolla un piloto de 100 kg/h en el marco del proyecto COMETHA con el Syctom y el SIAAP (gestión de desechos y de las depuradoras de París). Se estima que unos sitios basados en módulos con una capacidad de tratamiento entre 100 y 300 kg/h son una buena solución. Este tamaño permite de hecho aumentar la capacidad por un funcionamiento en paralelo, preferible a un aumento del volumen de los "batches" que implicaría unos sobrecostos importantes debido al espesor de los materiales tratados. Existen otros pilotos y demostradores en Europa, en España con Cade Soluciones (40 kg/h), los holandeses con Biomass Technology Group (30 kg/h) y con Bright Circular (100 kg/h). Los modelos de negocio todavía deben afinarse, pero podrían descansar sobre tres remuneraciones distintas: los servicios vinculados al tratamiento de desechos y residuos, la valorización del gas renovable y la valorización de otros compuestos en particular las sales minerales, el agua y el amoníaco. **¡Un sector naciente que debe seguirse de cerca!**



Valorización del sintegás

El sintegás producido puede, en teoría, ser valorizado a través de numerosas vías :



Adapted from Huber et al*

Figura 67: Tecnologías de conversión del sintegás

Purificación del sintegás

Según el sector de valorización contemplado, la purificación del sintegás es más o menos marcada, como se explica aquí debajo:

Tabla 9: Umbrales límites de impurezas contenidas en los sintegases

Final syngas application	Particles	Tar	Sulfur (H ₂ S, COS)	Nitrogen (HCN, NH ₃)	Alkali (primary K and Na)	Halides (primary HCl)
Gas engine	< 50	< 100	< 20	< 55	n.s	< 1
Gas turbine	< 5	< 10	< 20	< 50	< 0.2	< 1
Solid oxide fuel cell (SOFC)	< 1	to few hundred mg.Nm ⁻³	Few mg.Nm ⁻³		1	Few mg.Nm ⁻³
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	< 0.01	< 2000	< 0.1 (H ₂ S)	< 0.1 (HCN) < 1%vol (NH ₃)		< 0.1
Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)		< 100	< 1			
Methanol synthesis	< 0.02	< 0.1	< 1	< 0.1	< 0.2	< 0.1
Fischer-Tropsch synthesis (F-T)	< 0.5	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01	< 0.01

Unit: mg.Nm⁻³

Las técnicas de depuración son relativamente complejas y múltiples. No desarrollaremos aquí este punto pero es una etapa importante para que se garantice un buen funcionamiento del sistema de valorización del sintegás.

Calidad del sintegás producido por el gasificador

La calidad del sintegás producido está en función del sistema puesto en marcha pero sobre todo de los sustratos tratados (parte celulosa, hemicelulosa, lignina). En los proyectos de producción del SNG, el sintegás producido es generalmente enviado en metanación. Para ello, la relación H_2/CO_2 debe ser = 2 o bien $H_2/CO = 3$. Si uno de estos coeficientes no se alcanza, conviene movilizar el CO o CO_2 por otra parte a fin de maximizar la reacción de metanación y la movilización del dihidrógeno disponible en los sintegases.

Debe destacarse que los metanizadores de inyección son capaces de proporcionar el CO₂ casi puro en salida de depuración de biogás. En los proyectos en cogeneración, también es posible movilizar los humos del motor que deben ser entonces tratados para incorporarse al reactor de metanación.

Sectores frecuentes de valorización contemplados

Hasta hoy, el gas producido durante la gasificación (llamado sintegás) es valorizado normalmente en cogeneración, pero podría ser valorizado de numerosas maneras para la producción:

1. De carburantes, tras una síntesis en reactor Fischer Tropsch: La síntesis de Fischer- Tropsch (FT) está basada en la conversión de una mezcla de monóxido de carbono y el hidrógeno en hidrocarburos líquidos. Esta tecnología, un elemento clave de la tecnología del «gas to liquid», produce carburantes sintéticos y productos químicos a partir de la biomasa, del carbón o del gas natural. Además, dada la relación H_2 / CO en salida de gasificador, es necesario aportar H_2 por otro camino (electrólisis).

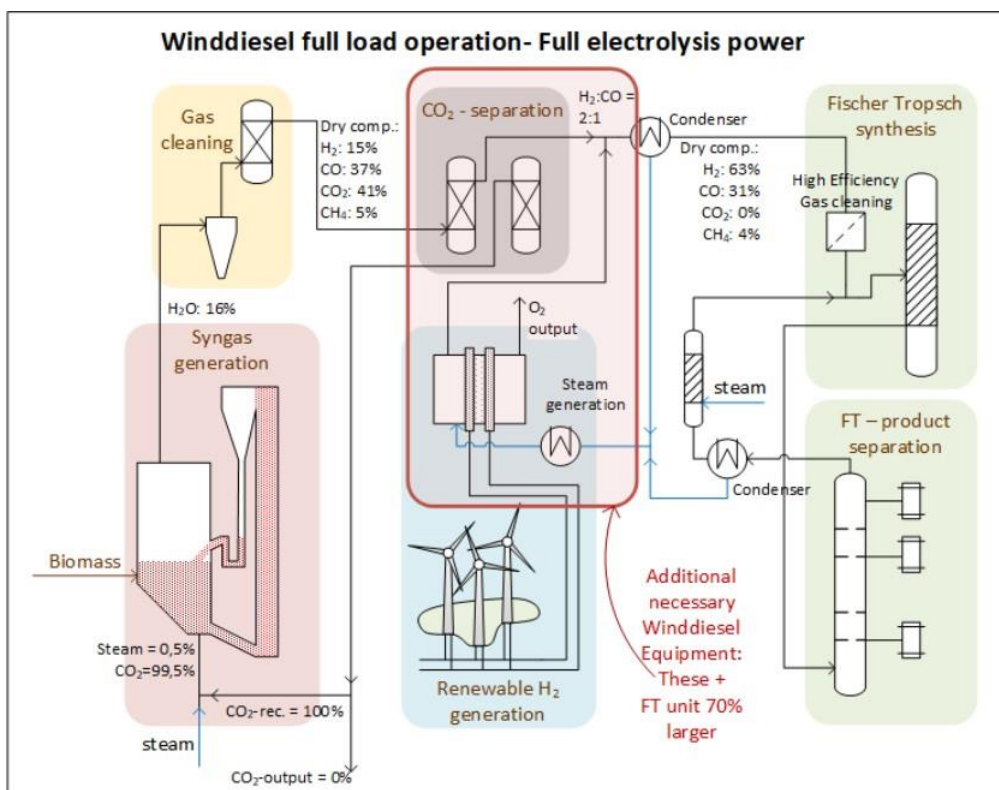


Figura 68: Principio propuesto por WINDDIESEL (Proyecto GOBIGAS – Suecia)

2. De hidrógeno: Se han hecho varios estudios sobre los métodos de producción de hidrógeno durante los últimos decenios. La biomasa es potencialmente una fuente de energía fiable para la producción de hidrógeno. Es renovable, fácil de uso y neutra en CO₂. Por consiguiente, está previsto que el proceso de gasificación de la biomasa estará disponible a gran escala para la producción de hidrógeno. El hidrógeno puede ser producido a partir del gas de gasificación por el reformado del vapor (eq 13 : Steam reforming) y las reacciones de desplazamientos agua-gas (eq 9 : water gas shift reaction). Utilizando un sistema de gasificación de lecho fluidizado doble adsorción de CO₂, con catalizadores apropiados, es posible obtener un rendimiento en hidrógeno de hasta el 70% en volumen.

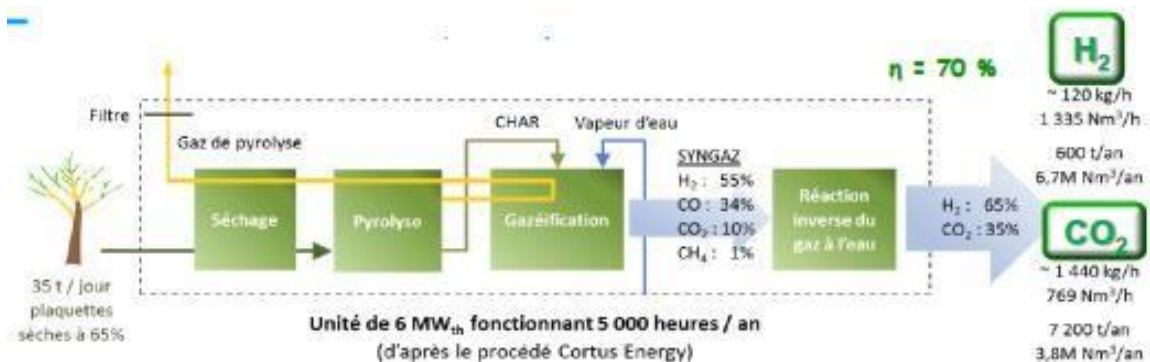
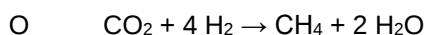
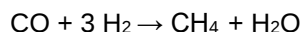


Figura 69: Principio contemplado en el proyecto WOOD-HY en las Landas (CCLA - ENGIE)

3. De etanol: Puede ser producido a partir de recursos fósiles o renovables y puede ser utilizado sea directamente en carburante de transporte o convertido en hidrocarburos (metanol en gasolina). Una primicia en Europa fue anunciada en marzo del 2019 en este sector con el proyecto W2C Rotterdam que deberá producir 220 000 t/año de etanol a partir de 360 000 t/año de desechos. Este proyecto ha sido llevado por un consorcio de empresas de renombre mundial incluyendo a Air Liquide, Nouryon (antes AkzoNobel Specialty Chemicals), Enerkem y el puerto de Rotterdam, Shell será el primer centro europeo de tratamiento de desechos de alta tecnología - Instalación de productos químicos.
4. De BIO-SNG: El gas natural producido a partir de carbón o de la biomasa se llama «gas natural sintético» o «Gas natural de sustitución» (SNG). Normalmente está presente en pequeñas cantidades en el sintegás pero los otros gases (CO₂, H₂ y CO) pueden ser enviados en metanación para reformar el CH₄. El catalizador típico para la metanación es el níquel y la reacción principal es:



Los catalizadores a base de Ni están también activos en la transferencia agua-gas y la hidratación de los hidrocarburos superiores como las olefinas. Normalmente, una relación H₂/CO de 3 es necesaria, lo que se obtiene en un reactor de agua y gas antes de la metanación. La metanación puede hacerse a presión atmosférica, aunque la termodinámica es más elevada en presión. Los catalizadores a base de Ni son sensibles a la intoxicación del azufre, el tratamiento de los gases antes de la metanización es bastante importante y los compuestos azufrados deben

ser eliminados por debajo de 0,1 ppm. Casi todos los gasificadores de biomasa (a excepción de los procesos de flujo de arrastre de combustible a alta temperatura) contienen metano en el gas producido, en función de la temperatura de funcionamiento. Como el metano no ha de ser convertido en metanación, un gran contenido en metano en el gas de síntesis es una gran ventaja para la producción de BioSNG (la eficacia global es más elevada). Así, los gasificadores indirectos, que tienen un contenido en metano del 10% en volumen o más, son particularmente beneficiosos para la metanación (o Power 2 gas detallado más abajo).

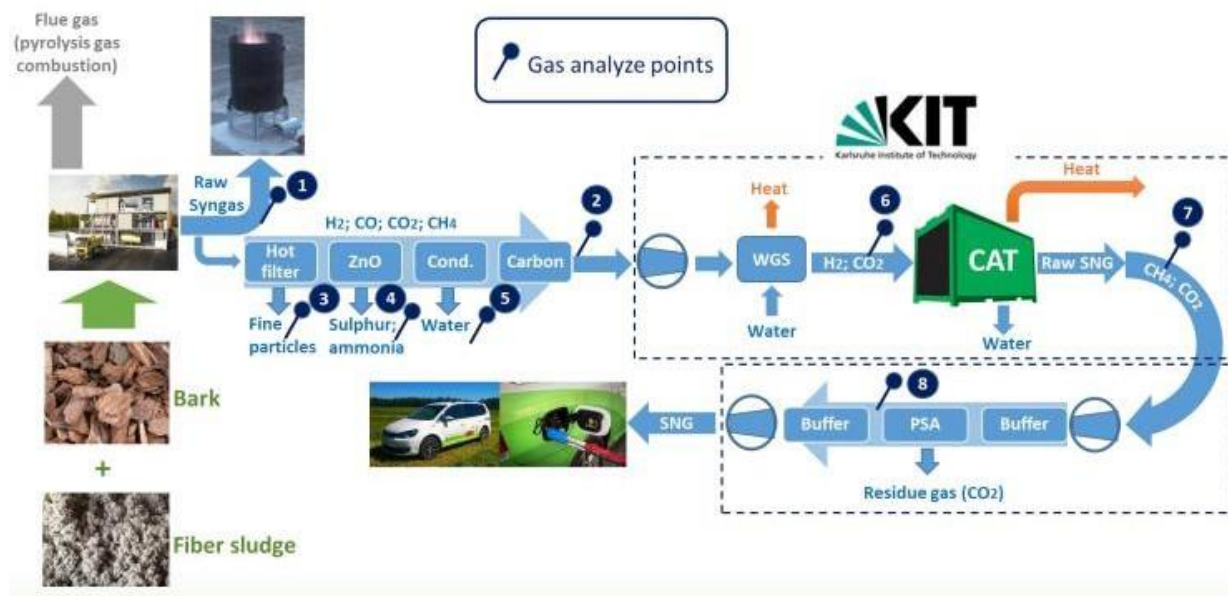


Figura 70: Proceso WOODROLL desarrollado por CORTUS Energy con el Instituto de Tecnología de Karlsruhe

Futuro del sector gasificación

En Francia

Los procesos de pirólisis y de gasificación son susceptibles de ser una respuesta entre otras al gran desafío de preservación de los recursos fósiles, y mientras los entrantes sean biomasas (limpias o desechos), contribuyen al alcance de los objetivos en materia de energías renovables (calor, electricidad, gas en las redes).

Por otra parte, cuando el sector utiliza desechos (de origen renovable o no), puede constituir una parte de la respuesta :

- A los objetivos actuales de reducción de los vertidos residuales;
- A las necesidades de desarrollar nuevas vías de valorización energética;

Para que estas tecnologías se desarrollen en Francia, previamente los procesos pilotos deben demostrar su valía y que Francia dispone de un retorno de experiencia sobre el funcionamiento de unidades industriales. Cabe destacar que Alemania que promovió mucho esta tecnología en los años 1980 no posee el día de hoy ninguna unidad que funcione con desechos domésticos debido a dificultades técnicas y económicas. L'ADEME apoya las unidades de demostración más pertinentes gracias a diversas convocatorias de propuestas en el marco de sus programas de Inversiones de Avenir.

En el mundo

Las instalaciones en curso de montaje o planificadas están creciendo, como lo ilustra el siguiente gráfico:

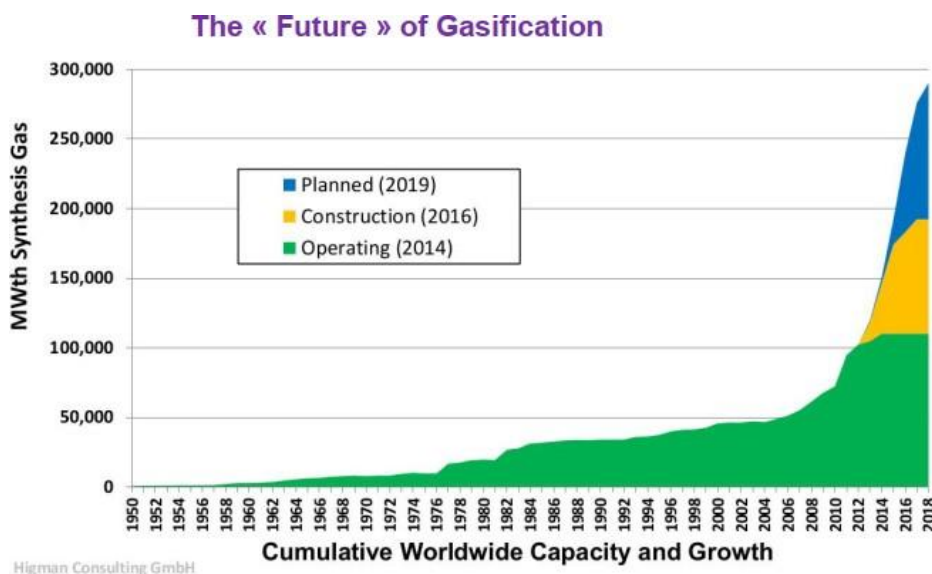


Figura 71: Desarrollo provisional de la producción de gas de síntesis o sintegás

El desarrollo de esta tecnología descansa evidentemente en el desarrollo de las tecnologías pero también y sobre todo de las reglamentaciones en vigor. De hecho, no existe hoy, por ejemplo, tarifas de compra para el SNG en Francia, lo que complica el cálculo de rentabilidad para los posibles promotores de proyectos interesados.