

Biomasa para la economía circular

Todo lo que querías saber sobre la biomasa pero no te atrevías a preguntar

JOHAN VAN GROENESTIJN, PAULIEN HARMSSEN, HARRIËTTE BOS



Biomasa para la economía circular

Todo lo que querías saber sobre la biomasa
pero no te atrevías a preguntar

Johan van Groenestijn, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos

Publicado en la serie de documentos 'Groene Grondstoffen'.

- Textiles for circular fashion: Part 1, Fibre resources and recycling options, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos (2020)
- Catalogus biobased bouwmaterialen 2019; Het groene en circulaire bouwen, Jan van Dam, Martien van den Oever (2019)
- Biobased plastics 2019, Karin Molenveld and Harriëtte Bos (2019)
- Lignine, groene grondstof voor chemicaliën en materialen, Jan van Dam, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos, Richard Gosselink (2017)
- Artificial Photosynthesis; For the conversion of sunlight to fuel, Robin Purchase, Huib de Vriend and Huub de Groot, editors: Paulien Harmsen and Harriëtte Bos, Dutch translation: Bruno van Wayenburg (2015)
- Biobased Packaging Catalogue, Karin Molenveld and Martien van den Oever (2014)
- Duurzaamheid van biobased producten uit plantaardige olie, energiegebruik en broeikasgasemissie. Harriëtte Bos, Sjaak Conijn, Wim Corré, Koen Meesters, Martin Patel (2013)
- Green building blocks for biobased plastics; Biobased processes and market development, Paulien Harmsen, Martijn Hackmann (2012)
- Catalogus biobased bouwmaterialen; Het groene bouwen, Jan van Dam, Martien van den Oever (2012)
- Biocomposieten 2012; Natuurlijke vezels en bioharsen in technische toepassingen, Martien van den Oever, Karin Molenveld, Harriëtte Bos (editor) (2012)
- Biobased Plastics 2012, Christiaan Bolck, Jan Ravenstijn, Karin Molenveld, Paulien Harmsen (editor) (2011)
- Microalgae; the green gold of the future? Large-scale sustainable cultivation of microalgae for the production van bulk commodities, Hans Wolkers, Maria Barbosa, Dorinde Kleinegris, Rouke Bosma, Rene Wijffels, Paulien Harmsen (editor) (2011)
- Duurzaamheid van biobased producten; Energiegebruik en broeikasgasemissie van producten met suikers als grondstof, Harriëtte Bos, Sjaak Conijn, Wim Corré, Koen Meesters, Martin Patel (2011)
- Bioraffinage; Naar een optimale verwaarding van biomassa, Bert Annevelink, Paulien Harmsen (2010)

Estas versiones y las versiones anteriores se pueden descargar en www.groenegrondstoffen.nl

Prefacio

En el debate social, "biomasa" equivale a "pellets de madera". Un debate que tiende a convertirse en una mera discusión sobre si efectivamente se refiere a eso o no. Esto implica que se subestima el potencial de la biomasa. Porque la biomasa es mucho más que eso. Es más que unos simples pellets de madera. ¿Pero cuánto más? ¿Y cuáles son los flujos disponibles? ¿De dónde vienen? ¿Tenemos suficiente (suelo en los Países Bajos)? ¿Y cómo podemos utilizar la biomasa tanto para productos químicos como para la energía?

'TKI-BBE' son las siglas de Top Consortium for Knowledge and Innovation in the Bio-based economy (parte de la economía circular). La 'K' y la 'I' equivalen a "conocimiento" e "innovación" respectivamente, un mundo en el que los hechos juegan un papel importante. Este es la razón por la que producimos este documento.

En este folleto hemos recopilado varia información con el objetivo de proporcionar una descripción general y, cuando sea posible, directrices para la política y el espíritu empresarial. En él se ofrece una descripción general de los tipos de biomasa y la disponibilidad de la biomasa en los Países Bajos, Europa y el mundo, y cuáles son las tecnologías disponibles para convertir la biomasa en una gama de productos útiles.

Pero antes de pasar la página: ¿cuál crees que es el cultivo que absorbe más CO₂ en los Países Bajos?

Kees de Gooijer
Director de inspiración TKI-BBE

Tabla de contenido

1	Introducción	8
2	Biomasa	11
2.1	¿Qué es la biomasa?	11
2.2	Productos elaborados a partir de la biomasa	13
2.3	Producción de biomasa	15
2.4	Nuevas fuentes de biomasa	16
3	Uso actual de la biomasa	19
3.1	Introducción	19
3.2	Uso de vectores de energía en los Países Bajos	19
3.3	Uso, importación y exportación de biomasa para aplicaciones energéticas en los Países Bajos	21
3.4	Importaciones y exportaciones holandesas de biomasa	22
3.5	Usos de la biomasa en Países Bajos	25
3.6	Conclusiones	31
4	Demanda de biomasa para la bioeconomía	33
4.1	Introducción	33
4.2	Escenario 1: sustitución de materias primas fósiles por biomasa únicamente, según el uso actual	34
4.3	Escenario 2: la demanda de biomasa que se espera para sustituir completamente las materias primas fósiles por una combinación de fuentes renovables en 2050	39
4.4	Disponibilidad de biomasa	43
4.5	La movilización de biomasa es crucial	46
4.6	La demanda de biomasa frente a la disponibilidad	47
5	Tecnologías de procesamiento de biomasa	49
5.1	Introducción	49
5.2	Proceso mecánico	49
5.3	Procesos de conversión biológica	50
5.4	Procesos de conversión termoquímica	56
5.5	Procesos de conversión química	63
5.6	Técnicas de separación	65
6	Nuevas tecnologías	67
6.1	Introducción	67
6.2	Nuevos procesos de conversión biológica	67
6.3	Nuevos procesos termoquímicos	69
6.4	Nuevos procesos de conversión química	70

6.5	Biorrefinación y cascadas	73
6.6	Captura, almacenamiento y utilización de dióxido de carbono.	75
7	Cómo depende la aplicación del tipo de biomasa	79
7.1	Introducción	79
7.2	Propiedades de la biomasa en relación con aplicaciones adecuadas.....	80
7.3	Importación de biomasa.....	85
7.4	Uso de biomasa doméstica	86
7.5	La no utilización de biomasa es desfavorable	86
8	Uso de biomasa en las distintas aplicaciones.....	89
8.1	Introducción	89
8.2	Consumo humano	89
8.3	Alimentación animal	89
8.4	Energía	89
8.5	Materiales	91
8.6	Químicos.....	92
8.7	Compost y mejora del suelo	94
8.8	Conclusiones	95
9	Referencias.....	97
	Detalles de la publicación	102

1 Introducción

Los Países Bajos y la mayoría de los países quieren reducir el uso de combustibles fósiles a base de carbono como el petróleo, el carbón y el gas natural. Las dos razones más importantes son los desafíos del cambio climático y la finitud de las reservas de estas materias primas. El uso de combustibles fósiles y plásticos hechos a partir de materias primas fósiles perjudica el clima y lo modifica porque el dióxido de carbono liberado después de ser quemado o biodegradado se acumula en la atmósfera e intensifica el efecto invernadero. Una atmósfera con un mayor nivel de dióxido de carbono atrapa mejor el calor y aumenta la temperatura de la atmósfera, al igual que un gas de efecto invernadero. Desde la revolución industrial en 1750, la concentración de dióxido de carbono ha aumentado en un 48%¹ y muchos expertos en climatología afirman que esta es la causa principal del aumento de la temperatura terrestre. Creen que el aumento global de la temperatura provocará un aumento del nivel del mar y un clima más extremo (tormentas, sequías e inundaciones).

También existe preocupación por el uso de otras materias primas extraídas de la tierra como el fosfato, el potasio y los metales. La dispersión del material en el medio ambiente y la finitud de las reservas también presentan un problema. Los metales se reutilizan en gran medida, pero el potasio y el fosfato, al ser combustibles fósiles, generalmente se usan solo una vez. El denominador común en esta problemática, es la extracción de materia prima de la tierra, seguida del uso puntual y posterior depósito en un lugar donde el material ya no puede volver a iniciar el ciclo. Esto es ilustrativo de una economía lineal, con lo cual la solución es una economía circular. Este es un sistema económico e industrial en el que no se agotan las reservas finitas de materias primas y los materiales residuales se utilizan de nuevo en el sistema. Una economía circular podría mantenerse durante siglos y, por lo tanto, es más sostenible que una economía lineal. Si bien no es posible una economía completamente circular, se pueden realizar esfuerzos dirigidos a minimizar el uso de materias primas con reservas finitas y limitar las descargas al medio ambiente.

La extracción de materias primas fósiles se puede frenar de diversas formas, por ejemplo, mediante el uso de materias primas renovables (biomasa), energías renovables (solar, eólica y calor geotérmico) y la reutilización de los materiales utilizados anteriormente. Esto creará ciclos cerrados de carbono y otros elementos, y esos ciclos, además, tendrán un tiempo de circulación corto. Por ejemplo, la madera extraída de una plantación de sauces se puede utilizar como combustible para una central eléctrica. El dióxido de carbono se libera durante la combustión y se descarga en la atmósfera. Sin embargo, en la plantación de sauce, dentro de cuatro años, se absorbe la misma cantidad de dióxido de carbono atmosférico y se almacena en la madera, a la espera de

la próxima cosecha. Este es un ciclo mucho más corto que el actual ciclo del carbono vinculado al consumo de combustibles fósiles. Se han necesitado decenas de millones de años para convertir el dióxido de carbono almacenado en el interior de las plantas que se hundieron hasta el fondo de los pantanos, y poco a poco se convirtieron en carbón en las cantidades actuales. A la inversa, la naturaleza tardará decenas de millones de años en reponer el dióxido de carbono de las reservas de carbón y petróleo que hemos consumido durante los últimos 200 años, siempre y cuando haya pantanos. A diferencia del carbón, el uso de la madera de sauce para el suministro de energía es climáticamente neutro.



Figura 1. La colza ha sido tradicionalmente un cultivo oleaginoso importante en el noroeste de Europa.

Los procesos cíclicos operan solo si se alimentan continuamente de energía, que preferiblemente debería ser generada por el sol: la biomasa, la electricidad fotovoltaica y la energía eólica son diversas formas de energía solar. La energía geotérmica y la energía de las mareas (generada por la interacción gravitacional entre la tierra y la luna) también son fuentes sostenibles. La energía nuclear es una historia diferente: no produce emisiones netas de dióxido de carbono, pero dependiendo de la materia prima utilizada, agota las reservas y produce flujos de residuos potencialmente peligrosos. Otro ejemplo de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, pero no del agotamiento de las reservas, es el almacenamiento artificial de dióxido de carbono en el suelo. Esto puede considerarse como un remedio temporal para combatir el cambio

climático y evitar que el dióxido de carbono se descargue a la atmósfera. Sin embargo, si este dióxido de carbono se produce a partir de fuentes fósiles, no se puede evitar el agotamiento de estos recursos.

La transición de una economía lineal a una circular requiere una transición social junto con innovaciones científicas, tecnológicas, socioeconómicas e institucionales. Aunque esta ambición es evidente en la política actual, dada la magnitud del desafío y los numerosos intereses en juego, se trata de un proceso muy complejo.

La biomasa es un elemento indispensable para lograr una economía circular. Puede utilizarse como materia prima para la producción de energía, combustibles de transporte, productos químicos, materiales, alimentos y piensos (alimentos para animales). La bioeconomía es una economía en la que el material vegetal como los cultivos y los flujos de residuos de la agricultura e industrias alimentarias, se utiliza para aplicaciones alimentarias y no alimentarias. La madera y los materiales derivados de otras formas de vida (animales y microorganismos) también se utilizan en la bioeconomía. La bioeconomía ya existía antes de 1750 y nunca ha desaparecido por completo. Algunos ejemplos son el cuero, la seda, el algodón, el aceite de linaza, el yute, la lana y la cola además del uso de la madera como fuente de energía, material de construcción y materia prima para la producción de papel. Sin embargo, la variedad de productos y la cantidad de energía que usamos hoy como resultado del uso de petróleo, carbón y gas natural ha aumentado significativamente. Si queremos hacer la transición a una bioeconomía 2.0 basada en un nuevo principio, ésta requerirá un esfuerzo considerable en términos de organización de las cantidades necesarias de biomasa sostenible. Además, requerirá un gran esfuerzo para lograr conversiones económicamente viables para una amplia gama de productos. Hay muchas posibilidades a nivel tecnológico. Continuamente se desarrollan y lanzan al mercado nuevos productos biológicos y sus correspondientes procesos de producción. Este desarrollo e implementación son el resultado de los esfuerzos concertados de empresas, autoridades públicas e instituciones académicas. Sin embargo, también existe una realidad social y económica. La generación de energía, producción de productos químicos y materiales de origen biológico suelen ser más caros que la alternativa fósil y será necesario dedicar esfuerzos considerables (y dinero) para el desarrollo de una producción rentable. Además, requerirá un esfuerzo por parte de los consumidores que tendrán que utilizar energía y productos diferentes. En consecuencia, existe una tensión palpable entre la realidad científica y tecnológica, y la realidad socioeconómica. Este folleto tiene como objetivo resaltar el potencial de la biomasa basándose en la realidad científica y tecnológica. Nuestra visión se basa en las experiencias y los hallazgos encontrados tras haber trabajado en la bioeconomía desde hace treinta años.

2 Biomasa

2.1 ¿Qué es la biomasa?

La biomasa es la sustancia que compone los organismos vivos y muertos. El tipo de organismo no se limita a las plantas. Los animales y las formas inferiores de vida (microorganismos) también están compuestos de biomasa.

Con el fin de utilizar la biomasa en la bioeconomía, es importante saber de qué sustancias se compone la biomasa. La biomasa disponible en la tierra consiste principalmente en material vegetal, cuyos componentes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Los principales componentes de las plantas y sus funciones.

Componente	Función
Carbohidratos <ul style="list-style-type: none"> • Celulosa • Hemicelulosa • Pectina • Hidrocoloides 	Parte de las paredes celulares (rigidez y compartimentación)
<ul style="list-style-type: none"> • Almidón • Sacarosa 	Sustancias de reserva
Lignina, corcho	Parte de las paredes celulares
Proteína	Biocatalizadores (enzimas), sustancia de reserva
Grasa, aceite	Sustancias de reserva
Ingredientes de alto valor agregado <ul style="list-style-type: none"> • Pigmentos • Vitaminas • Terpenos • Alcaloides • Fenoles • Sustancias aromáticas y aromatizantes 	Antioxidantes, agentes protectores, cofactores de enzimas, buen o mal sabor
Minerales	Presión osmótica sobre las células, rigidez, cofactores enzimáticos.
Agua	Entorno de reacción, mecanismo de transporte y rigidez.

La relación entre los componentes enumerados en la Tabla 1 difiere para cada categoría de planta. La madera de los árboles y los tallos de las gramíneas más viejas se componen principalmente de lignocelulosa, un complejo rígido que consta de celulosa, hemicelulosa y lignina. Las partes verdes como el follaje y la hierba joven, tienen un contenido de

proteínas relativamente alto y apenas contienen lignina. Las partes subterráneas como los tubérculos, los bulbos y las raíces contienen mucho almidón y azúcar, es decir, reservas para la siguiente temporada de crecimiento. Las semillas contienen muchas sustancias de reserva como almidón (grano, arroz) y aceite (nueces), porque estas sustancias necesitan suministrar la energía y materiales de construcción para ayudar a que la plántula crezca. Las algas contienen carbohidratos especiales en la pared celular como sustancia de reserva (alginato, carragenina, agar, manitol), mientras que las microalgas son mucho más ricas en aceite. Las algas y plantas que crecen en un ambiente salado son ricas en minerales. Los pastos y ciertos tipos de algas suelen contener ácido silícico, un mineral que aporta rigidez. Las plantas pueden prevenir el daño liberando sustancias tóxicas o sustancias con un sabor u olor desagradable. La fruta, en cambio, debe consumirse y contener ingredientes con una sensación más agradable.



Figura 2. Algas pardas (Ascophyllum nodosum) también conocido como alga anudada (fotografía: Paulien Harmsen).

Las sustancias orgánicas indicadas en la Tabla 1 (todas excepto el agua y los minerales) contienen energía. Cuando se queman y forman dióxido de carbono y agua, la energía se libera en forma de calor. Por ejemplo, la energía liberada al quemar un kilogramo de almidón o un kilogramo de celulosa puede llevar a ebullición 47 litros de agua. Además, un kilogramo de almidón puede proporcionar a una persona dos días de energía.

2.2 Productos elaborados a partir de la biomasa

Aunque la clasificación de los tipos de biomasa podría en principio seguir la ruta taxonómica (clasificación del reino vegetal y animal), en este folleto hemos utilizado una clasificación que se centra en el uso de la biomasa dentro del sistema de producción humano. Hemos seguido la ruta de la creación de valor: desde la planta fresca hasta los productos residuales después del consumo. Esta clasificación de biomasa que es o será relevante en la bioeconomía se presenta en la Tabla 2. Aparte del producto primario, la

Tabla 2. Clasificación de tipos de biomasa especificando los productos y subproductos actuales.

Tipo de biomasa	Productos primarios	Productos secundarios importantes (flujos de residuos primarios y secundarios)
Árboles forestales	Madera, corcho, resina, látex	Follaje, aserrín, corteza
Manejo del paisaje plantas, árboles y pasto	Madera, plantas acuáticas, plantas de carretera	Residuos de poda
Cultivos		
• Grano	Granos, almidón	Paja, salvado, paja menuda
• Cultivos oleaginosos	Frijoles, nueces, aceite	Pulpa sobrante alta en proteínas, desechos de poda (madera)
• Remolacha azucarera	Azúcar	Pulpa de remolacha azucarera, melaza, coronas de remolacha azucarera, hojas de remolacha azucarera
• Patatas	Patatas, almidón	Pulpa de patatas
• Palma de aceite	Aceite de palma	Variedad de grandes cantidades de flujos de residuos
• Frutas y vegetales	Frutas y vegetales	Tallos, follaje, desechos de frutas y verduras
• Hierba de la pradera	Hierba, heno	
Microalgas, algas marinas	Aceite, proteína, hidrocoloides	Residuos de la pared celular
Flujos de residuos después del consumidor y uso animal (flujos de residuos terciarios)	Residuos orgánicos, papel viejo, estiércol, grasas residuales, aceite de cocina usado, desperdicios, textiles desechados y lodos de depuradora	

biomasa produce varios subproductos que también son adecuados para su uso en la bioeconomía. La Tabla 3 contiene un desglose de productos primarios y subproductos con fines ilustrativos.

Tabla 3. Desglose cuantitativo de productos y subproductos de las principales fuentes de biomasa.

Tipo de biomasa	Producto primario con participación masiva (MS)	Subproducto con participación masiva (MS)
Remolacha azucarera ²	Remolacha 77%	Follaje 23%
Trigo de invierno ²	Granos 55%	Paja 45%
Patatas para cocinar ²	Patatas 76%	Follaje 24%
Habas (frijol) de soja ³	Aceite 20%	Pulpa sobrante 71% Cáscaras 6% Pérdida 3%
Árbol ^{4,5}	Madera en rollo 70%	Corteza, follaje, ramas 30%

El uso de árboles ilustra acertadamente la amplia gama de aplicaciones. Alrededor del 75% de un árbol está formado por el tronco, las ramas y la corteza. La raíz representa el 20% y las hojas o agujas el 5% (según la materia seca o MS).⁴ La madera en rollo se produce a partir del tronco y las ramas a partir de la parte utilizable (sin corteza). La corteza suele representar entre el 10% y el 20% del peso húmedo del tronco y las ramas.⁶ En Canadá, después de talar un árbol, el 70% se utiliza como madera en rollo. La madera en rollo es un tronco de árbol talado con o sin corteza, sin las ramas laterales y la madera de la copa.

Las astillas se utilizan para la gestión de jardines y paisajes, mientras que las ramas laterales y la madera de la copa se utilizan como combustible para las centrales eléctricas. Si las ramas provienen de árboles que se encuentran en suelo pobre, estas ramas a menudo se dejan en el bosque para nutrir el suelo con minerales. La madera en rollo se utiliza para los siguientes fines:⁵

- 29% madera aserrada
- 42% papel y pulpa
- 14% hojas de madera
- 8% de combustible para centrales eléctricas (sin pellets)
- 3% combustible de pellets de madera
- 4% otros productos



Figura 3. Varios productos están hechos de madera en rollo.

2.3 Producción de biomasa

Las plantas ocupan espacio y, en esencia, zonas terrestres y acuáticas, porque necesitan luz solar para su suministro de energía. Aunque este es un principio general, varias especies de plantas utilizan la energía suministrada con un rendimiento variable para la producción de biomasa. La producción varía de unas pocas a decenas de toneladas de materia seca de biomasa por hectárea al año (Tabla 4).

Tabla 4. Principales rendimientos de cultivos y bosques por hectárea y año en los Países Bajos.

Tipo de biomasa	Rendimiento (ton MS / ha.año)
Remolacha azucarera ²	15,7
Trigo de invierno ²	7,4
Ensilaje de maíz ²	14,4
Hierba de pradera ²	11,5
Patatas de consumo (suelo arcilloso) ²	9,6
Producción forestal, aprovechamiento real ^{7,8} .	1,8

2.4 Nuevas fuentes de biomasa

Algas marinas

Las algas son un cultivo de rápido crecimiento que crece en el mar. Hay tres grupos primarios diferentes basados en la presencia de pigmentos (marrón, rojo y verde), cada uno de los cuales también contiene muchas especies diferentes. El lugar donde crece cada especie depende de su ubicación y de parámetros como la temperatura, la luz, la salinidad y los nutrientes. Las algas son capaces de crear un efecto de biorremediación y purificar el agua mediante la absorción de nutrientes y metales pesados. La combinación del cultivo de algas y la acuicultura (Acuicultura Multitrófica Integrada, IMTA) es prometedora, mientras que el cultivo de algas para el secuestro de fosfato también podría ser una perspectiva interesante. Por tanto, la calidad del agua (incluidos los contaminantes) determina en gran medida las opciones de la aplicación de las algas. La disponibilidad global asciende actualmente a alrededor de 30 toneladas métricas de biomasa húmeda. La industria actual se basa principalmente en las algas cultivadas de Asia (principalmente China). También se procesan las algas silvestres recolectadas a pequeña escala o lavadas en tierra. Actualmente se están llevando a cabo numerosas actividades nuevas con el fin de establecer granjas de algas en Europa (Noruega, Irlanda, Escocia, Dinamarca, Países Bajos y Bélgica) para impulsar la producción de algas. Hay escasez de algas y la mayor parte se obtiene de Asia. Las preguntas de investigación se relacionan con el rendimiento y sobre cómo cosecharlo y procesarlo directamente en un producto intermedio estable.

En términos de composición, las algas marinas son ricas en carbohidratos, minerales y sales, pero contienen menos proteínas. Su composición varía mucho no solo por especie sino también por temporada. Las algas constituyen una biomasa interesante por su composición. Las algas contienen sustancias con características especiales (incluidos los hidrocoloides) que no se encuentran en las plantas terrestres. Los usos actuales de las algas van desde alimentos, materia prima para la industria de los hidrocoloides (alginato, carragenina y agar) para aplicaciones en alimentación, cuidado personal, aplicaciones técnicas, complementos alimenticios y alimentos para animales hasta fertilizantes o bioestimulantes para plantas.

Microalgae

El cultivo de microalgas podría contribuir significativamente a mejorar la sostenibilidad de la sociedad. Las microalgas se pueden utilizar no solo para la producción ecológica de innumerables materias primas, sino también como procesadores de residuos. Las microalgas se benefician con flujos de desechos como el dióxido de carbono de los gases de combustión, el agua residual de las empresas agroindustriales e incluso el estiércol

diluido. Convierten los residuos en materias primas utilizables. Las microalgas reciclan los nutrientes que de otro modo serían eliminados y cierran el ciclo de nutrientes con agua más limpia como beneficio adicional.



Figura 4. El cultivo de algas es el foco de una investigación sustancial, incluso en Wageningen University and Research.

Las células de algas contienen tantas sustancias beneficiosas que se cultivan cada vez más para este propósito específico. Muchas especies de algas pueden contener un porcentaje sustancial de aceites de alto valor añadido, en parte compuestos por ácidos grasos omega-3 y omega-6, que pueden utilizarse como materia prima para complementos dietéticos. Los conocidos ácidos grasos omega-3 del pescado proceden de las microalgas. En la actualidad, se cultivan docenas de cultivos agrícolas que contienen aceite o sustancias similares al almidón a partir de las cuales se puede producir combustible y otros productos. Lo que hace que las algas sean únicas es que contienen una amplia variedad de componentes beneficiosos además de la materia prima para obtener energía. En los últimos años, se han descubierto más de 15.000 nuevos compuestos químicos en las algas. Además de los ácidos grasos, las células de las algas también pueden contener carotenos (pigmentos que van del amarillo al rojo) y otros pigmentos, antioxidantes, proteínas y almidón. Estos componentes se pueden utilizar como materia prima para numerosos productos de las industrias química y alimentaria. Como resultado, la lista de productos elaborados a partir de algas crece constantemente.

Además de los productos de algas de alto valor añadido para nichos de mercado como el polvo de algas para la industria de suplementos dietéticos y los extractos de algas para controlar el moho de los campos de golf, el interés está creciendo no solo en productos a granel como materias primas para bioplásticos o biocombustibles, sino también en proteínas de algas para usos alimentarios.⁹

3 Uso actual de la biomasa

3.1 Introducción

Este capítulo describe cuánta biomasa se utiliza en los Países Bajos, sus aplicaciones y cómo esa cantidad se compara con el uso de materias primas fósiles.

3.2 Uso de vectores de energía en los Países Bajos

Las materias primas fósiles se utilizan principalmente para productos químicos, energía y combustibles de transporte, mientras que la biomasa se utiliza principalmente en la alimentación animal y humana. La generación de energía predomina cuando se trata del uso de materias primas. La cantidad de portadores de energía fósil en los Países Bajos ascendió a 2.864 PJ en 2017 (Tabla 5). La proporción de energía renovable entre todos los vectores de energía utilizados en los Países Bajos aumenta cada año.¹⁰ En 2017, la energía renovable representó el 5.8% (182 PJ), de la cual el 68% fue de biomasa (124 PJ).¹⁰ El otro 32% (58 PJ) fue suministrado por otras fuentes, incluida la energía eólica y solar. En comparación con otros países europeos, el 5,8% es una cifra relativamente baja y las perspectivas de alcanzar el objetivo holandés del 14% para 2020 parecen remotas. El porcentaje de energía renovable sigue siendo bajo por las siguientes razones:

- La disponibilidad limitada de fuentes de energía renovables asequibles.
- El tiempo y el esfuerzo empleados en la transición.
- Los intereses de las empresas de petróleo y gas en los Países Bajos.^{11,12}
- Regulaciones y procedimientos holandeses.

Materias primas fósiles en los Países Bajos

Los Países Bajos son esencialmente un país de tránsito y refinación de materias primas fósiles. El tránsito de materias primas fósiles es incluso casi tres veces mayor que el uso doméstico, un tercio del cual está reservado para la producción de electricidad. Los dos tercios restantes se utilizan para la producción de combustibles para el transporte, productos químicos y como combustible doméstico. Los principales combustibles utilizados para la producción de electricidad en los Países Bajos en 2016 fueron:¹⁰

- 14,3 mil millones de m³ de gas natural (454 PJ)
- 12,084 kton de carbón (305 PJ)

Tabla 5. Consumo de vectores de energía en los Países Bajos para uso doméstico, no comercial en 2017.^{10,13}

Tipo de portador de energía	PJ	%	kton
Gas natural	1.294	41%	34.000
Materias primas y productos derivados del petróleo	1.187	38%	27.400
Carbón y otros productos a base de carbono	383	12%	15.100
Energía renovable (incluida biomasa, viento, sol)	182	6%	
Otros (incluida la energía nuclear)	91	3%	
TOTAL	3.137	100%	76.500

Petajulios y kilotones

Las grandes cantidades de energía se expresan comúnmente en petajulios (PJ o 10^{15} J). Para que te hagas una idea, un PJ es la cantidad de energía eléctrica producida por la central eléctrica Hemweg-8 en Amsterdam en tres semanas.

Las materias primas fósiles y la biomasa contienen energía. Las cantidades se especifican en la tabla siguiente. El calor neto de combustión (valor calorífico) es la energía liberada durante la combustión para formar dióxido de carbono y vapor. El calor bruto de combustión es el calor neto de combustión más el calor que se recupera por condensación de vapor.

Combustible	Valor calorífico neto (MJ/kg)	Valor Calorífico Bruto (MJ/kg)
Gas natural ¹⁴	38.1	42.1
Petróleo crudo ¹⁵	43.4	45.7
Carbón ¹⁵	25.3	26.7
Pellets de madera (abeto) ¹⁶	17.2	18.7

Se puede generar más energía a partir del gas natural por kilo de carbono que del carbón, razón por la cual una central eléctrica de gas emite menos dióxido de carbono que una central eléctrica de carbón.

3.3 Uso, importación y exportación de biomasa para aplicaciones energéticas en los Países Bajos

En 2017, las plantas de incineración de residuos y las calderas a las empresas representaron una gran parte del suministro de energía a base de biomasa. Las diversas aplicaciones de estas formas de energía se presentan en la Tabla 6. En ella se muestra el consumo primario: la forma medible inicial de energía generada a partir de biomasa, es decir, los petajulios en biodiésel, biogasolina, biogás y leña, la energía en la porción biogénica (orgánica) de residuos y en la biomasa para calderas y centrales eléctricas. Cabe señalar que la cantidad de petajulios contenida en la electricidad producida y en el calor utilizable (no mostrado) es menor que la de la biomasa original porque las calderas y centrales eléctricas tienen una cierta eficiencia. La eficiencia también depende del

Tabla 6. Uso (consumo primario) de biomasa como fuente de energía en diversas aplicaciones en los Países Bajos en 2017.¹⁰

Aplicación	PJ	Descomposición	PJ
Plantas de incineración de residuos	41,9		
Calderas de biomasa para negocios	26,8	Para electricidad Solo para calor	16,7 10,1
Hogares	19.5	Chimeneas abiertas Chimeneas integradas Autónomo Carbón Vegetal	2.5 2.8 13.9 0.3
Combustibles líquidos para transporte	13.7	Biogasolina* Biodiesel	5.4 8.3
Biogás	13.4	Vertederos de basura Plantas de tratamiento de aguas residuales Co-fermentación de estiércol Otro	0.6 2.4 4.8 5.6
Combustión conjunta y combustión auxiliar en centrales eléctricas	4,9**		

* Bioetanol, gratis o incluido en ETBE (agente antidetonante).

** En 2017, se utilizó muy poca biomasa como co-combustión en centrales eléctricas debido al limitado Esquema de Incentivo a la Producción de Energía Renovable (SDE). Esto también explica el nivel relativamente bajo de importaciones de pellets de madera (ver Tabla 7).

combustible y la tecnología utilizada. Por ejemplo, la eficiencia de la producción de electricidad y el calor utilizable del biogás en una planta combinada de calor y energía (CHP) es mayor que la de una central eléctrica de carbón.

Los tipos de productos de biomasa y flujos de residuos orgánicos utilizados para el suministro de energía se muestran en la Tabla 7. La biomasa utilizada para la generación de energía en los Países Bajos proviene en parte del país y en parte del extranjero. Los Países Bajos es un país exportador de aplicaciones energéticas basadas en biomasa.

Tabla 7. Importaciones, extracción, exportaciones y consumo de portadores de energía a partir de biomasa y flujos de residuos orgánicos en los Países Bajos en 2017.¹⁰

Portador de energía	NL en (PJ)			NL de (PJ)		
	Importaciones	Extracción	Total	Exportaciones	Extracción	Total
Biogás	0	14	14	0	13	13
(Productos de) biomasa sólida y líquida (por ejemplo, pellets de madera y bioetanol)	13	128	141	68	68	136
Fracción biogénica de los residuos domésticos (lo que se incinera en las plantas de incineración)	11	33	44	1	42	43
Total	24	175	199	69	123	192

El saldo no se cierra por completo debido a cambios en inventarios y efectos estadísticos.

3.4 Importaciones y exportaciones holandesas de biomasa

Los Países Bajos es un país pequeño con una alta densidad de población y una alta densidad de ganado. Además, limita con el mar y está situado en el estuario de los principales ríos, lo que convierte a los Países Bajos en un importante importador y exportador de mercancías. Esto también se aplica a la biomasa. En la Tabla 8 se muestra una descripción general de las importaciones y exportaciones de biomasa. En ella se muestra que el 71% de los productos de biomasa se importan de Europa y que el 83% de los productos de biomasa se exportan a un destino europeo. La mayoría de las

exportaciones son productos y productos semi terminados en lugar de la propia biomasa original.

Según los datos, se estima que el consumo de biomasa en los Países Bajos es de 43.000 kton MS al año (= 50.000-32.000 + 25.000), mucho más alto que la cantidad producida en el país en los Países Bajos (25.000 kton DM). Las importaciones superan la producción nacional. El alto volumen de importación se utiliza para complementar las necesidades internas con fines de exportación. El fuerte vínculo con el comercio internacional es característico de la agricultura y bioeconomía holandesas.

Tabla 8. Importaciones y exportaciones holandesas de biomasa y productos de biomasa desde / hacia Europa y el mundo en 2016 (CBS).¹⁰

Biomasa	Mundo (kton húmedo)	Europa (kton húmedo)	Países Bajos (kton húmedo)
Importado por los Países Bajos			
Biomasa cruda	31,585	20,752	
Producto semi terminado	15,989	13,756	
Producto terminado	31,170	21,066	
Total	78,744	55,574 (71%)	
<i>Materia seca total estimada (kton)*</i>	<i>50,000</i>		
Exportado por los Países Bajos			
Biomasa cruda	22,599	20,730	
Producto semi terminado	16,173	11,517	
Producto terminado	33,057	27,274	
Total	71,829	59,521 (83%)	
<i>Materia seca total estimada (kton)*</i>	<i>32,000</i>		
Producción en los Países Bajos			
Total (biomasa y biomasa productos)**			41,141
<i>Materia seca total estimada (kton)*</i>			<i>25,000</i>

* El contenido de materia seca de los cultivos de forraje es del 85% según cifras de CBS.

** Solo biomasa primaria, sin carne, número limitado de residuos.

En la Tabla 9 y en la Figura 5 se muestra desglose adicional de la Tabla 8. En 2015, la UE representó el 60% del valor (en euros) de los productos agrícolas importados.¹⁷ Concretamente, los cereales representaron alrededor del 50% y las semillas oleaginosas alrededor del 30%. La participación europea en las importaciones de soja es mucho menor. De acuerdo con el Informe de fondo CBS Soja Barameter¹⁹, este ascendió a 4%

en 2011. La soja se importa principalmente de América del Norte y del Sur. En 2017, todo el aceite de palma era no europeo. Casi todo el aceite de palma importado en los Países Bajos se obtuvo de seis países: Indonesia (31%), Malasia (20%), Papua Nueva Guinea (14%), Colombia (10%), Honduras y Guatemala (ambos 9%).²⁰ Por el contrario, algunos productos agrícolas se obtienen principalmente en Europa. Un ejemplo de ello es la fruta que, en términos de valor, es el artículo más importante en la categoría de productos agrícolas importados. En 2015, Europa representó más del 80% del valor de estos bienes importados.¹⁷

Del mismo modo, la madera y los productos derivados de la madera se importan principalmente de Europa: El 76% (tonelaje) de la madera y los productos de la madera se obtuvieron de Europa en 2014.²¹ Estos productos eran principalmente papel, pulpa, madera blanda aserrada y tableros de partículas. América del Norte suministra el 8% de las importaciones de madera holandesa (2014).²² Los pellets de madera representaron la mitad de ese porcentaje. En 2013 y 2014, se importaron 570 kton y 167 kton adicionales de pellets de madera (DM).¹⁰ Debido a la supresión de la subvención para la cocción conjunta y la cocción auxiliar, prácticamente no se importaron pellets de madera en 2015-2017. Los Países Bajos importan principalmente biomasa no europea y productos de biomasa que no están disponibles o no pueden producirse en Europa.

Tabla 9. Importaciones y exportaciones holandesas de las principales categorías de biomasa y productos de biomasa. Véase también la Figura 5.^{3,17}

Productos de biomasa	Importaciones (kton MS / año)	%	Exportaciones (kton MS / año)	%	Δ (kton)
Granos	12.174	32,5	2.222	10,9	9.952
Cultivos oleaginosos más pulpa sobrante	12.914	34,4	7.429	36,5	5.485
Cultivos alimentarios (frutas, hortalizas, etc.)	1.877	5,0	2.541	12,5	-664
Césped y cultivos para animales	33	0,1	4	0,0	29
Aceite de palma	2.880	7,7	1.400 (aprox.)	6,9	1.480
Madera y productos derivados de la madera	5.090	13,6	3.353	16,5	1.737
Peces y otros organismos acuáticos	196	0,5	268	1,3	-72
Animales vivos, carne y productos cárnicos	2.323	6,2	3.129	15,4	-806
TOTAL	37.487	100	20.346	100	17.141

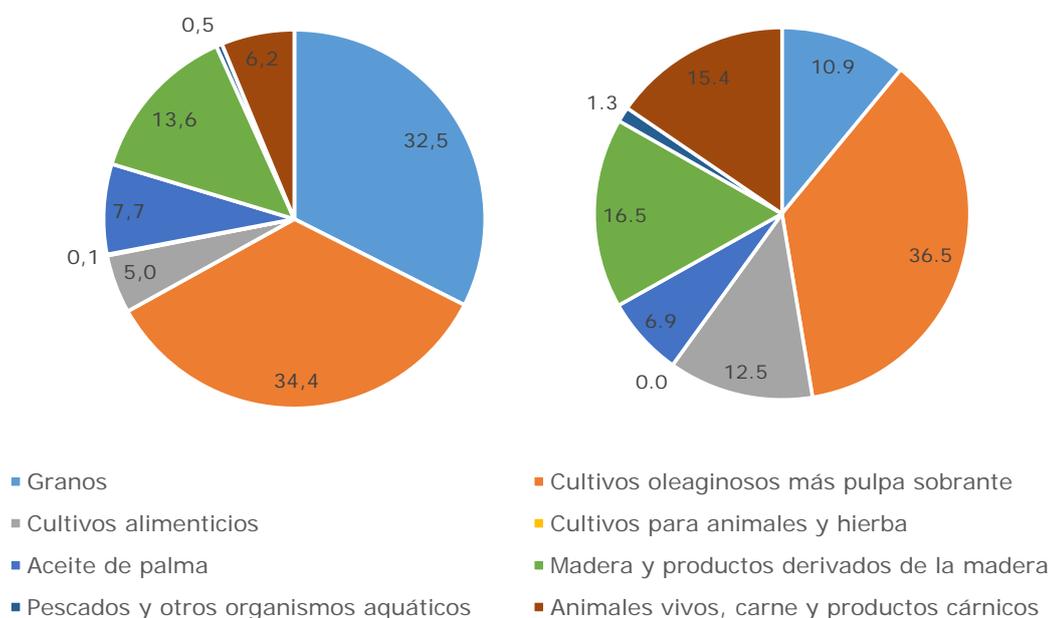
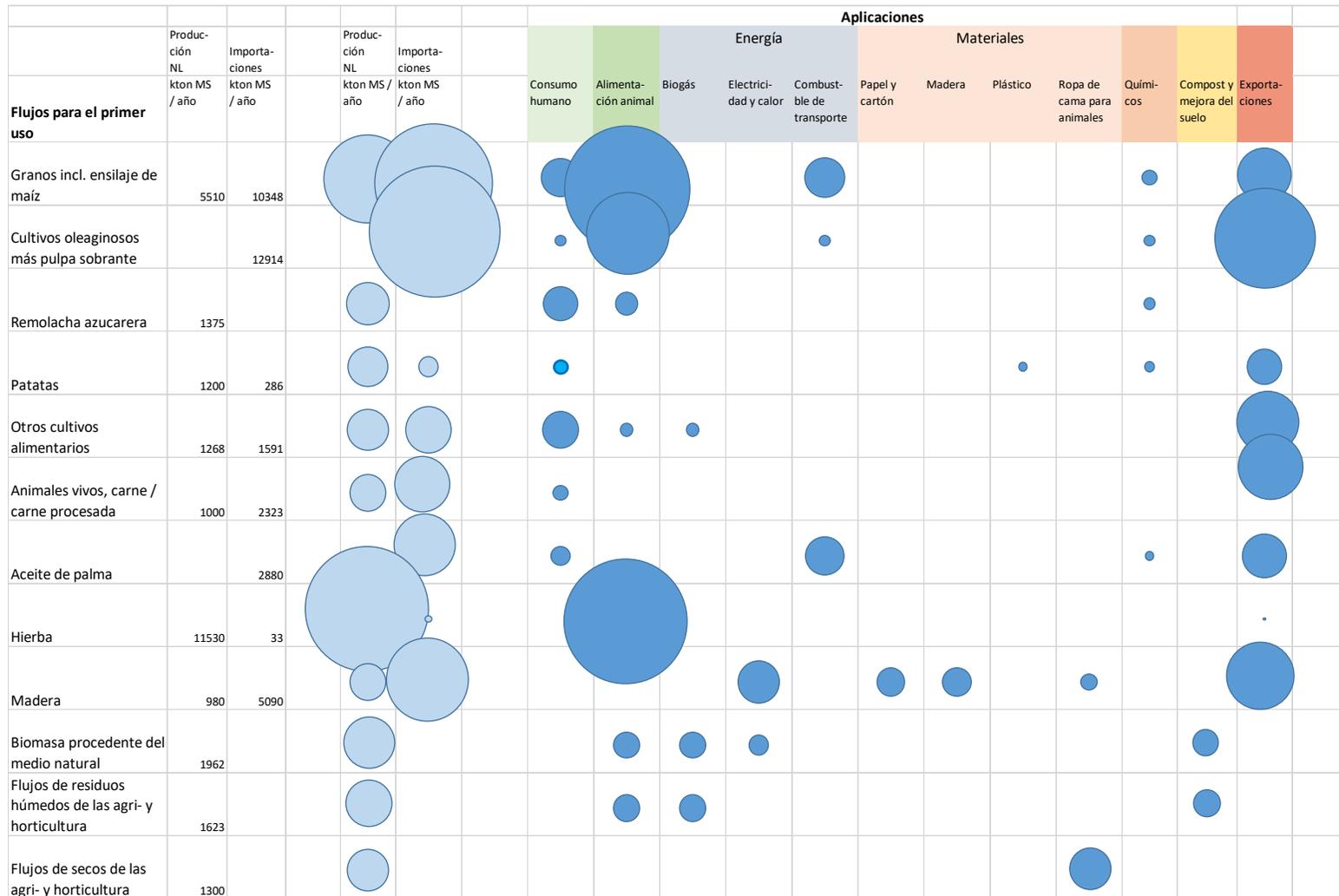


Figura 5. Importaciones (izquierda) y exportaciones (derecha) de corrientes de biomasa hacia y desde los Países Bajos.

3.5 Usos de la biomasa en Países Bajos

La biomasa se utiliza principalmente como alimento para animales en los Países Bajos. También se utiliza para el suministro de energía, en alimentos humanos, materiales (papel, plásticos, productos de madera) y productos químicos. Los flujos de residuos orgánicos como el papel de desecho se utilizan ahora en la producción de papel y los desechos orgánicos y el estiércol como agentes de mejora del suelo (compost). La Figura 6 contiene una matriz que muestra los principales flujos de biomasa doméstica y residuos orgánicos así como su aplicación en los Países Bajos. Las importaciones y exportaciones se han añadido a la matriz de la Figura 7.

Flujos para el primer uso	Suministro	Suministro	Aplicaciones											
	kton MS / año	kton MS / año	Consumo humano	Alimentación animal	Biogás	Energía Electricidad y calor	Combustible de transporte	Papel y cartón	Madera	Plásticos	Ropa de cama para animales	Químicos	Compost y mejora del suelo	
Granos incl. ensilaje de maíz	5510													
Remolacha azucarera	1375													
Patatas	1200													
Hierba	11530													
Madera	980													
Biomasa de entorno natural	1962													
Residuo húmedo flujos de la agricultura	1623													
Residuo seco flujos de la agricultura	1300													



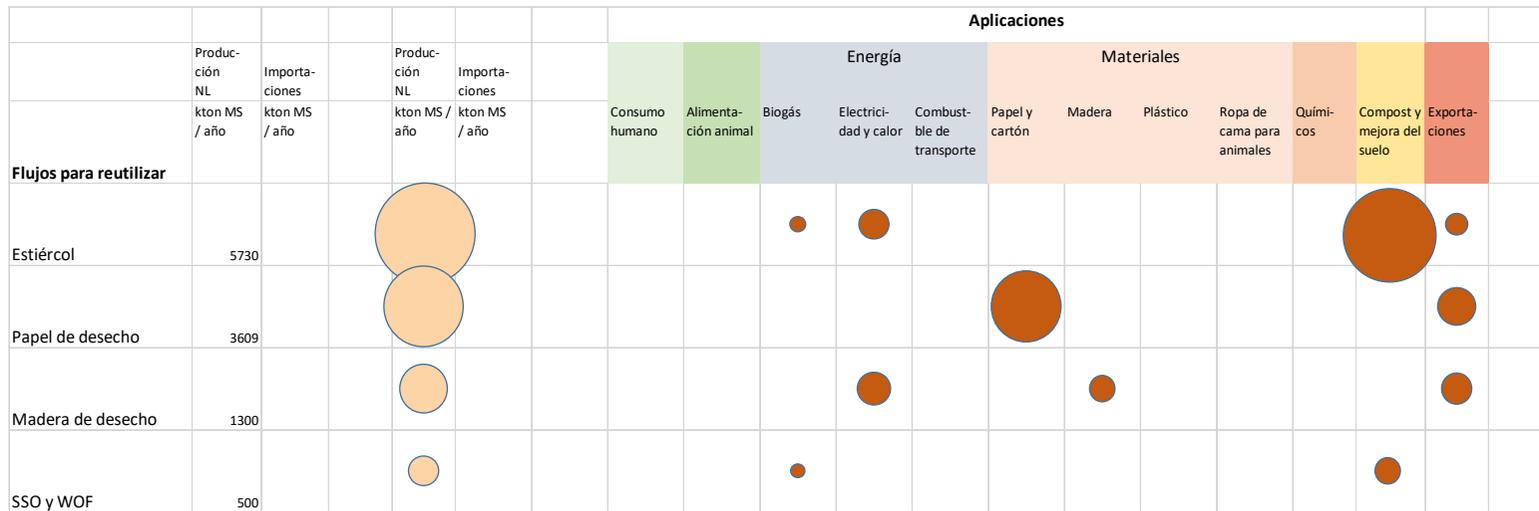


Figura 7. Las principales flujos de biomasa de importación, exportación y producción nacional y sus principales aplicaciones.¹⁷ Los flujos especificados se muestran a la izquierda junto con el tonelaje anual de materia seca. La matriz muestra el uso en los Países Bajos más las exportaciones. El tamaño de los discos se correlaciona con el tonelaje. Los flujos de residuos se producen como resultado de dicho uso, que se muestran en la parte inferior izquierda. Se ha asignado una nueva aplicación a estos flujos en una de las categorías de matriz.



Figura 8. Los Países Bajos son un importante país de tránsito para diversas mercancías, incluida la biomasa.

En los Países Bajos se recolectan anualmente alrededor de 25.000 kton (MS) de biomasa. El flujo de biomasa más grande es el hierba (11.530 kton), que se utiliza casi en su totalidad como alimento para animales. La segundo flujo de biomasa está formado por cereales y maíz para ensilaje, que en conjunto representan 5.510 kton de MS al año, de los cuales 4.200 kton se utilizan en alimentación animal y 1.200 kton para la producción de bioethanol.^{23,24}

Después de su uso, surgen flujos de residuos orgánicos como el estiércol (5.730 kton MS al año), la mayor parte del cual se usa para mejorar el suelo y un pequeño porcentaje se usa como materia prima para la producción de biogas.¹⁰ Los 3.609 kton anuales de papel de desecho (MS) se utilizan principalmente para producir carton.²⁵ Las principales flujos de biomasa, tanto las importaciones como las exportaciones y la producción nacional, se muestran en la Figura 7. También muestran las principales aplicaciones de esos flujos. En 2016, los Países Bajos importaron 50.000 kton de biomasa (peso seco) (ver Tabla 8). La biomasa importada a la que se hace referencia en la Figura 7 representa 35.500 kton MS. El veintinueve por ciento de la biomasa importada (14.500 kton MS) aún no se ha especificado e incluye alimentos procesados, lácteos, desechos domésticos, plantas ornamentales, textiles (algunos cientos de kton), artículos de cuero y cacao. Además del uso como alimento para animales, las exportaciones constituyen el segundo uso más importante de biomasa. Estas exportaciones son en parte mercancías en tránsito y en parte productos producidos en los Países Bajos.

La Figura 6 muestra la producción nacional de los distintos tipos de biomasa y para qué se utilizan. El tamaño estimado de la bioeconomía holandesa se puede derivar de esta figura. En 2016, la participación de la biomasa en aplicaciones de energía, productos químicos, papel y plásticos, excluidos los productos de exportación, pero incluidas las materias primas de los Países Bajos y del extranjero, ascendió a más de 10.000 kton MS al año. Si se incluyen alimentos para animales, esa cifra es mucho mayor. Entonces, ¿cuál es el consumo total de biomasa en los Países Bajos? Basándonos en los datos añadidos en la Tabla 8, ya se había estimado el consumo anual total de productos de biomasa en 43.000 kton MS al año. Con base en las cifras subyacentes en la Figura 6 (no visible), también se puede hacer una estimación del consumo, incluidos los alimentos para animales y humanos, pero excluyendo los flujos de reciclaje y las exportaciones. También llegamos a 43.000 kton MS al año, de los cuales la alimentación animal representa alrededor de 30.000 kton y la alimentación humana más de 3.000 kton.



Figura 9. La soja importada es actualmente una fuente importante de alimento para animales.

3.6 Conclusiones

El consumo anual total de biomasa y productos de biomasa, incluidos los alimentos y forraje, pero excluyendo los flujos de reciclaje, es de alrededor de 43.000 kton MS. Alrededor de 30.000 kton de esa cantidad se utilizan para la alimentación animal y 3.000

kton para la alimentación humana. El tamaño de la bioeconomía holandesa (energía, plásticos, papel y productos químicos) es de alrededor de 10.000 kton de biomasa MS al año. En comparación, los Países Bajos utilizan anualmente alrededor de 76.500 kton de fuentes de carbono fósil, principalmente para el suministro de energía. El tránsito de estas fuentes fósiles incluso triplica esa cantidad. Por lo tanto, la economía holandesa del carbono gira en torno a las fuentes fósiles, la alimentación animal y los bienes en tránsito. La nueva bioeconomía, principalmente las aplicaciones de la biomasa en energía, química y plásticos, es todavía pequeña.

4 Demanda de biomasa para la bioeconomía

4.1 Introducción

Las materias primas fósiles, especialmente el carbón, el petróleo y el gas natural, juegan un papel importante en nuestra sociedad. El carbón se usa principalmente para generar electricidad y calor. El petróleo se usa principalmente para fabricar combustibles de transporte, productos químicos y plásticos. Y el gas natural se usa para electricidad y calor, y para la producción de amoníaco (para la producción de fertilizantes). El sector de la energía y los combustibles es, por mucho, el mayor usuario de materias primas fósiles con una demanda alrededor de diez veces mayor que la de productos químicos y materiales.

Se necesitará un tiempo y un esfuerzo considerable para sustituir totalmente estas materias primas fósiles. En su Hoja de Ruta Energética 2050, la UE propone satisfacer al menos el 55% de la demanda de energía utilizando fuentes renovables, el 32% utilizando fuentes fósiles, pero con almacenamiento de carbono, y el resto utilizando energía nuclear.²⁶ Este es uno de los muchos escenarios para la sustitución de materias primas fósiles. Las empresas, las instituciones del conocimiento, las autoridades públicas, las asociaciones sectoriales y las ONG han desarrollado una serie de escenarios, a menudo con los años 2030 y 2050 como horizonte temporal. Los escenarios difieren en términos de la medida en que las fuentes fósiles deben ser sustituidas (todas o solo una parte) y el papel que debe desempeñar la biomasa (además



Figura 10. Las virutas de madera son una materia prima para múltiples procesos.

de la energía solar o eólica, por ejemplo). Los escenarios en los que se asigna un papel limitado a la biomasa a menudo están dictados por la incertidumbre sobre la disponibilidad de la suficiente biomasa sostenible en el futuro. Ese futuro es difícil de predecir, porque ¿cómo se desarrollará la demanda de energía, químicos y materiales si no solo aumenta el tamaño de la población, sino también la eficiencia energética y el reciclaje de materiales? Hay varios escenarios orientados a este desarrollo. En estos escenarios juegan un papel importante tanto para la sustitución de fuentes fósiles como el uso más eficiente de la energía. Se pueden obtener ganancias de eficiencia considerables particularmente mejorando el aislamiento térmico en casas.

En este capítulo, los distintos escenarios de reemplazo se han pasado por alto inicialmente al estimar cuánta biomasa se necesitaría para sustituir completamente el consumo actual de materias primas fósiles (apartado 4.2). La sustitución completa de materias primas fósiles por biomasa es básicamente un ejercicio de actitud porque no es realista. Basándonos en escenarios seleccionados de crecimiento y reemplazo, posteriormente se estima que tan grande podría ser la demanda en el año 2050 (apartado 4.3). A esto le sigue la estimación de cuánta biomasa puede estar disponible en los Países Bajos, Europa y en todo el mundo en 2050* (apartado 4.4). El apartado 4.5 explica por qué es tan importante la movilización de la biomasa. Este capítulo concluye con una descripción general total de los escenarios discutidos.

4.2 Escenario 1: sustitución de materias primas fósiles por biomasa únicamente, según el uso actual

4.2.1 Países Bajos

El capítulo 3 establece que los Países Bajos utilizó 2.864 PJ de materias primas fósiles en 2017, de los cuales 585 PJ se utilizaron para aplicaciones no energéticas. Además, se utilizaron 123 PJ de biomasa para suministrar energía y 10 PJ de biomasa para productos químicos y plásticos. Estas cifras se muestran en la Tabla 10 y se convierten en Mton de biomasa. Con base en las reglas de cálculo presentadas anteriormente, se estima que se necesitarán 152 ± 20 Mton de biomasa de MS adicionales para el reemplazo completo de las materias primas fósiles. Esto representa la demanda para el nivel de consumo de 2017. La biomasa utilizada para papel, productos de madera, alimentación animal y consumo humano asciende a 34 Mton y no se incluye en este cálculo.

* Los Países Bajos importan biomasa y la disponibilidad de biomasa no puede verse de manera aislada de las necesidades y planes de Europa y del resto del mundo. Si el resto del mundo también quiere minimizar el uso de materias primas fósiles, esto tendrá consecuencias para los Países Bajos. Por tanto, este capítulo incluye la demanda europea y mundial de biomasa.

Metodología para convertir PJ a Mton de biomasa

Aplicaciones energéticas

La energía contenida en las materias primas fósiles y la biomasa se expresa en PJ. Los pellets de madera de abeto, el modelo de biomasa que utilizamos para los cálculos de este capítulo, contienen 18,79 MJ / kg de materia seca (MS), o 18,79 PJ / Mton.¹⁶ Este es el poder calorífico neto o poder calorífico inferior. En este folleto se utiliza un factor de conversión de 18,79 PJ / Mton de biomasa para convertir PJ en biomasa para aplicaciones energéticas.

Aplicaciones no energéticas

También existe una conexión entre el peso y el contenido energético de los combustibles fósiles. Es útil expresar primero el peso en MTEP (millones de toneladas de equivalente de petróleo). Esto implica convertir todas las cantidades, incluidos el gas y el carbón, en toneladas de petróleo con el mismo contenido energético. El contenido de energía es 42 PJ / MTEP.²⁷

La sustitución de materias primas fósiles por biomasa en la industria química debe abordarse con prudencia. Una parte importante de la industria petroquímica se dedica a la producción de plásticos, de los cuales el polietileno y el polipropileno representan una parte importante (alrededor de la mitad). Si todos estos plásticos y productos químicos tienen que fabricarse a partir de biomasa, el peso de la biomasa necesaria (materia seca) será mayor que el peso del producto. Esto se debe a las diferencias en la naturaleza del producto y la materia prima (los productos contienen menos átomos de oxígeno que la materia prima) y por eficiencias de conversión limitadas. Sin embargo, se pueden conseguir dos mejoras de eficiencia:

- Si logramos asignar productos químicos y plásticos que contienen un mayor porcentaje de oxígeno como poliésteres, un área de aplicación más grande a expensas de los productos químicos con bajo contenido de oxígeno, se necesitará menos biomasa para producir la misma cantidad de productos químicos.²⁸
- Si la materia prima se parece más al producto, las pérdidas serán menores y la biomasa se utilizará de manera más eficiente.

Según Bos y Sanders²⁹ estas mejoras de eficiencia pueden reducir la biomasa necesaria (materia seca) en un 40%. Los procesos de biorrefinación finalmente producen corrientes de residuos que, aunque no son aptas para extraer productos, contienen energía. Estas corrientes de residuos se pueden utilizar para suministrar energía a los procesos de biorrefinación. Con todas estas mejoras de eficiencia, se puede producir 1 Mton de productos químicos básicos a partir de 2,2 Mton de biomasa de MS. Esta es la cantidad contenida en los productos. Además, la biomasa sigue siendo necesaria para obtener la energía necesaria para convertir esos componentes básicos en productos químicos.

En este folleto se utiliza un factor de conversión de 42PJ / MTEP para convertir PJ en biomasa para aplicaciones no energéticas multiplicado por el factor 2.2 indicado anteriormente para llegar a Mton de biomasa.

Tabla 10. Uso de materias primas (fósiles y renovables) en los Países Bajos (datos de 2017) y la cantidad calculada de biomasa necesaria para sustituir todas las materias primas fósiles.

Materia prima	Cantidad de equivalentes de masa (MTEP)	Cantidad de energía (PJ)	Cantidad de biomasa (Mton)	Porcentaje (%)
Fósil				
Aplicación no energética	14	585	31 ±4	18,6
Aplicación de energía	54	2,279	121 ±16	72,6
<i>Total</i>	<i>68</i>	<i>2,864</i>	<i>152</i>	<i>91,3</i>
Renovable				
Biocombustibles y químicos	3,2	133	7.1	4,2
Otro		49		
<i>Total</i>	<i>4,3</i>	<i>182</i>	<i>7.1</i>	<i>5,8</i>
Fuentes nucleares y otras	2,2	91		2,9
Total	74,5	3.137	159 ±20	100

4.2.2 UE

El uso de materias primas fósiles en la UE para 2016 se resume en la Tabla 11. En comparación con los Países Bajos, la UE utiliza un porcentaje menor (de la demanda de materias primas para energía, productos químicos y materiales) de materias primas fósiles. Este ha sido siempre el caso porque hay más posibilidades de utilizar energía hidroeléctrica y biomasa en muchos países de la UE. Para sustituir toda la materia prima fósil por biomasa, se necesitará anualmente una cantidad adicional de 2.898 Mton de biomasa MS para un nivel de consumo equivalente al de 2016.

Tabla 11. Uso de materias primas (fósiles y renovables) en Europa (EU 28, datos de 2016) y la cantidad calculada de biomasa necesaria para sustituir toda la materia prima fósil.³⁰ (Estimaciones / extrapolaciones basadas en Bos & Sanders).²⁹

Materia prima	Cantidad de equivalentes de masa (MTEP)*	Cantidad de energía (PJ)*	Cantidad de biomasa (Mton)	Porcentaje en los Países Bajos (%)	Porcentaje en UE28 (%)
Fósil					
Aplicación no energética	85 ±30	3.570 ±1.300	187 ±68		
Aplicación de energía	1.213	50.946	2.711 ±350		
<i>Total</i>	<i>1.300 ±30</i>	<i>54.600 ±1.300</i>	<i>2.898</i>	<i>91,3</i>	<i>75,2</i>
Renovable					
Biocombustibles y químicos	83	3.486	186 ±24	4,2	4,8
Otro		5.376			
<i>Total</i>	<i>211</i>	<i>8.862</i>		<i>5,8</i>	<i>12,2</i>
Fuentes nucleares y otras	217	9.114		2,9	12,6
Total	1.728 ±30	75.576 ±1.300	3.084 ±400	100	100

*UE28

4.2.3 Mundo

La Tabla 12 contiene una descripción general de la cantidad de materias primas fósiles y la cantidad de otras materias primas y fuentes de energía utilizadas en todo el mundo en 2016.

Tabla 12. Uso de materias primas (fósiles y renovables) en todo el mundo (datos de 2016)^{31,32} y la cantidad calculada de biomasa necesaria para sustituir todas las materias primas fósiles.

Materia prima	Cantidad de equivalentes de masa (MTEP)	Cantidad de energía (PJ)	Cantidad de biomasa (Mton)	Porcentaje en los Países Bajos (%)	Porcentaje en el mundo (%)
Fósil					
Aplicación no energética	870	37.000	1.938 ±250		
Aplicación de energía	10.373	436.000	23.203 ±3,000		
Total	11.243	472.000	25.141	91,3	81,7
Renovable					
Biocombustibles y químicos	1.349	67.000	3.566 ±465	4,2	9,8
Otro		14.000			
Total	1.926	81.000		5,8	13,4
Fuentes nucleares y otras	669	28.000		2,9	4,9
Total	13.761*	578.000	28.707 ±3.700	100	100

* El consumo mundial de energía ascendió a 9.555 MTEP. Se trata de un consumo menor que la cantidad total de materias primas indicada en esta tabla.³² Los rendimientos limitados de las centrales eléctricas y las calderas, el consumo de energía de las propias empresas de energía y las pérdidas explican la diferencia.

Si todas las materias primas fósiles deben ser sustituidas por biomasa, el mundo necesitaría una biomasa adicional de 25.141 Mton de MS al año. En comparación, el uso actual asciende a alrededor de 22.000 Mton al año (ver Figura 28). Esa cantidad se aplica al nivel de consumo del año 2016. Un reemplazo a gran escala de materias primas fósiles por biomasa no es realista. En el próximo capítulo se presenta una imagen más matizada.

4.3 Escenario 2: la demanda de biomasa que se espera para sustituir completamente las materias primas fósiles por una combinación de fuentes renovables en 2050

4.3.1 Tendencias

Dado que es complicado hacer predicciones, los escenarios de crecimiento económico y el grado en que se puede crear una economía circular y sostenible varían. Este apartado presenta unos escenarios en los que la biomasa juega un papel importante. A continuación, analiza hasta qué punto la enorme demanda de biomasa puede ser cubierta por la disponibilidad de biomasa.

Deben tenerse en cuenta las siguientes tendencias:

- Los agricultores argumentan que no es necesario expandir el área agrícola en el mundo en el futuro para seguir alimentando al mundo, aunque la población aumente. Esto se logrará mejorando la eficiencia agrícola y combatiendo el desperdicio de alimentos. Por lo tanto, se necesitarán más nutrientes (estiércol o fertilizantes químicos), lo que podría impulsar la demanda de energía.
- La demanda de materiales y productos químicos se atenderá cada vez más a través del reciclaje, lo que reducirá la necesidad de materias primas vírgenes (a menos que un brote de crecimiento económico anule este efecto).
- La energía renovable no solo consistirá en biomasa, sino también en energía solar y eólica. La distribución entre las diversas fuentes depende de los avances tecnológicos, incluido el almacenamiento de energía.
- Los programas de ahorro de energía (como el aislamiento en edificios), las mejoras tecnológicas (consumo de energía de los vehículos, eficiencia de la central eléctrica, bombas de calor) y los cambios en el estilo de vida (viajar menos en avión y en carretera) pueden tener un impacto considerable en el consumo de energía.
- La participación de la electricidad en la energía aumentará.
- Se espera que la industria química esté parcialmente electrificada (hidrógeno como materia prima, producido por electrólisis con CO₂ como segunda materia prima).
- La población y la economía crecerán.
- El consumo de carne por habitante está aumentando en los países en desarrollo, pero está disminuyendo en los países desarrollados.

4.3.2 **Países Bajos**

En 2050, los Países Bajos también necesitarán una cantidad considerable de biomasa para productos químicos y energía. La Real Asociación de la Industria Química Holandesa (VNCI) presentó un plan que describe cómo la industria química holandesa puede lograr la reducción del 80-95% en emisiones de gases de efecto invernadero en 2050, en línea con el Acuerdo Climático de París.³³ El plan tiene en cuenta una mayor reutilización y reciclaje de materiales. Describe una serie de posibles escenarios, uno de los cuales asigna un papel clave a la biomasa. El escenario VNCI supone que la biomasa se utilizará para la producción de productos químicos tradicionales como compuestos C_2 y C_3 , metanol y BTX. No se han incluido las posibles mejoras de eficiencia derivadas de optar por otros productos químicos básicos. En este escenario, se estima que la industria química holandesa requiere 700 PJ (37 Mton MS) de biomasa como materia prima y fuente de energía.

Un estudio de 2018 de De Gooijer³⁴ proporciona una estimación de la cantidad de biomasa que los Países Bajos necesitan en 2050 para la producción de energía. La biomasa deberá suministrar una gran parte de la energía. La proporción de energía eólica será limitada debido a la gran superficie requerida para albergar parques eólicos. Además, el uso de energía solar y eólica se verá limitado por la producción fluctuante (estaciones, día / noche, sin viento) y la falta de sistemas de almacenamiento de energía asequibles. Se estima que la cantidad de energía necesaria por los Países Bajos en el año 2050 para la generación de energía, incluida la movilidad y el abastecimiento de combustible (buques y aviones), excluida la proporción de materias primas químicas, es de 4.266 ± 2.300 PJ. De Gooijer propone obtener 2.200 ± 1.200 PJ de biomasa, lo que equivale a 117 ± 64 Mton MS. El amplio margen es atribuible a varios escenarios centrados en el crecimiento del ahorro y el consumo. En este escenario, el 25% de la parte holandesa del Mar del Norte está ocupada por turbinas eólicas que generan en conjunto 1346 PJ y el rendimiento producido por la energía solar se estima en 470 PJ y 250 PJ lo proporcionan otras formas de energía renovable.

Si los dos estudios se agregan (la demanda de energía del sector químico no debe contabilizarse dos veces; es de alrededor de 320 PJ), los Países Bajos necesitan 137 ± 64 Mton de biomasa de MS en el año 2050. Sin embargo, si se consiguen importantes ahorros de energía, incluso existe la posibilidad de que apenas necesitemos biomasa para suministrar energía, aunque seguirá siendo necesaria para la industria química.

4.3.3 **UE**

De acuerdo con la Hoja de Ruta de la Energía para 2050,²⁶ la UE necesitará 71.400 ± 3.000 PJ de la energía en 2050. Esta estimación tiene en cuenta un escenario de medidas de política adoptadas en 2012. Una parte de la energía se obtendrá de fuentes distintas a la biomasa. En 2016, las otras fuentes representaron 14,490 PJ. Si



Figura 11. Grandes expectativas para las algas.

el resto lo proporcionará la biomasa y sumamos la demanda de biomasa estimada para la industria química europea (120 Mton), la EU28 necesitará 3.150 ± 200 Mton de biomasa de MS en 2050. Este es un escenario extremadamente orientado a la biomasa. El crecimiento del sector de la energía eólica y solar reducirá la demanda de biomasa. Además, si se logran mayores ahorros de energía (en comparación con las medidas concebidas en 2012), se necesitará menos biomasa.

4.3.4 Mundo

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se estima que la población mundial alcanzará los 9.800 millones en 2050.³⁵ El consumo mundial de alimentos aumentará de 1.482 Mton MS en 2011 a 2.059 Mton en 2050.³⁶ La producción de los productos básicos más importantes los productos químicos se multiplicarán por 2,4, según una tasa de crecimiento anual prevista del 2,5%.³⁷ Si el crecimiento es menor o mayor, este factor también será menor o mayor. Si este factor también se aplica a todas las aplicaciones no energéticas de fuentes fósiles, se espera que la demanda de materias primas fósiles para la industria química sea de 87,690 PJ en 2050. La cantidad de biomasa requerida en 2050 para reemplazar esa cantidad, incluidas las mejoras de eficiencia descritas anteriormente, será de 4.600 ± 400 Mton MS.

Tabla 13. Recopilación de los datos de los estudios descritos.

Fuente	Materia prima demanda (PJ)	Demanda de biomasa (Mton)	Comentarios
VNCI (2018)	700	37 (convertido)	Para la industria química NL (materia prima y fuente de energía) en 2050
De Gooijer (2018)	2.200 ± 1200, de los cuales 1.346 eólicas, 470 solares, otros 250	117 ± 64 (convertido)	Para energía (incl. Movilidad y bunkering) NL en 2050
	4.646	137 ± 64 (convertido)	Energía y químicos NL en 2050
EU (2012)	71.400 ± 3.000	3.800 (convertido)	Para la energía de la UE en 2050
	14.490	771 (convertido)	Energía UE real (no siendo biomasa) en 2016
		3.150 ± 200 (convertido)	Energía y químicos UE en 2050
FAO (2016)		1.482	Alimentos para el mundo actual en 2011
		2.059	Alimentos para el mundo en 2050
Bos y Broeze (2019)	87.690	4.600 ± 400	Productos químicos para el mundo en 2050
Shell, IEA, Exxon	800.000 ± 400.000		Energía global total demanda en 2050

También se necesitará más energía. Bos y Broeze³⁷ han utilizado una cifra promedio basada en varias estimaciones muy divergentes de Shell, IEA y Exxon Mobil, entre otros, para la cantidad total de energía necesaria en 2050. Ascende a 800.000 PJ, o expresado con mayor precisión: 800.000 ± 400.000 PJ. Actualmente, el 9% de la demanda mundial de energía se cubre con fuentes distintas de las fuentes fósiles y la biomasa.

La Tabla 13 contiene una recopilación de las estimaciones derivadas de los estudios descritos.

4.4 Disponibilidad de biomasa

4.4.1 *Los Países Bajos*

En un informe de 2009, Koppejan *et al.* estimaron la disponibilidad de biomasa holandesa para electricidad y calor en 2020.³⁸ Elaboraron cuatro escenarios diferentes pero realistas, basados en estudios de CPB (Oficina de Análisis de Política Económica de los Países Bajos) orientados a diversos desarrollos sociales. Estos escenarios diferían según el grado de apertura o cierre de los mercados y el nivel de importancia de la sostenibilidad. Se suponía que el énfasis en la sostenibilidad estaría vinculado a un menor crecimiento económico. El estudio se centró en la biomasa que se puede disponer para una aplicación energética, separada de las aplicaciones existentes en la alimentación animal, el consumo humano y los materiales, por ejemplo. La biomasa tenía que ser apta para su uso como materia prima para fermentación, combustión, etc. No se incluyeron los biocombustibles líquidos.

En la situación real en 2009, se disponía de 125 PJ de biomasa que, en principio, podría utilizarse para la generación de energía, pero solo el 40% (50 PJ) de la misma se utilizó realmente para ese fin. La expectativa de los autores para 2020 era que se pudieran tener disponible $15 \pm 1,5$ Mton de biomasa de MS (282 PJ) para generar energía. Las principales contribuciones serían el estiércol sólido, la madera vieja o procesada y la fracción restante de los desechos domésticos. Aunque el cultivo de cultivos energéticos está incluido en el estudio, no juega un papel importante en ninguno de los escenarios, mientras que la biomasa acuática juega un papel menor. Desde una perspectiva de 2019, este es un escenario bastante preciso.

Las mayores cantidades de biomasa podrían estar disponibles en un escenario donde existe una fuerte voluntad para optar por la sostenibilidad. La apertura del mercado global tiene un ligero efecto positivo sobre de toda la biomasa adicional disponible, además de un modesto efecto sobre el tipo de biomasa utilizada. Como este estudio se centró en la biomasa apta para generación de electricidad y calefacción, la cantidad total de biomasa disponible será mayor. En 2016, se utilizaron más de 6 Mton de biomasa MS para energía, de la cual la biomasa doméstica representó 4,5 Mton. Esto es inferior a los 15 Mton indicados, lo que significa que todavía hay espacio para la expansión. La cantidad de biomasa doméstica utilizada en 2016 fue superior a los 50 PJ realmente utilizados en 2009. Un estudio más reciente fue realizado por Schulze *et al.*³⁹ También se centra en el potencial de biomasa disponible gratuitamente para el sector energético, excluidas las importaciones, pero con horizontes de 2023 y 2035. Los hallazgos corroboran las estimaciones realizadas anteriormente.

4.4.2 **UE**

En 2012, Ros *et al.*⁴⁰ hicieron una estimación del potencial de biomasa en la UE27 para aplicaciones en bioenergía y bioquímicos. Esto nuevamente se relaciona con las cantidades de energía contenidas en la biomasa y la biomasa que podría liberarse de manera realista y, además, de una manera respetuosa con el medio ambiente. La estimación se refiere al año 2030 y asciende a 12.000 ± 2.000 PJ, de los cuales 6.000 PJ son de agricultura y horticultura, 1.800 PJ de silvicultura y 4.000 PJ de residuos. Esto equivaldría a 640 ± 100 Mton MS de biomasa.

En 2010, Elbersen *et al.*⁴¹ estimaron que en la UE estarían disponibles 362 Mton de biomasa de MS en 2030 en forma de subproductos de agricultura y silvicultura, y que sería posible cultivar 184 Mton de MS más.

4.4.3 **Mundo**

El Informe SCOPE de 2015⁴² establece que en 2015 se dispuso de 10.000 Mton (peso húmedo o fresco) de producción real de cultivos energéticos, flujos de residuos agrícolas y residuos forestales, lo que probablemente equivale a unos 100.000 PJ al año. El informe establece que se deberían poner a disposición 50-200 millones de hectáreas adicionales de tierra para el cultivo energético para el año 2050. ¿Existe esto? El mundo tiene una superficie terrestre de 13 mil millones de hectáreas, de las cuales 1.500 millones se utilizan para fines agrícolas y hortícolas. Los 50-200 millones de hectáreas adicionales podrían realizarse en África subsahariana y en América del Sur. Los cultivos de estas zonas de cultivo pueden producir 150.000 ± 50.000 PJ al año de biomasa. El informe propone utilizar 40-50 millones de hectáreas para biocombustibles convencionales (de cultivos de almidón y aceite de palma) y el resto para el cultivo de cultivos de lignocelulosa. Hay aún más potencial para 2050, según el informe. Al hacer un uso más eficiente de los pastizales (para la ganadería), se podría crear una superficie adicional de tierra para el cultivo energético (215.000 ± 75.000 PJ al año) y el uso de parcelas de tierra secas y marginales podría producir otros 80.000 PJ al año. El potencial total para 2050 podría ser de 550.000 ± 200.000 PJ al año.

El Informe SCOPE es un trabajo sólido y completo, con 779 páginas y 137 autores de 24 países. Sin embargo, hay más estudios. Se han realizado estimaciones en otros estudios, que van desde menos de 100.000 PJ al año si solo se incluyen residuos hasta 1.500.000 PJ al año para escenarios extremos. Dornburg *et al.*⁴³ proporcionaron una descripción general de estos estudios en 2010 y mantienen la disponibilidad de la biomasa en un promedio de 350.000 ± 150.000 PJ / año, tomando en cuenta el uso de residuos como base y el uso de madera forestal aún no utilizada para productos de madera, más el cultivo en nuevas tierras que se liberan, como resultado de optimizar la eficiencia agrícola existentes en la tierra. Lo que resultaría en una cantidad de 350.000 PJ equivale a 18.600 Mton de biomasa MS.

Sigue siendo incierto si esa cantidad puede estar disponible realmente. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) puede aceptar una disponibilidad ligeramente menor. El IPCC publicó un informe sobre el calentamiento global que contiene escenarios para limitar el aumento de temperatura a 1,5°C. En uno de los escenarios, se utiliza una cantidad relativamente grande de biomasa en el año 2050. Es un escenario marcado por un nivel relativamente alto de crecimiento económico y consumo de alimentos. El mundo necesitará 700.000 PJ (de energía primaria), de los cuales 291.000 PJ serán producidos por biomasa. La energía restante se obtendrá del sol, el viento, los núcleos atómicos y las fuentes fósiles. La captura y el almacenamiento de carbono también se utilizan para reducir las emisiones de dióxido de carbono (véase el apartado 6).⁴⁴ Ese escenario del IPCC tiene en cuenta el uso de más de 15.000 Mton MS / año de biomasa.



Figura 12. La palma aceitera es una fuente de alto rendimiento de corrientes de aceite y residuos, pero existe cierta preocupación sobre la sostenibilidad del cultivo.

La cantidad de biomasa sostenible que se predice que estará disponible en 2050 depende de los supuestos ampliamente divergentes de los numerosos estudios. Además, la atención se centra en la disponibilidad potencial. Todo depende de las acciones que se emprendan para movilizar realmente la biomasa y establecer la política adecuada. Hemos utilizado provisionalmente las cifras consideradas realistas por el IPCC: 15.000 Mton MS al año de biomasa, o 282.000 PJ.



Figura 13. El miscanthus es un cultivo de biomasa de alto rendimiento.

4.5 La movilización de biomasa es crucial

Además de la disponibilidad potencial de biomasa, la movilización de biomasa es otra consideración importante. Actualmente, hay muchos residuos agrícolas y forestales así como flujos de desechos que no se utilizan porque se dejan en la tierra o se incineran al aire libre. Si se fomenta que los propietarios de biomasa ponga a disposición esta biomasa, se podrían movilizar grandes cantidades. Los agricultores pueden incluso empezar a tener en cuenta posibles ventas de residuos adaptando sus métodos de trabajo, maximizando así la cantidad de biomasa que puede estar disponible para la bioeconomía. La mejor manera de satisfacer las expectativas de ventas es asegurarse de que se lanzan al mercado grandes cantidades de productos semiacabados uniformes y comercializables (materias primas). Estos productos básicos de biomasa deben llevar una certificación de sostenibilidad, ser transportables a grandes distancias y estar disponibles para su compra por parte de múltiples clientes en múltiples sectores. Por ejemplo, los pellets de madera, el aceite de pirólisis o los pellets hechos de bagazo lavado sin minerales. Los minerales pueden devolverse a las plantaciones locales y los gránulos compactos pueden ser enviados y comprados por compañías de energía y biorrefinerías. Se puede asignar un papel como producto básico al aceite de pirólisis o la biomasa torrificada limpia (véase el apartado 5). El sector energético liderará la forma en la compra de estos productos básicos y, a raíz de este desarrollo, las biorrefinerías tendrán la oportunidad de asumir esta oferta con seguridad de suministro.

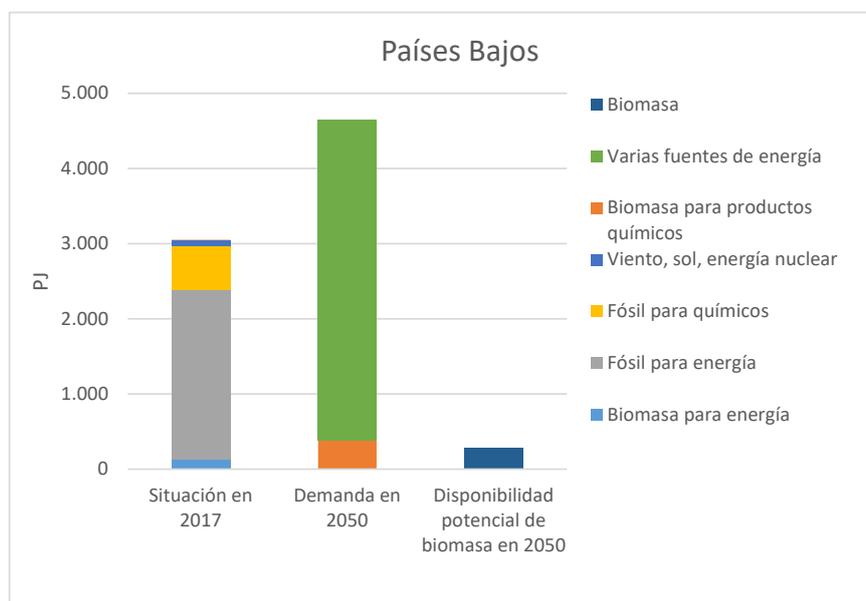


Figura 14. Materias primas para el suministro de energía y productos químicos para los Países Bajos en 2017 (real) y 2050 (estimación).

La presencia de grandes cantidades de materias primas de biomasa comercializables internacionalmente ofrece certeza tanto a los propietarios como a los usuarios de biomasa. Se requiere certeza para movilizar flujos de biomasa.

4.6 La demanda de biomasa frente a la disponibilidad

Si los Países Bajos sustituyeran todas las materias primas de combustibles fósiles con biomasa hoy en día se necesitaría más biomasa que las cantidades requeridas en 2050, de acuerdo con varios escenarios. Esto se debe a que para 2050 se tiene en cuenta el aumento de la eficiencia en muchas áreas y el uso cada vez mayor de otras fuentes de energía renovable en los Países Bajos. La Figura 14 proporciona una comparación de la cantidad de materias primas para la energía y productos químicos en 2017 con la demanda y disponibilidad en 2050. De esta figura se desprende que deben desarrollarse otras fuentes renovables.

Los datos de 2016 para Europa (Tabla 11) y las estimaciones de 2050 (Tabla 13) son muy similares. Una vez más, Europa tendrá que hacer todo lo posible para lograrlo. Mientras la economía crece, la demanda de materias primas debe estabilizarse considerablemente.

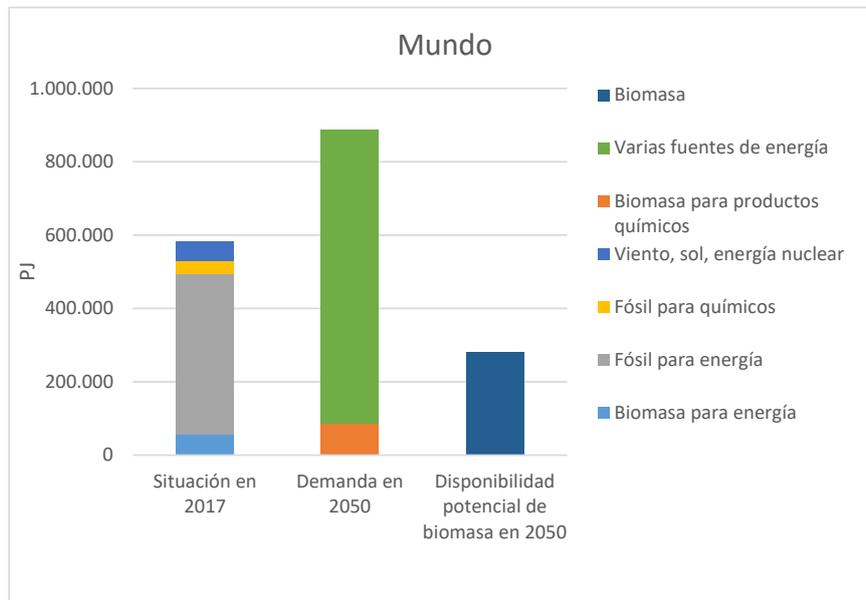


Figura 15. Materias primas para el suministro de energía y productos químicos para el mundo en 2017 (real) y 2050 (estimación).

Esto aún no es evidente a escala mundial. Debido al crecimiento de la población y al aumento de la prosperidad, todavía parece que se necesitará una cantidad considerable de materia prima en 2050. La Figura 15 muestra que todo el mundo podría abastecer parte de la demanda de materias primas para productos químicos, materiales y energía a partir de biomasa en 2050. Por lo que es esencial desarrollar nuevas técnicas agrícolas y de biorrefinación y utilizar tierras marginales. Aproximadamente dos tercios de la energía deberán producirse a partir de otras fuentes renovables. Si dos tercios se pueden producir con éxito utilizando energía eólica, solar e hidroeléctrica, se podría disponer potencialmente de suficiente biomasa a escala mundial. Esto ofrece a los Países Bajos el argumento y el alcance para importar biomasa. Estas importaciones serán un orden de magnitud mayor que la biomasa que se puede liberar a nivel nacional para energía y productos químicos, y aproximadamente el doble de las importaciones actuales de biomasa (incluidos cereales, cultivos oleaginosos y madera). La biomasa se importará en gran medida de fuera de la UE porque la UE se enfrentará de manera similar a una escasez de biomasa. Por lo tanto, los Países Bajos también podrían desempeñar un papel importante como país de tránsito de biomasa. En ese caso, el flujo de importación de biomasa podría ser potencialmente mayor que las importaciones actuales de combustibles fósiles.

5 Tecnologías de procesamiento de biomasa

5.1 Introducción

La biomasa debe procesarse para ser usada en productos químicos, energía y materiales. Hay disponible una gama de tecnologías de conversión y separación para este propósito, así como procesamiento mecánico (como la reducción de tamaño). Las tecnologías de conversión se pueden dividir en los siguientes procesos:

- Procesos biológicos en los que microorganismos o enzimas convierten los componentes de la biomasa en otros componentes.
- Procesos termoquímicos en los que la biomasa se descompone en sustancias utilizables a alta temperatura.
- Procesos químicos en los que los componentes de la biomasa se convierten en otros componentes utilizando un catalizador y/o reaccionando con un reactivo añadido.

Este capítulo describe los procesos de conversión probados más importantes y analiza brevemente los procesos mecánicos y de separación. Las tecnologías que todavía se encuentran en gran parte en la etapa de desarrollo se describen en el apartado 6.

5.2 Proceso mecánico

Por lo general, es necesario reducir el tamaño de la biomasa cruda antes de su procesamiento posterior. Se puede cortar y moler para este propósito. Para algunos procesos, la biomasa incluso debe ser bombeable, lo que significa que debe reducir considerablemente su tamaño y dispersarse en un líquido. El prensado es otro proceso mecánico y separa el jugo o el aceite de la sustancia sólida.

Los procesos mecánicos se utilizan a menudo cuando se producen materiales que incorporan biomasa. Un ejemplo es la extrusión en la que los componentes de la biomasa, principalmente las fibras, se mezclan con un (bio)plástico para producir compuestos. La fundición, el vaciado, la espumación, la emulsión, la dispersión, la granulación, el mezclado y la formulación se utilizan para crear productos utilizables.

5.3 Procesos de conversión biológica

5.3.1 *Procesos de fermentación*

Principio

La fermentación es un proceso en el que se utilizan microorganismos (bacterias, levaduras, mohos) para convertir material orgánico en alcohol, ácidos o hidrógeno, por ejemplo. Aunque la fermentación a veces se define como una conversión en condiciones libres de oxígeno (anaeróbico), la definición a menudo se amplía para incluir procesos que necesitan oxígeno (aeróbicos). Los procesos utilizados en el sector químico y energético se llevan a cabo a menudo en una vasija de reactor agitada (fermentador) con un líquido que generalmente contiene carbohidratos, pero a veces también ácidos orgánicos. El sustrato y el fermentador deben esterilizarse a menudo para trabajar con un tipo de microorganismo en forma de cultivo puro.

Materias primas adecuadas

La materia prima más importante, denominada sustrato en la ciencia de la fermentación, está formada por azúcares fermentables: monosacáridos (como la glucosa) y disacáridos (como la sacarosa o azúcar cristalino). El azúcar de caña, la remolacha y la melaza son materias primas adecuadas, al igual que el almidón, la celulosa o la lignocelulosa a partir de las cuales se pueden producir estos azúcares fermentables. Por tanto, se puede utilizar una amplia gama de tipos de biomasa, incluidos trigo, maíz, paja, hierba, hojas y madera, siempre que el material contenga una cantidad sustancial de carbohidratos. Dado que es económicamente beneficioso lograr altas concentraciones de producto en un proceso de fermentación, es posible que la materia prima no se diluya demasiado con agua. La materia prima debe contener preferiblemente más del 25% de materia seca, lo que significa que la fruta, los jugos y las aguas residuales son menos adecuados. Las materias primas con alto contenido en carbohidratos son las más utilizadas. Otros tipos de materias primas como ácidos orgánicos, proteínas, aminoácidos, alcoholes, grasas y glicerol, también se pueden utilizar en los procesos de fermentación, lo que amplía las categorías elegibles de biomasa. También se pueden crear productos completamente diferentes a partir de estas materias primas.

Productos

Los productos importantes en la categoría de portadores de energía son el etanol, el butanol, el isobutanol (los tres son combustibles líquidos para el transporte) y el gas hidrógeno. En la categoría química es importante el ácido láctico, un componente básico del ácido poliláctico bioplástico, así como el polihidroxialcanoato (PHA), un bioplástico que se acumula en forma de gránulos en las células bacterianas. La tendencia sugiere

que los productos de fermentación ácido succínico, ácido itacónico y otros ácidos dicarboxílicos cobran cada vez más importancia debido a su idoneidad para la producción de bioplásticos. Aparte de una aplicación en energía y productos químicos, la fermentación es un proceso que se caracteriza por su uso en la producción de cerveza, vino, pan, levadura de panadería, ácido cítrico, antibióticos, enzimas y aminoácidos.

Experiencia

Los Países Bajos tienen tres grandes plantas de fermentación que producen etanol a partir de almidón. La planta de Rotterdam, una de las más grandes del mundo, tiene una capacidad de producción de 480.000 m³ de etanol / año. Una planta que produce ácido láctico se encuentra en Gorinchem.

Una planta típica que produce etanol a partir de almidón de maíz o trigo puede producir 100.000 toneladas de etanol al año a partir de 200.000 toneladas de almidón. La instalación necesita alrededor de 2.500 m³ de espacio de fermentación, a menudo distribuidos en unidades de 150-200 m³.



Figura 16. Planta de bioetanol ubicada en Maasvlakte, Puerto de Rotterdam.

Economía

La producción de etanol a partir de maíz o trigo es marginalmente viable. Los costos de producción se aproximan al precio de venta del etanol (550 € por tonelada).⁴⁸ La producción de ácido láctico a partir del almidón también es viable. Lamentablemente, la producción de etanol o ácido láctico de segunda generación (a partir de flujos residuales

como la paja de maíz y el bagazo de remolacha azucarera) todavía no es económicamente viable debido a los altos costos de hacer accesible la lignocelulosa y la hidrólisis enzimática. En consecuencia, el proceso de producción aún debe optimizarse. La tendencia se dirige principalmente a los procesos de fermentación anaeróbica, porque son más rentables que los procesos de fermentación aeróbica. No se requiere un sistema de aireación demasiado costoso para los procesos anaeróbicos y el rendimiento del producto es alto. En los procesos aeróbicos, una gran parte del sustrato se oxida para formar dióxido de carbono y se convierte en la masa celular de microorganismos: ambos tienen un valor limitado y además se produce una pérdida indeseable de carbono. Durante la fermentación del almidón en etanol, en la práctica, el 89% del valor energético del azúcar se convierte en energía de etanol. Sin embargo, el rendimiento final es ligeramente menor debido al proceso de destilación y a otros factores. Durante la destilación, se pierde menos del 1% del etanol. La energía para el proceso de destilación en dos etapas asciende aproximadamente al 18% de la energía contenida en el etanol.

5.3.2 *Digestión anaeróbica*

Principio

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen el material orgánico en condiciones libres de oxígeno. Esto generalmente se refiere a la fermentación del metano en la que el producto final es el biogás, una mezcla de metano y dióxido de carbono. La digestión anaeróbica, por tanto, es una forma de fermentación. El proceso se lleva a cabo en reactores con agitación y calentamiento, a menudo con un volumen de más de 1.000 m³. La conversión de sustancias orgánicas sólidas en biogás suele tardar un mes.

Materias primas adecuadas

Las materias primas adecuadas para la digestión anaeróbica son los residuos de hortalizas, frutas y jardines (Orgánicos Separados en Origen o SSO; en inglés, Source Separated Organics), estiércol, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, flujos de residuos de la industria alimentaria, desperdicios (principalmente residuos de cocina y de comida) y aguas residuales industriales con alto contenido de concentraciones de sustancias orgánicas. El estiércol se procesa a menudo junto con el maíz, el pasto u otro cosustrato durante un proceso de cofermentación para obtener un mayor rendimiento de biogás con el mismo volumen de reactor.

Productos

El biogás es el producto principal y se puede mejorar aún más a una calidad similar a la del gas natural. El biogás purificado se llama gas verde y se puede inyectar en la red de



Figura 17. Un digester de estiércol en una granja.

gas natural. También se puede licuar (Bio-LNG) y utilizar como combustible de transporte. Una alternativa es el uso de biogás en una planta combinada de calor y energía (CHP) para la producción de electricidad y calor.

El subproducto de la digestión anaeróbica es el digestato que aún contiene material orgánico sin fermentar, agua y minerales (incluidos fosfato y amoníaco). En la digestión SSO, el digestato se composta y en la digestión del estiércol, el digestato se usa generalmente para fertilizar tierras agrícolas.

Experiencia

Hay casi cien digestores de lodos en los Países Bajos, algunos digestores SSO (operados entre otros por Attero, De Meerlanden, Laarakker y Orgaworld), docenas de digestores de estiércol en granjas, docenas de digestores para todo tipo de uso, docenas de digestores de aguas residuales y unos pocos digestores de desechos y flujos de residuos de las empresas alimentarias.⁴⁶ Un digester SSO típico con un volumen de más de 2.000 m³ procesa 35.000 toneladas de SSO al año y consecuentemente produce 4,2 millones de m³ de biogás.⁴⁶ Alrededor del 50% del valor calorífico bruto del SSO se convierte en biogás.

Economía

Las empresas de digestión anaeróbica suelen cobrar 25 € por tonelada de SSO (comunicación personal de Orgaworld) o por tonelada de estiércol.⁴⁷ En este caso, la biomasa tiene, por tanto, un valor negativo. Sin embargo, el valor de mercado del biogás producido suele ser más bajo que los costos de producción, por lo que la digestión solo es económicamente viable con un subsidio gubernamental complementario. En 2017, se extrajeron 14 PJ (600 m³) de biogás y se consumieron 1.294 PJ de gas natural (ver apartado 3) en los Países Bajos.

5.3.3 Compostaje

Principio

El compostaje es un proceso microbiológico en el que el material orgánico se oxida y se descompone en compost por medio de una configuración en la que el aire pasa a través de una pila o montículo de material sólido y poroso. Aunque el compostaje puede ocurrir espontáneamente en el campo (por ejemplo, en un césped segado), el proceso que mencionamos aquí es el compostaje controlado. A menudo se lleva a cabo con ventilación forzada (a través de un ventilador) en un contenedor, sala o al aire libre. Como el compostaje es una especie de proceso de combustión biológica, se emite un calor que también se puede recolectar. El calor también hace que el agua se evapore y el material se seque, y muchos patógenos y semillas de malezas son exterminados debido a la alta temperatura (70 °C). El proceso lleva algunas semanas.

Materias primas adecuadas

Las materias primas adecuadas son SSO, material de poda y corte (hierba, follaje), paja, tipos de estiércol seco y la fracción espesa de digestato de varios tipos de digestores. El material debe estar húmedo pero sólido y poroso, lo que excluye líquidos y lechada.

Productos

La composta es el producto más importante. Es el material que no se ha convertido durante el proceso de compostaje, por ejemplo, minerales y material orgánico de difícil descomposición como ciertas fracciones de lignocelulosa (trozos de madera) y ácidos húmicos producidos durante el proceso. La composta se puede usar para mejorar el suelo y ciertos tipos de compost se pueden usar como sustrato de crecimiento para el cultivo de hongos. Un segundo producto es el calor, pero solo lo recolecta una minoría de empresas de compostaje (como Upcycling Gemert). Algunas empresas incluso han destinado un nuevo uso al agua condensada producida por la evaporación.



Figura 18. El proceso de compostaje.

Experiencia

Los Países Bajos tienen alrededor de 60 plantas grandes de compostaje.⁴⁹ Su capacidad habitual es de 40.000 toneladas de biomasa procesada al año, de las cuales se pueden producir 16.000 toneladas de composta. Con un período de compostaje de dos semanas y seis semanas para una mayor maduración, alrededor de 4.000-5.000 m³ de material están siempre presentes en las instalaciones de una planta de compostaje.

Economía

La composta tiene un precio de 18 € por tonelada^{50,51} pero el rendimiento es insuficiente para cubrir los gastos de la empresa de compostaje. Por lo tanto, el proveedor que ofrece la biomasa para compostaje debe pagar una contribución. Por ejemplo, se cobra 25 € por tonelada de SSO.

5.3.4 Otros procesos de conversión biológica

Las enzimas (derivadas de organismos) se pueden utilizar para convertir unas sustancias en otras sustancias. Las enzimas actúan como catalizadores. Un ejemplo es la conversión de almidón en glucosa usando la enzima amilasa. En consecuencia, la mayor área de aplicación de las enzimas es la hidrólisis de biopolímeros naturales como la celulosa y la proteína.

El ensilaje y el bokashi son procesos en los que la materia sólida (pasta, restos de comida) se fermenta en condiciones sin oxígeno con el fin de producir ácidos orgánicos

que acidifiquen la materia prima para eliminar cualquier actividad biológica adicional. Este método conserva la materia prima para que pueda almacenarse durante meses. La vermicultura es el proceso de compostaje de biomasa sólida por medio del uso de lombrices. Se produce una especie de composta cuando las lombrices se comen la biomasa en un ambiente con suficiente oxígeno.

5.4 Procesos de conversión termoquímica

5.4.1 *Combustión*

Principio

Durante el proceso de combustión, la biomasa reacciona con un excedente de oxígeno y se producen principalmente dióxido de carbono, agua y cenizas. En este proceso se libera calor. La combustión de biomasa se puede utilizar en centrales eléctricas en las que se utiliza calor para producir vapor que impulsa una turbina de vapor. Hay centrales eléctricas en las que se pueden quemar mezclas de carbón y biomasa, pero dependiendo de la tecnología instalada, la biomasa también se puede utilizar sola. La biomasa también se utiliza en calderas en las que se produce vapor, agua caliente o solo calor para fines distintos a la producción de electricidad. Los hogares utilizan biomasa para chimeneas y barbacoas. Los residuos también se incineran y la energía producida se captura como calor utilizable. Este proceso se lleva a cabo en plantas de incineración de residuos.

Materias primas adecuadas

La biomasa más adecuada para la combustión contiene agua y minerales. Las centrales eléctricas de carbón quieren utilizar pellets de biomasa con un bajo contenido de minerales como biomasa para combustión conjunta como los pellets de madera. Esta aplicación garantizará que una parte significativa de la biomasa sostenible sea accesible para su uso en los Países Bajos y que las inversiones ya realizadas en infraestructura industrial se utilicen de manera eficaz. El potencial de biomasa accesible puede utilizarse a medio plazo (cuando la infraestructura se haya amortizado y otras fuentes de energía sostenibles se hayan implementado suficientemente) para aplicaciones alternativas de alto valor añadido en la bioeconomía.

En los Países Bajos, los desechos verdes, el estiércol de pollo y la fracción restante de los desechos domésticos se incineran, después de la eliminación de metales, vidrio y papel. La fracción restante se compone en parte de biomasa y en parte de plásticos inflamables de origen fósil. Además, la paja, la lignina, la lechada de papel y las cáscaras de cacao son aptas para la incineración. Además de los pellets de madera, también se pueden utilizar pellets de biomasa similar a la paja. Sin embargo, en la actualidad la

combustion de biomasa no leñosa está sujeta a un nivel máximo permitido, establecido por el gobierno. En los Países Bajos, la mayor parte del lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales se incinera, pero no produce energía neta debido a su alto contenido de humedad (65-75%).



Figura 19. La biomasa se quema conjuntamente en varias centrales eléctricas de carbón.

Productos

El calor es el producto principal de la combustión y se puede utilizar de diversas formas. También se produce ceniza, que tiene un alto contenido en minerales. La ceniza producto de la incineración de estiércol de pollo produce un fertilizante de gran valor añadido, mientras que la ceniza de las centrales eléctricas (que consta de una mezcla de biomasa y carbón) se utiliza en aplicaciones de bajo valor añadido como cemento, hormigón y construcción de carreteras. Las cenizas volantes de las plantas de incineración de residuos se utilizan como relleno de asfalto y las cenizas de fondo se utilizan como material de terraplén en la construcción de carreteras. Actualmente se están llevando a cabo investigaciones sobre la extracción de minerales específicos (fosfato) de las cenizas. Los gases de combustión forman otro "producto" y se debe realizar un lavado de gases de combustión antes de permitir que estos gases se descarguen a la atmósfera.

Experiencia

Los Países Bajos tienen 12 plantas de incineración de residuos. Algunas de ellas son grandes centrales eléctricas en las que la biomasa se puede quemar con carbón y más de cien plantas de incineración de biomasa más pequeñas. La capacidad típica de una planta de incineración de residuos es de 500 a 1000 kton de residuos residuales al año. Las grandes centrales eléctricas producen aproximadamente 800 MW_e a partir de 3.000 kton de carbón o biomasa al año. Las plantas de incineración de biomasa más pequeñas a menudo se operan por pequeñas y medianas empresas (PYMES) y utilizan unos cientos a miles de toneladas de biomasa al año. Estas plantas producen energía para estas empresas.

Una empresa productora de calor, Warmtebedrijf Ede, suministra calor a 20.000 hogares a través de un sistema de calefacción de distrito en Ede (Países Bajos). El calor puede sustituir al gas natural y es generado por tres plantas en las que se incinera la madera de poda local. Cada planta procesa de 30 a 90 toneladas de madera de poda por día y puede producir 9 MW de calor.⁵²

Economía

El nivel de eficiencia energética de las plantas de incineración de residuos es del 25-30% (electricidad y calor).^{53,54} Sin embargo, los gastos operativos de las empresas que operan estas plantas son más altos que el rendimiento energético y el rendimiento de los flujos de residuos separados. Por tanto, estos negocios son principalmente empresas de tratamiento de residuos que cobran una tarifa por los residuos suministrados. El rendimiento de electricidad de las centrales eléctricas de carbón y biomasa varía entre el 38% (plantas más antiguas) y el 46% (plantas más nuevas).⁵⁵ El carbón es más barato que los pellets de madera (factor 3-4 en función de la energía), lo que encarece la producción de electricidad y calor a partir de biomasa. Actualmente, en los Países Bajos, esto se compensa con el sistema de subvenciones SDE+.

5.4.2 **Gasificación**

Principio

Durante la gasificación, la biomasa generalmente se convierte en gas de calefacción o gas síntesis a altas temperaturas (más de 600 °C) en un entorno privado de oxígeno. El gas contiene principalmente hidrógeno, dióxido de carbono y metano. También contiene contaminantes relacionados con el tipo de combustible. Estos contaminantes, por ejemplo, ácido clorhídrico, amoníaco y sulfuro de hidrógeno, se presentan de manera reducida y pueden eliminarse con relativa facilidad. Además, el monóxido de carbono se puede convertir en dióxido de carbono mediante un proceso químico, produciendo aún más hidrógeno. El dióxido de carbono producido se puede separar posteriormente

mediante procesos de adsorción. En consecuencia, la gasificación es especialmente adecuada para combinar la conversión de biomasa con la captura de dióxido de carbono, lo que podría potencialmente resultar en emisiones negativas de dióxido de carbono (ver BECCS en el apartado 6.6).

Materias primas adecuadas

La gasificación es adecuada para flujos de biomasa relativamente secas (> 85% de materia seca), a menudo biomasa leñosa. Esto también podría ser madera de demolición y estiércol de pollo como ha demostrado la experiencia.

Productos

Aunque el gas de calefacción o gas de síntesis anterior es el producto principal, debe pasar por otros procesos de conversión para transformarlo en un producto utilizable. El gas de calefacción se puede utilizar como combustible para motores de gas y turbinas de gas para generar electricidad y calor. El gas de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono) se puede utilizar para sintetizar productos químicos. El proceso más común es la metanización, en la que el gas hidrógeno y el monóxido de carbono se convierten en gas con un alto contenido de metano. El gas producido se llama Gas Natural Sintético (GNS), que puede inyectarse en la red de gas natural después de la purificación. Todo el material que no se convierte en gas termina en una fracción restante llamada biocarbón (*biochar*), que tiene propiedades similares al carbón activado y puede usarse como enriquecedor del suelo o como combustible para calentar el gasificador. El producto primario también se puede utilizar directamente después de la purificación en la producción de calor y electricidad. El gas de síntesis se puede utilizar adicionalmente para sintetizar metanol, etanol y éter dimetílico. El proceso de Fischer-Tropsch (consultar el apartado 6.4.2) se puede utilizar para convertir el gas en hidrocarburos líquidos (generalmente alcanos). El metanol y el etanol también se pueden producir mediante algunas variantes de este proceso.

Experiencia

La gasificación de madera se ha utilizado para la producción de gas para alumbrado público (iluminación de gas) desde 1870 y en la década de 1930 los automóviles estaban equipados con un gasificador de madera. La tecnología pasó a un segundo plano después de la década de 1940. Actualmente, en Europa se utilizan cientos de pequeños gasificadores de madera, por ejemplo, en hoteles y para calefacción urbana. La capacidad está limitada a unas pocas decenas de kW. Actualmente, en los Países Bajos sólo funcionan dos gasificadores de madera a gran escala. En 1999, se construyó un gasificador de madera con una capacidad de procesamiento de madera de demolición

(madera B) de 150.000 toneladas al año en Amercentrale, una central eléctrica de carbón en Geertruidenberg. Los gases se utilizaron como combustible para la central eléctrica.⁵⁶ Sin embargo, sus operaciones se interrumpieron. Delfzijl solía tener una planta que convertía glicerol, una corriente residual de las plantas de biodiesel, en gas y luego en metanol. Desde una perspectiva química, el glicerol es una materia prima excelente y quizás podría utilizarse mejor para la conversión química o biológica en productos químicos. Además, una empresa holandesa ha suministrado una serie de gasificadores de estiércol de pollo (capacidad alrededor de 1 MW) a clientes en los Países Bajos y en el extranjero.

Economía

Aunque Smekens *et al.* (2017)⁵⁷ observaron que hay pocos ejemplos prácticos de gasificación de biomasa en los Países Bajos (o en otros lugares), han basado su evaluación económica en una escala típica de 11 millones de m³ de gas verde al año (más de 10 MW). Los costos de inversión de este tipo de grandes plantas oscilan entre los 7 y los 30 millones de euros para gasificación, depuración y mejora de gas. Esto dificulta su implementación mientras se tiene que competir con fuentes fósiles baratas. La eficiencia energética de la biomasa a gas verde es del 65%.⁵⁷ Si el gas producido se utiliza en un motor de gas, se espera que la eficiencia eléctrica sea del 29% (gas verde a electricidad) y la eficiencia energética (electricidad y calor) del 76%. La eficiencia eléctrica se puede aumentar hasta un 36% mediante intervenciones, pero esto afectará negativamente la eficiencia energética total, que se reducirá al 58%.⁵⁸ Esto implica que los niveles de eficiencia se aproximan a los de la digestión anaeróbica con mejora de gas.

5.4.3 Pirólisis

Principio

En la pirólisis, la biomasa se desintegra a alta temperatura en un ambiente libre de oxígeno. Aunque la producción de carbón vegetal (carbonización) y la torrefacción (ver apartado 5.4.4) también son formas lentas de pirólisis, el proceso al que se hace referencia aquí es la pirólisis rápida a 500 °C, durante la cual alrededor del 70% de la biomasa se convierte en aceite y el resto en biocarbón y gas. La pirólisis rápida hace justicia a su nombre porque el proceso no lleva más de dos segundos. El proceso generalmente se lleva a cabo en un reactor de lecho fluidizado y no necesita operar bajo presión.

Materias primas adecuadas

Si bien la pirólisis se puede realizar con una amplia gama de tipos de biomasa, los productos y, a su vez, las materias primas, deben cumplir ciertos requisitos. Desde una perspectiva económica, los flujos de residuos como los desechos agrícolas, la madera de poda y el césped son ideales. Sin embargo, el alto contenido de minerales en este tipo de biomasa hace que el aceite de pirólisis no sea adecuado para su uso como combustible, aunque tal vez podría usarse en el futuro como fuente para la extracción de productos químicos. La biomasa puede no contener demasiada agua. Se ha ensayado con madera seca, estiércol seco, bagazo, cascarilla de arroz, paja, residuos de aceite de palma, residuos de aceitunas y lodos secos. Las materias primas tropicales deben ser preferiblemente pirolizadas en el país de origen y el petróleo (con una alta densidad energética) posteriormente transportado de modo eficiente por mar hasta su destino.



Figura 20. La hierba fresca se puede utilizar en un proceso de pirólisis.

Productos

El producto principal de la pirólisis rápida es el aceite de pirólisis, una mezcla de cientos de componentes que contienen compuestos aromáticos (como el fenol), derivados del azúcar, ácidos orgánicos (como el ácido acético) y otras sustancias. Al igual que el petróleo, el aceite de pirólisis se puede utilizar como combustible y como fuente para un proceso de craqueo de nafta en el que se pueden extraer productos químicos. Una desventaja es el alto contenido de oxígeno que limita la cantidad que se puede añadir a

una unidad de craqueo. El aceite tiene una densidad mucho más alta que la biomasa original, que es más conveniente para fines de almacenamiento y transporte. El subproducto gaseoso se usa generalmente para suministrar energía al reactor de pirólisis y el biocarbón se usa como enriquecedor del suelo.

Experiencia

Los Países Bajos solo tienen varias plantas piloto y una planta de pirólisis a gran escala, la primera del mundo a escala comercial. Esta última planta, entregada por BTG Biomass Technology Group, produce 20.000 m³ de aceite al año que Friesland Campina utiliza como combustible para la producción de vapor y electricidad.⁵⁹ Finlandia compró recientemente cuatro reactores de pirólisis y la planta completa se construirá en los Países Bajos.⁶⁰ Hay plantas de demostración en EE.UU. y Canadá. Actualmente se está investigando un proceso de pirólisis más controlado, por ejemplo, utilizando catalizadores o aditivos de hidrógeno con el objetivo de producir mayores cantidades de ciertos productos.

Economía

Según www.ecp-biomass.eu,⁶¹ los productos de una planta de pirólisis típica en la que se utiliza madera relativamente seca como insumo son:

- Aceites de pirólisis: 0,55 GJ por entrada GJ
- Calor: 0,21 GJ por entrada GJ
- Electricidad: 0,004 MWh por entrada GJ

El calor se utiliza para secar la biomasa. Si la entrada de biomasa es muy húmeda (> 60% de humedad), se necesitará energía adicional para secarla. Los costes de inversión de la planta de pirólisis, excluidos el pre-procesamiento y el post-procesamiento, ascienden a 200-300 €/MW_{th}.⁶¹

5.4.4 Torrefacción

Principio

La torrefacción (tostado) también implica descomponer la biomasa a alta temperatura en un ambiente libre de oxígeno. Sin embargo, la temperatura utilizada es de solo 200-400 °C. Durante este proceso, la biomasa se seca y se convierte en sustancias sólidas, mientras que también se producen gases. Los gases se utilizan para suministrar energía para el proceso. El proceso se puede llevar a cabo en varios reactores como tambores giratorios o secadores de banda.

Materias primas adecuadas

En principio, la torrefacción puede aplicarse a muchos tipos de biomasa, pero se ha adquirido una experiencia considerable principalmente con biomasa leñosa y de madera.

Productos

El producto principal es el biocarbón (pellets negros). Este es más seco que la materia prima original (madera), tiene una mayor densidad, una densidad energética siete veces mayor, es más resistente al agua y puede resistir la biodegradación. El material es más parecido al carbón y esto tiene unas ventajas considerables sobre la madera en términos de retención, almacenamiento y transporte. El material es apto para gasificación y co-combustión en centrales eléctricas de carbón.

Experiencia y economía

Hace una década, algunas grandes plantas de torrefacción operaban en los Países Bajos con capacidades de producción de 60.000 y 90.000 toneladas de biocarbón al año, para su uso en grandes centrales eléctricas. Estas operaciones se volvieron inviables en los Países Bajos debido a la abolición de los subsidios. Ahora se emplean los conocimientos y la experiencia holandesa para instalar plantas de torrefacción en países con grandes cantidades de biomasa (como Estonia), mientras que el uso doméstico de la tecnología sigue siendo a pequeña escala (empresas y hogares).

5.5 Procesos de conversión química

En los procesos químicos, las sustancias se convierten en otras sustancias, al reaccionar consigo mismas o con otras (reactante o reactivo). A veces se añade un catalizador, una sustancia que incrementa la velocidad de las reacciones químicas sin ser consumido en el proceso. Existen numerosos tipos de reacciones químicas. En este apartado se presentan brevemente varios procesos químicos importantes.

En los Países Bajos se utilizan muchos aceites vegetales y grasas animales para producir diversas sustancias. El aceite vegetal se compone de triglicéridos, un producto de reacción entre el glicerol y los ácidos grasos.

El jabón es un ejemplo de un producto elaborado con aceite vegetal. La producción de jabón a partir de aceite vegetal es un proceso centenario. Otro ejemplo es la producción de biodiésel. Aunque el aceite vegetal se puede utilizar directamente como combustible de transporte, es necesario realizar modificaciones en el motor. Por esta razón, el aceite se suele convertir en ésteres metílicos de los ácidos grasos presentes. El producto resultante se llama biodiésel y sus propiedades son similares a las del diésel. La producción de ésteres metílicos de ácidos grasos a partir de aceite vegetal es una

transesterificación utilizando metanol como reactivo. Junto con los ésteres metílicos, se produce glicerol como producto residual.

Una ruta utilizada con frecuencia para la producción de bioplásticos consiste en producir los monómeros necesarios a partir de biomasa (con varios procesos), seguida de la polimerización de los monómeros en un polímero (cadena larga). Esta es la forma en que se producen los biopoliésteres como el ácido poliláctico y también, por ejemplo, el biopolietileno, que tiene una estructura idéntica al polietileno fósil.

La química también juega un papel en la producción de sustancias y productos a partir de la celulosa como la carboximetilcelulosa, la viscosa y el celofán.



Figura 21. El ácido poliláctico (PLA) es un bioplástico de uso frecuente.

El pulpeo es una actividad importante que se lleva a cabo en varios países. La madera y otros materiales lignocelulósicos se convierten en pasta para la industria del papel: casi toda la biomasa se disuelve con productos químicos, excepto la celulosa y parte de la hemicelulosa.[†] Las fibras de celulosa son la principal materia prima utilizada en la producción de papel y cartón. Las operaciones de pulpeo se llevaron a cabo en los Países Bajos en el pasado, pero ahora son prácticamente inexistentes.

[†] Consulte también la publicación sobre lignina de esta serie.

Como una cantidad considerable de biomasa consiste en lignocelulosa, en los últimos 20 años se han desarrollado muchos procesos para hacer que la celulosa, la hemicelulosa y la lignina sean más accesibles a las enzimas o catalizadores químicos. Esto se conoce como pretratamiento, que es similar al proceso de pulpeo para papel y cartón. Se puede lograr de varias formas. Principalmente, la hemicelulosa se puede hidrolizar parcialmente a alta temperatura (150-170 °C) o mediante explosión de vapor, con o sin ácido, para hacer más accesibles los tres polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina. Se puede usar hidróxido de sodio o solventes orgánicos para disolver la lignina y se pueden usar ciertos hongos para descomponerla.



Figura 22. La madera se despulpa con productos químicos para la producción de papel.

Otra conversión química importante que ha desaparecido de los Países Bajos es el curtido del cuero. Las moléculas de la proteína colágeno se reticulan con un agente curtiente como el cromo trivalente, en el proceso de curtido del cuero. Esto crea un complejo fuerte que no se puede descomponer fácilmente biológicamente o de otra manera.

5.6 Técnicas de separación

Además de la conversión y el procesamiento mecánico, la separación es un proceso importante para la conversión de biomasa en componentes para su uso en productos químicos, energía y materiales. Ciertos componentes a menudo deben extraerse de una

solución que contiene más compuestos y purificarse. Un ejemplo es la destilación de etanol de un líquido de fermentación. La separación de sustancias sólidas y líquidos como el prensado del aceite de semillas, la extracción de sustancias de la biomasa como la lignina de la madera y la separación de partículas de sustancia sólida (tamizado) también se utilizan habitualmente en los procesos de producción.

Las técnicas de separación se utilizan en muchos sectores, incluidos el sector químico, el de tecnología alimentaria, tratamiento de residuos y purificación de agua, y de ninguna manera son exclusivos del procesamiento de biomasa.

6 Nuevas tecnologías

6.1 Introducción

Para lograr una bioeconomía considerable, técnica y económicamente viable, será necesario desarrollar nuevas tecnologías. Se requieren nuevas tecnologías agrícolas para producir más biomasa en el planeta. Se están realizando investigaciones para mejorar la gestión de la tierra, la fertilización y los métodos de cultivo. Uno de los avances más significativos es la mejora de la fotosíntesis en las plantas para que puedan utilizar la luz de forma más eficiente y, por tanto, crecer más rápido y lograr un mayor rendimiento. Varios equipos de todo el mundo están trabajando para llevar esto a cabo. Además, las tecnologías capaces de procesar y convertir biomasa en productos aún requieren mejoras considerables. La viabilidad económica de muchas de las tecnologías presentadas en el apartado 5 sigue siendo deficiente, en parte debido al bajo precio de los combustibles fósiles. Una cantidad considerable de investigación se centra en desarrollarlas y optimizarlas. Además, se están desarrollando nuevas variantes de estas tecnologías e incluso se están siguiendo direcciones completamente nuevas. Un ejemplo de una nueva dirección es la electrificación de la industria química. También se están desarrollando continuamente nuevos productos a base de biomasa. Estos productos a veces tienen propiedades similares a las de productos conocidos basados en materias primas fósiles, pero también pueden tener propiedades completamente nuevas. Otra ruta que se está siguiendo enérgicamente es la producción de productos químicos a partir de biomasa que son exactamente los mismos que los productos químicos elaborados a partir de materias primas fósiles, conocidos como productos químicos "idénticos" (*drop in*) como el bio-etanol y el bio-etileno que se produce a partir de él. La ventaja de esta ruta es que existe un mercado para estos productos.

En este capítulo se examinan más a fondo los nuevos desarrollos, principalmente en los Países Bajos, en la conversión biológica, termoquímica y química y la captura, almacenamiento y utilización de dióxido de carbono.

6.2 Nuevos procesos de conversión biológica

Algunos proyectos de investigación holandeses notables, en términos de nuevos procesos con conversiones biológicas, incluyen la producción de ácidos grasos de cadena media (por ejemplo, ácido caproico) a partir de ácido acético. En un proceso desarrollado por la Universidad e Investigación de Wageningen (WUR), los flujos de residuos orgánicos se convierten primero biológicamente en ácidos orgánicos y los ácidos orgánicos se hacen reaccionar posteriormente con etanol, para producir ácido caproico en un segundo proceso biológico.⁶² Una planta de demostración que puede producir 1.000 toneladas de ácido caproico al año comenzó a operar en Ámsterdam. El ácido

caproico se puede utilizar como agente fitosanitario, aditivo para forraje y para otros fines.

Reverdia (transferido por completo a Roquette a partir del 1 de abril de 2019) ha desarrollado un proceso de fermentación a base de levadura para la producción de ácido succínico.⁶³ La ventaja de usar levadura es que el proceso se puede realizar con un valor de pH bajo, por lo que se necesita poco o ningún álcali como aditivo. Una planta italiana produce 10.000 toneladas de ácido succínico al año. Este es un desarrollo relativamente nuevo, pero ya está operando a gran escala.



Figura 23. La maicena puede formar la base para la producción de productos químicos como el ácido succínico. La proteína del maíz se puede utilizar en la alimentación.

Una tendencia ineludible es el uso de gases como el sustrato de fermentación, por ejemplo, mezclas de gas hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono, que en principio pueden producirse a partir de biomasa. Se han logrado avances importantes con mezclas de gas hidrógeno y monóxido de carbono para la producción biológica de etanol.⁶⁴ Lanzatech opera una serie de plantas piloto en China que pueden producir 300 toneladas de etanol al año.⁶⁵ Aunque estas plantas utilizan gas de altos hornos, en principio también se puede utilizar gas de la gasificación de biomasa. También se pueden producir otros alcoholes y ácidos orgánicos a partir de gas hidrógeno y monóxido de carbono.

La biomasa se puede utilizar para producir biogás que contenga metano. El biogás se suele utilizar como fuente de energía. Sin embargo, el metano también se puede utilizar como sustrato para la producción microbológica de diversos productos químicos. Se está adquiriendo más experiencia en este sector. Hace décadas, el metano se utilizaba para la producción de proteínas unicelulares a escala industrial, pero la investigación que se está llevando a cabo ahora se centra en productos químicos como el ácido láctico, el componente básico del ácido poliláctico bioplástico. Todavía está en un laboratorio escala,⁶⁶ como es la conversión bacteriana de dióxido de carbono en ácido láctico. Sin embargo, la sustitución económica de la producción convencional de ácido láctico por fermentación será un desafío.

La producción de polihidroxialcanoato (PHA) sigue siendo demasiado costosa. Para resolver este problema, se están realizando investigaciones sobre procesos más rentables, sustratos más baratos y formas más valiosas de PHA, por ejemplo, con alcanoatos de cadena larga.^{67,68} También se está explorando la producción de PHA a partir de metano.⁶⁹

Uno de los mayores deseos de la bioeconomía es reemplazar el plástico de tereftalato de polietileno (PET), conocido por las botellas de refrescos y las fibras textiles, que actualmente se produce a partir de materias primas fósiles. Un candidato principal es el furandicarboxilato de polietileno (PEF). Corbion tiene un proceso biológico para producir furandicarboxilato a partir del furano, un producto de degradación del azúcar.⁷⁰ Avantium ha desarrollado una ruta química (ver apartado 6.4.1) para la producción de furandicarboxilato a partir de azúcar.

Además de utilizar nuevos sustratos y facilitar "nuevas conversiones biológicas", se están produciendo innovaciones en la modificación genética de los microorganismos relevantes. El objetivo de la modificación genética es permitir que el organismo haga lo que queremos que haga. Las modificaciones genéticas se pueden realizar con mayor precisión con nuevas técnicas como CRISPR-CAS.

6.3 Nuevos procesos termoquímicos

Una de las innovaciones en las que están trabajando diversas instituciones de investigación y empresas es la gasificación de biomasa en agua supercrítica. La biomasa debe estar lo suficientemente seca en el proceso de gasificación convencional, lo que restringe su área de aplicación. Sin embargo, ahora está claro que este no es el caso si el proceso se lleva a cabo por encima del punto crítico del agua. El punto crítico es un término utilizado en el campo de la termodinámica. Es una combinación de un valor específico de temperatura, presión, composición y, opcionalmente, otras variables térmicas dinámicas, lo que hace que una sustancia o mezcla muestre un comportamiento especial. El punto crítico del agua es 218 bar y 374 °C.⁷¹ Si la presión y/o la temperatura son superiores, el proceso se realiza en la zona supercrítica. Las propiedades del agua

cambian alrededor del punto crítico, por lo que la biomasa con un contenido de humedad entre el 70 y el 90% aún se puede procesar. En condiciones supercríticas, ya no hay diferencia entre líquido y gas. En consecuencia, no es necesario evaporar el agua. En este proceso, casi toda la biomasa se puede convertir en gas hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Además de eso, el alquitrán ya no se produce como subproducto. Aunque la alta presión puede parecer costosa, tampoco se necesita un compresor para los procesos posteriores. Uno de los problemas es la precipitación de minerales en estas condiciones, lo que puede provocar bloqueos. El proceso solo está siendo evaluado en laboratorio y en plantas piloto. La Autoridad del Agua de Aa y Maas tiene una planta piloto de este tipo para la gasificación de lodos de depuradora.⁷²

6.4 Nuevos procesos de conversión química

6.4.1 Carbohidratos como materia prima

Para producir el plástico de base biológica PEF mencionado anteriormente, Avantium ha desarrollado un proceso para producir furandicarboxilato a partir de glucosa en una serie de pasos químicos. Como este proceso se probó recientemente a escala de planta piloto, la compañía planea lanzar la producción a gran escala de furandicarboxilato dentro de unos años.⁷³

En los Países Bajos, también se está prestando una atención considerable a encontrar una alternativa para los aromáticos, que ahora se producen a partir del petróleo, generalmente como un subproducto del proceso de refinación del petróleo. Debido a la reducción de la capacidad de refinación de petróleo derivada del cambio al gas natural (de Qatar y otros países) y al gas de esquisto, se avecina una escasez de aromáticos. Al mismo tiempo, existe el deseo de producir aromáticos de forma sostenible en forma de bioaromáticos, por ejemplo. En el marco del programa BIORIZON, se están desarrollando tecnologías para la conversión de carbohidratos y lignina de biomasa en bioaromáticos.⁷⁴ La lignina es una de las mayores fuentes de compuestos aromáticos del planeta. También se está investigando la aplicación de azúcares de flujos de residuos de la industria alimentaria, por ejemplo, de la pulpa de remolacha azucarera (Pulp2Value).⁷⁵

6.4.2 Gases como materia prima

Otro desarrollo prometedor es el proceso Fischer-Tropsch que utiliza materias primas de origen biológico. Una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno gaseoso se puede convertir en presencia de un catalizador en un combustible líquido que consiste en hidrocarburos. En la práctica, la mezcla de gases, también conocida como gas de síntesis, generalmente se extrae del carbón (CTL: carbón-a-líquidos) o gas natural (GTL:

gas-a-líquidos). Las instalaciones de Fischer-Tropsch a gran escala se encuentran en Sudáfrica, Qatar y Malasia. La alternativa de base biológica es BTL (biomasa-a-líquidos), en la que se aplica el proceso de Fischer-Tropsch u otros procesos que producen metanol o etanol. Actualmente no existen instalaciones comerciales de BTL, sino solo plantas piloto. Sin embargo, en Alemania se llevó a cabo un proyecto de demostración bastante grande, en el que operaba una instalación con una capacidad de 15.000 toneladas de combustible al año.

La electrificación de la industria química es una nueva tendencia en la utilización de biomasa. La electricidad producida a partir de fuentes renovables (biomasa, viento, sol) se puede utilizar para realizar conversiones electroquímicas: convertir una sustancia en otra sustancia utilizando energía eléctrica. Además de eso, las materias primas pueden derivarse de biomasa o de otra fuente renovable. Hoy en día, existe un fuerte enfoque en compuestos básicos como metano, agua, oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Por ejemplo, se puede utilizar un proceso electroquímico para producir metanol a partir de metano. Una alternativa ha sido desarrollado para la producción de ácido fórmico, para el que actualmente se utilizan fuentes fósiles. Esta alternativa convierte el dióxido de carbono en ácido fórmico con electricidad renovable. Estos tipos de conversiones se están investigando actualmente a escala de laboratorio, incluso en el marco del



Figura 24. La lignina es una fuente de compuestos aromáticos (fotografía: WFBR).

programa holandés VoltaChem.⁷⁶ Varios programas de investigación también se dedican al desarrollo de la fotosíntesis artificial.[‡]

6.4.3 *Lignina como materia prima*

Se liberan grandes cantidades de lignina durante el proceso de fabricación de pasta de papel y se espera que aumenten bruscamente cuando las biorrefinerías de lignocelulosa tengan mayor presencia. Hasta la fecha, la lignina se utiliza principalmente como combustible, mientras que los lignosulfonatos se utilizan como aglutinante o plastificante en el hormigón. Las pequeñas cantidades de lignina liberadas de la pulpa de la paja con soda se utilizan en pegamento. Las actividades de I + D, centradas en el desarrollo de procesos que utilizan la lignina como materia prima para la producción de productos químicos y materiales, se están expandiendo ahora rápidamente. En los nuevos procesos, la lignina se usa de tal manera que se descompone en monómeros o se modifica, haciendo uso de la estructura del polímero.

Un ejemplo es el uso de lignina para reemplazar el betún en el asfalto. La lignina tiene propiedades aglutinantes similares al betún de origen fósil, la sustancia pegajosa y parecida al alquitrán del asfalto.



Figura 25. En 2017 se inauguró una pista para bicicletas con asfalto de lignina en el campus de la Universidad de Wageningen (fotografía: Marte Hofsteenge).

[‡] Véase también la publicación inglesa sobre fotosíntesis artificial en esta serie.

La investigación ha avanzado ahora a la etapa en la que se han utilizado mezclas de lignina y asfalto para construir tramos de prueba de carretera y una pista para bicicletas.⁷⁷

Un ejemplo de modificación en la que se conserva la estructura del polímero es la fabricación de fibras de carbono a base de lignina. Estas fibras son adecuadas para su uso en compuestos de alto valor añadido. El carbón activado también se puede producir a partir de lignina. Se está investigando la modificación de la lignina acoplando grupos funcionales (anillo de carboximetilo, anillo de amina), lo que cambia sus propiedades.

La mayor parte de la investigación se centra en la despolimerización de la lignina, es decir, en la producción de moléculas más pequeñas (monómeros), a menudo de carácter aromático. La pirólisis, por ejemplo, se puede utilizar para cortar cadenas de polímeros (véase el capítulo 5). Una cantidad considerable de investigación se centra en controlar la degradación mediante la selección del catalizador adecuado.⁷⁸ Las moléculas de lignina también se pueden romper usando ácido o lejía a alta temperatura bajo presión. Esto a menudo produce moléculas que aún contienen oxígeno, lo cual no es deseable para ciertas aplicaciones como combustibles líquidos estables de alto valor agregado y aplicaciones que necesitan un punto de ebullición más bajo. La investigación ha demostrado que el oxígeno se puede eliminar permitiendo que los productos reaccionen con el hidrógeno en presencia de un catalizador metálico.⁷⁸ Por el contrario, hace falta una gran cantidad de oxígeno para algunas aplicaciones, por ejemplo, si es necesario producir ácidos orgánicos. A continuación, la lignina se puede polimerizar y oxidar con ozono o peróxido de hidrógeno en presencia de un óxido metálico. Todos estos procesos han sido probado a escala de laboratorio.⁷⁸ El mayor desafío que plantea este desarrollo es que siempre se forma una mezcla de monómeros, que es causada por la composición heterogénea de la lignina. Numerosas actividades de investigación se centran en encontrar catalizadores que permitan que ciertos productos de la mezcla se vuelvan dominantes. Las oportunidades para esta ruta de polimerización radica principalmente en la producción de combustible para aviones y la sustitución de fenol, por ejemplo, en resinas de fenol formaldehído.⁷⁸

6.5 Biorrefinación y cascadas

Se pueden fabricar múltiples productos a partir de cualquier tipo de biomasa. Por lo tanto, el conjunto de operaciones de procesamiento debe organizarse de tal manera que estos productos puedan extraerse de manera rentable. Esto se conoce como biorrefinación: el procesamiento sostenible de biomasa en una gama de productos comercializables y energía. La biorrefinación es similar a los procesos que conocemos de la industria petrolera desde hace más de un siglo: la refinación de petróleo, en la que el crudo se separa en parte en fracciones más ligeras y más pesadas, pero también se realizan conversiones (craqueo). Un ejemplo de biorrefinación es la extracción de

proteína nativa de los flujos de residuos de los procesadores de vegetales. La proteína extraída representa un alto valor, pero solo una pequeña parte en masa de esos vegetales. El residuo se puede digerir para producir biogás. Sin embargo, no todos los componentes vegetales se digieren completamente. El digestato se puede espesar y convertir en abono para producir un tercer producto: abono. Las patatas también se pueden refinar. Avebe extrae no solo el almidón de la patata, sino también Solanic, una

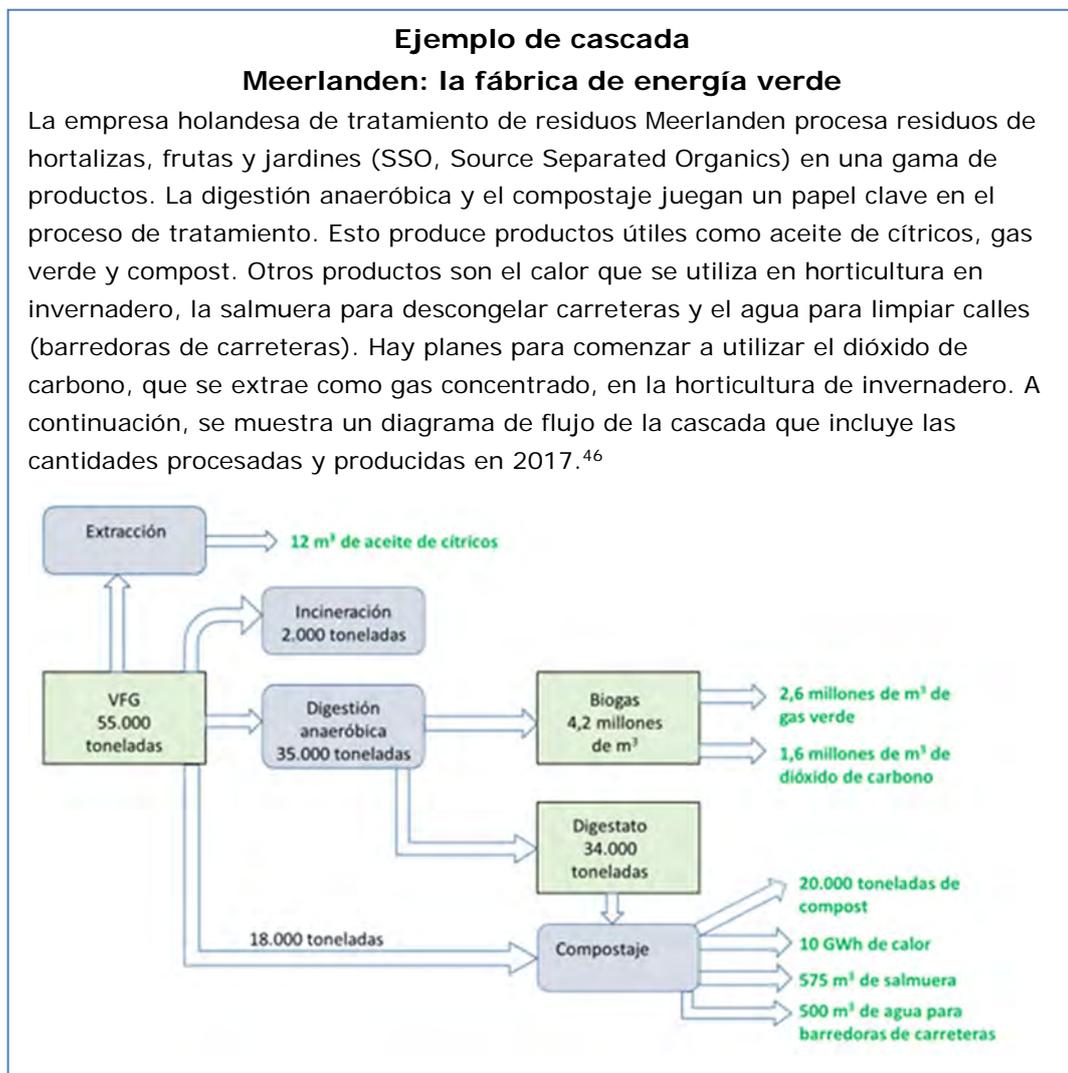


Figura 26. Ejemplo de una cascada para la empresa holandesa de tratamiento de residuos Meerlanden.

proteína con propiedades gelificantes apta para sustituir las proteínas animales en determinados alimentos.

A menudo se utiliza un orden específico cuando se extraen productos de la biomasa: primero se extrae el producto con el valor más alto y luego los productos con un valor más bajo. Esta es una forma de cascada. En las mejores cascadas, la biomasa se utiliza completamente (véanse también las Figuras 26 y 27).

6.6 Captura, almacenamiento y utilización de dióxido de carbono.

Una de las razones por las que queremos usar biomasa en lugar de fuentes fósiles es reducir las emisiones del ciclo a largo plazo del dióxido de carbono (ver también el apartado 1). Si bien la utilización de biomasa como fuente de energía genera emisiones de dióxido de carbono, la misma cantidad de dióxido de carbono fue eliminada de la atmósfera en los años anteriores por las plantas, y será eliminada de la atmósfera una vez más en los próximos años por el renovado crecimiento de material vegetal. Esto crea un ciclo corto de unos pocos años, con bajas emisiones netas de dióxido de carbono. Estas emisiones netas de dióxido de carbono podrían incluso volverse negativas si el dióxido de carbono producido en las centrales eléctricas y biorrefinerías de biomasa no se descarga a la atmósfera, sino que se captura y almacena bajo tierra. La técnica para capturar y almacenar dióxido de carbono (CAC) se conoce principalmente por experimentos con gases de combustión de centrales eléctricas de carbón. Estos gases contienen entre un 10 y un 15% de dióxido de carbono.⁸⁰ En CCS, el dióxido de carbono de los gases de combustión es capturado por depuradores de gas que utilizan soluciones de amina, posteriormente liberado en forma concentrada y transportado a un lugar donde se almacena bajo tierra en una formación geológica estable.

Las primeras demostraciones de CAC se llevaron a cabo en Noruega en 1996. En 2018, 23 instalaciones de CAC a gran escala operaban en todo el mundo o estaban en construcción, lo que en conjunto representan 40 Mton de almacenamiento de dióxido de carbono al año.⁸¹ Esto representa el 0,1% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono. Sin embargo, este método todavía plantea dos problemas importantes: costos y seguridad. La captura de dióxido de carbono de los gases de combustión de las centrales eléctricas de carbón consume más del 20% de la energía producida por estas centrales. En estos momentos, se están realizando experimentos con agentes de absorción más eficaces. También existe cierta preocupación sobre la seguridad del dióxido de carbono que se filtra a través del suelo desde la instalación de almacenamiento subterránea. Por tanto, es necesaria una mejora de la tecnología y más experiencia. CAC no es todavía una tecnología en toda regla.

Ejemplo de una biorrefinería Borregaard: productos de madera

Borregaard es una empresa noruega que tiene una biorrefinería en Sarpsborg. Esta planta, que funciona desde hace más de medio siglo, utiliza madera como materia prima. La pulpa de sulfito es fundamental para el proceso de producción. Los siguientes productos primarios se producen a partir de virutas de abeto MS de 1.000 kg:⁷⁹

- 400 kg de celulosa para ropa, pintura, material de construcción y cosméticos
- 400 kg de lignosulfonato para hormigón (aditivo), piensos y pigmentos
- 50 kg de etanol para medicamentos, productos para el cuidado del automóvil y combustible
- 3 kg de vainillina para alimentos, perfumes y medicinas

Además, las corrientes de residuos se convierten en portadores de energía. A continuación, se muestra un diagrama de flujo simplificado del proceso de producción.

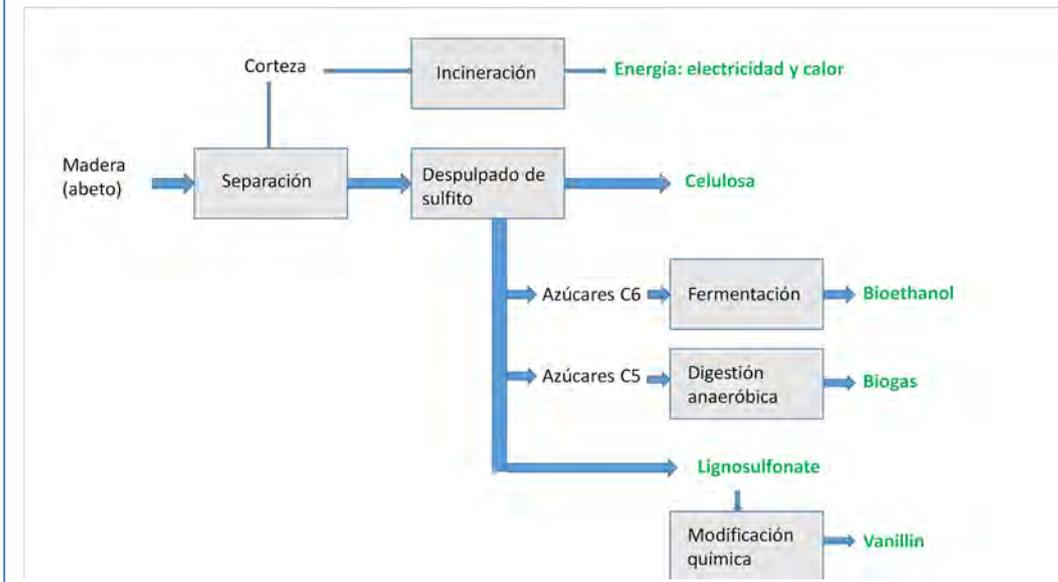


Figura 27. Ejemplo de biorrefinería a base de madera.

Si aplica CAC a las instalaciones que convierten la biomasa en energía (y dióxido de carbono), lo que obtiene es bioenergía con captura y almacenamiento de carbono o BECCS.⁸² Actualmente hay seis instalaciones BECCS a gran escala en todo el mundo, todas ellas plantas de bioetanol y plantas de incineración de residuos domésticos. La principal ventaja de BECCS para plantas de bioetanol es que el dióxido de carbono tiene una concentración de casi el 100%, lo que ahorra en el consumo de energía de CAC. El proyecto más grande que se lleva a cabo desde 2017 es en una planta de bioetanol en Illinois, donde un millón de toneladas de dióxido de carbono se almacenan bajo tierra en arenisca.⁸³ En los Países Bajos, actualmente se está construyendo un gasoducto para el dióxido de carbono de diversas fuentes para inyección en los agotados campos de gas del Mar del Norte. Tiene una capacidad de 2,5 Mton de dióxido de carbono al año.⁸³ BECCS también parece adecuado para centrales eléctricas de biomasa. Un proyecto de planta piloto para la captura de dióxido de carbono ha estado operando en la central eléctrica de biomasa en Drax, Inglaterra, desde febrero de 2019.⁸⁴ Sin embargo, es una tecnología que tiene un precio considerable.

En lugar de almacenar dióxido de carbono, también se puede utilizar. Esto se conoce como CCU (captura y utilización de carbono) y sus usos incluyen:

- Convertirlo en combustible, por ejemplo, utilizando tecnologías de algas o combustible solar. Los combustibles solares son sustancias orgánicas básicas, que se pueden producir a partir de dióxido de carbono y agua con la ayuda de la luz solar, utilizando tecnología química.
- Convertirlo en productos químicos y materiales como metanol, policarbonatos, ácido acético y urea.
- Convertirlo en carbonato de calcio o carbonato de magnesio que se utiliza como material de construcción.
- Utilizarlo para optimizar la extracción de petróleo en los campos petrolíferos: la inyección de dióxido de carbono en el campo pone el petróleo en movimiento.
- Utilizarlo en horticultura de invernadero para un crecimiento vegetal más rápido.

Las técnicas indicadas en los tres primeros puntos de la lista aún se encuentran en fase de desarrollo. Se ha adquirido más experiencia con el uso de dióxido de carbono de biorrefinerías para la horticultura de invernadero. Una planta de bioetanol en las cercanías de Rotterdam suministra anualmente 100 kton de dióxido de carbono a las empresas hortícolas de invernadero, mientras que una planta de incineración de residuos en Duiven extrae 50 toneladas de dióxido de carbono cada año de los gases de combustión que también se utilizan en la horticultura de invernadero.⁸³

En aras de la exhaustividad, cabe señalar que, además, se están realizando investigaciones sobre la captura directa de dióxido de carbono del aire (aire exterior). Un método que se puede utilizar para este propósito es la absorción en sosa cáustica. Después de la absorción, la lejía se calienta liberando el dióxido de carbono en forma concentrada, que más tarde se puede almacenar. Otro método que funciona es la adsorción en la superficie de partículas a base de amina. Después de calentar al vacío, el dióxido de carbono se libera en forma concentrada. La separación con membranas es un tercer método, y un enfoque completamente diferente es la reacción del dióxido de carbono con magnesio de piedra con un alto contenido de silicato de magnesio (como el olivino). Luego se secuestra como mineral. Todos estos métodos están todavía en etapas de investigación básica y tienen un alto consumo de energía (superior al CAC de los gases de combustión), provocado por la baja concentración de dióxido de carbono en el aire (0,04%).

La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera también puede verse afectada por los cambios en el uso de la tierra. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha escrito varios artículos sobre este tema y llama al efecto UTCUTS (uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura). La transformación de los bosques en tierras agrícolas, por ejemplo, provoca emisiones netas de dióxido de carbono.

7 Cómo depende la aplicación del tipo de biomasa

7.1 Introducción

El apartado 4 da una descripción general de la disponibilidad actual de biomasa y describe un escenario de reemplazo en el que todas las materias primas fósiles son reemplazadas por materias primas renovables, incluida la biomasa. Dado que existen límites para la producción y liberación de la biomasa sostenible para la bioeconomía, es importante que la biomasa se utilice en áreas donde no existen buenas alternativas para la producción de todos los productos que necesitamos. Este apartado presenta un panorama cualitativo del uso más eficiente y lógico de la biomasa en la bioeconomía para las aplicaciones en consumo humano, alimentación animal, energía, materiales, químicos, compost y mejora del suelo. A modo de referencia, la figura 28 proporciona una descripción general del uso mundial actual de biomasa y materias primas fósiles en las diversas aplicaciones.

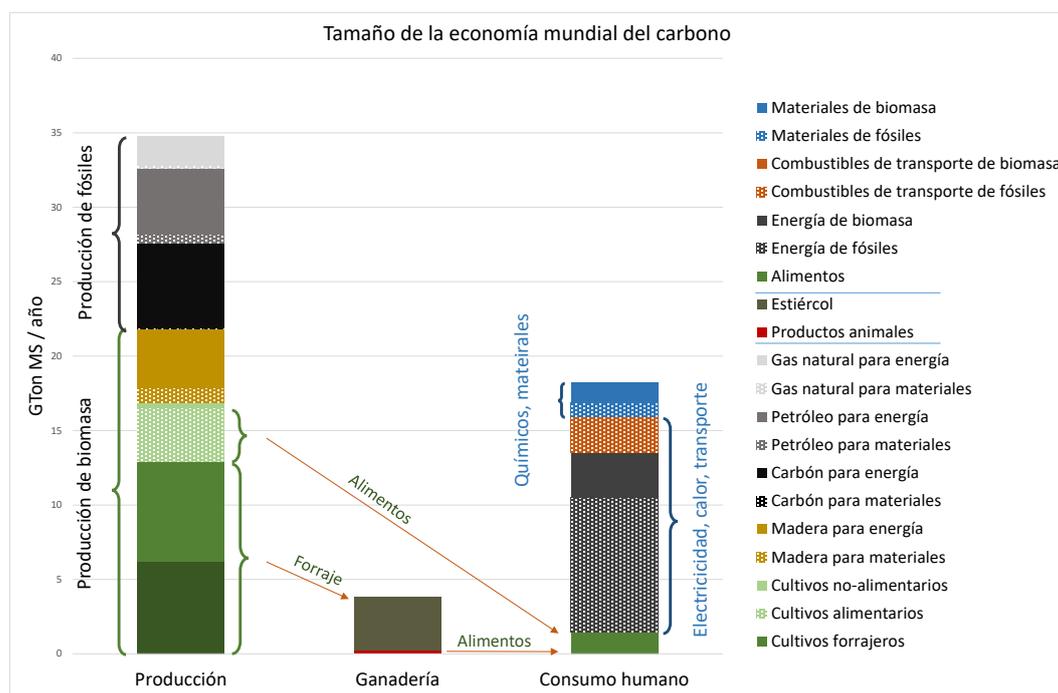


Figura 28. Volumen de producción mundial actual de biomasa y materia prima fósil, y las aplicaciones de estas materias primas.

7.2 Propiedades de la biomasa en relación con aplicaciones adecuadas

7.2.1 *Las propiedades de la biomasa son el factor determinante*

La aplicación y la capacidad de transportar la biomasa depende de sus propiedades físicas y químicas además de su estatus legal. Las siguientes secciones proporcionan más información sobre estos aspectos. La Figura 29 contiene una descripción general de las propiedades relevantes de varios tipos de biomasa y productos de biomasa. La Figura 30 vincula una aplicación o un tipo de procesamiento adecuados a esas propiedades.

7.2.2 *Contenido de humedad*

La biomasa húmeda no es adecuada para procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación debido a la energía adicional necesaria para calentar el agua.⁸⁵ El límite permitido para la gasificación es un contenido de humedad de alrededor del 15%.⁸⁶ La incineración, por ejemplo, en centrales eléctricas, también es menos eficiente cuando la biomasa está húmeda. Si las materias primas deben transportarse o almacenarse durante semanas, la biomasa húmeda no es adecuada debido a los costos de almacenamiento y durabilidad. Sin embargo, la biomasa húmeda es apta para la digestión anaeróbica y como materia prima para procesos de fermentación o ensilaje. Algunos ejemplos de biomasa húmeda son el césped, los vegetales, los desechos de frutas y jardines (SSO), el estiércol, el follaje, la remolacha azucarera, las patatas, los arroyos de residuos de vegetales y frutas, las algas, las plantas acuáticas y los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Las materias primas secas son la madera, el aserrín, el aceite vegetal, la paja, las semillas, el papel usado, el azúcar y los granos.

7.2.3 *Densidad*

Combinar un bajo contenido de humedad con una alta densidad (ton/m³) es favorable para el transporte, las importaciones y exportaciones y el manejo en general. Se consiguen altas densidades con pellets de madera, pasto o paja, madera, biomasa torrificada, aceite vegetal, azúcar y grano. Estas densidades también se logran con productos derivados como aceite de pirólisis, metanol, etanol, butanol y metano líquido. La paja suelta y el bagazo son menos favorables.

7.2.4 *Contenido de carbohidratos*

Las materias primas ricas en carbohidratos como los cereales y la remolacha azucarera, constituyen una base importante de nuestra dieta. También se trata materias primas importantes para la industria química que se pueden utilizar para producir los componentes químicos básicos para materiales o combustibles de transporte, mediante

Biomasa	Alto contenido de humedad	MS de alta densidad	Alto contenido carbohidrato	Alto contenido proteico	Fibras	Alto contenido de aceite	Alto contenido de minerales	Estado de residuos
Granos								
Paja								
Aceite vegetal								
Pulpa sobrante de cultivos oleaginosos								
Remolacha azucarera								
Patatas								
Vegetales y flujos de residuos								
Fruta y flujos de residuos								
Microalgae								
Algas marinas								
Plantas acuáticas								
Hierba								
Madera								
Pellets de madera								
Poda de madera								
Pellets de hierba								
Pellets de paja								
Biomasa torrefactada								
Follaje								
Estiércol								
Papel de desecho								
SSO								
WOF								
Lodos del tratamiento de plantas de aguas residuales								

Figura 29. Propiedades de las distintas materias primas de la biomasa.

Biomasa	Consumo humano	Alimentación animal	Energía			Materiales		Químicos	Compost
			Biogás	Electricidad y calor	Combustibles de transporte	Papel / cartón			
Pellets de hierba									
Estiércol									
Papel de desecho									
SSO									
WOF									
Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales									

Figura 30. Aplicaciones y tipos de procesamiento adecuados para diferentes tipos de biomasa y productos de biomasa en el futuro; el blanco no es adecuado, el oscuro es extremadamente adecuado. La madera de construcción y la ropa de cama de los animales no están incluidos.

conversión química o fermentación.⁸⁷ El azúcar y los cereales son buenas materias primas para la industria de la fermentación. Pueden utilizarse, por ejemplo, para la producción de etanol, ácido láctico (componente básico del PLA), butanol, ácido succínico (para la producción de PBS, un bioplástico biodegradable con propiedades similares a las del PP), aminoácidos y diversos otros ácidos orgánicos.

El uso de cereales y azúcar fuera del mercado de alimentos es controvertido, pero los nuevos estudios de sostenibilidad han demostrado que no hay ninguna ventaja en el uso de materias primas de segunda generación (como la lignocelulosa) sobre las materias primas de primera generación como los cereales y la remolacha azucarera.⁸⁸ Debido a la abolición de las cuotas de producción de azúcar de la UE en 2017 y al aumento de los rendimientos, actualmente hay un excedente de azúcar en la UE. Además, las ventas de azúcar para el mercado de alimentos se van a ver reducidas. Se espera que la UE se convierta en un exportador neto de azúcar⁸⁸ y que haya margen para el uso de azúcares de primera generación en la industria química.

7.2.5 Contenido de proteínas

La proteína tiene un efecto disruptivo en los procesos de combustión y termoquímicos debido al NH₃ y NO_x producido, que puede corroer los materiales y tener un impacto ambiental negativo. En los procesos de digestión y fermentación puede resultar favorable la presencia de cantidades moderadas de proteínas. La proteína, sin embargo, es beneficiosa para la alimentación animal. La hierba, las semillas oleaginosas y la pulpa derivada, los frutos secos, las verduras, las microalgas, los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y los cereales son ricos en proteínas.

7.2.6 Fibras

La madera, la hierba, la paja y los tallos se componen de estructuras de fibra de celulosa, hemicelulosa y lignina, y se pueden utilizar en aplicaciones de materiales que requieran esas estructuras como papel, cartón y materiales de construcción. Los cultivos de fibras específicas como el algodón, el lino y el cáñamo contienen fibras fuertes que se pueden utilizar para textiles y compuestos.

7.2.7 Aceite vegetal

El aceite vegetal es principalmente una materia prima para la alimentación humana. También se utiliza en la industria química, por ejemplo, para la producción de sustancias tensioactivas, para pinturas alquídicas y para productos como el linóleo. El aceite vegetal también se puede utilizar como combustible de transporte. Los flujos de biomasa relevantes son el aceite de palma, las semillas oleaginosas (semillas de soja, girasol y olivo) y el aceite de cocina usado.

7.2.8 Contenido mineral

En muchas aplicaciones, la fracción de minerales en la biomasa es perjudicial, particularmente en los procesos de combustión y termoquímicos. Los procesos bioquímicos como los procesos de digestión, el compostaje y la fermentación son menos sensibles a los minerales. La biomasa rica en minerales está representada por la fracción orgánica húmeda (WOF) de los desechos domésticos, desechos SSO, estiércol, paja, pasto, remolacha azucarera, algas y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

7.2.9 Estado de los residuos

Ciertos tipos de biomasa tienen el estatus legal de residuo, lo que significa que el tipo de procesamiento y aplicación de los productos está restringido. El motivo es que no se puede comprobar la composición de la biomasa y ésta puede estar contaminada microbiológica o químicamente. Las reglas también se aplican al reciclaje de desechos de carne para prevenir enfermedades (EEB) y a los desechos de SSO, WOF, papel de desecho, desechos de supermercados, desperdicios y lodos de plantas de tratamiento de desechos. Esto descarta una aplicación en alimentos o forraje y muchos clientes no están dispuestos a utilizar los productos en todo tipo de materiales. Las restricciones se aplican igualmente a las importaciones y exportaciones. El estiércol no se considera un desperdicio, pero está sujeto a regulaciones específicas.

7.3 Importación de biomasa

Si es necesario importar biomasa a la UE debido a una disponibilidad insuficiente (lo que es muy probable), la biomasa deberá transportarse desde áreas ubicadas a una distancia considerable de los Países Bajos. Para limitar los gastos derivados del transporte y el consumo de energía de los envíos de biomasa al exterior a menos del 10% de los costos y el contenido energético de la biomasa, la biomasa transportada debe tener una alta densidad. Los materiales adecuados incluyen pellets de madera, paja, bagazo o hierba, biomasa torrificada, aceite de pirólisis, metano líquido, alcoholes (metanol, etanol, butanol), azúcar y grano.

La ventaja de convertir la biomasa en productos semiacabados (pellets, etanol, metano, aceite) en el sitio de cultivo es que es más fácil devolver los minerales extraídos como fertilizantes a las plantaciones. Por lo tanto, los pellets pueden fabricarse no solo a partir de desechos de madera, sino también de paja y pasto. Los últimos dos flujos se lavan primero para reducir el contenido de minerales. Este es un requisito particularmente para muchas aplicaciones termoquímicas. Tales procesos deben optimizarse antes de que puedan aplicarse económicamente.

7.4 Uso de biomasa doméstica

El apartado 3 establece que a menudo ya se ha designado un uso beneficioso a la biomasa recolectada en los Países Bajos. Sin embargo, todavía hay espacio para designar un uso de mayor valor para parte de la biomasa o para aumentar el rendimiento. Este es especialmente el caso de la biomasa derivada del medio ambiente natural y las vías fluviales, los flujos de residuos húmedos de la agricultura y la horticultura, el estiércol y los residuos de SSO. Estos arroyos se utilizan actualmente como mejoradores del suelo, a veces para el suministro de energía y, a veces como alimento para animales. Sin embargo, la participación en el suministro de energía aún se puede expandir y estos flujos de biomasa pueden incluso utilizarse para producir productos químicos. Se están llevando a cabo múltiples proyectos de I + D y de demostración en este campo en los Países Bajos.

7.5 La no utilización de biomasa es desfavorable

La biomasa que podría haber estado disponible para su uso en la bioeconomía no contribuye a la sustitución de los combustibles fósiles. Además de eso, pueden surgir otros efectos adversos a causa de la biomasa no utilizada. En el mejor de los casos, la biomasa fácilmente degradable que queda en el lugar de la cosecha se convertirá en dióxido de carbono y agua con oxígeno del aire. Básicamente, esto se reduce a la combustión sin extraer energía útil.[§] Algunos ejemplos son el césped que se deja al costado de la carretera y las plantas acuáticas arrojadas a la orilla. En el peor de los casos, en condiciones libres de oxígeno, más profundamente en la pila de biomasa o bajo tierra (un decímetro), la biomasa puede comenzar a pudrirse y liberar metano. El metano es gaseoso y se descarga a la atmósfera, lo que tiene un impacto grave. El

Plantas acuáticas podridas

Se pueden producir fácilmente cinco toneladas de plantas acuáticas (MS) por hectárea de agua superficial holandesa al año.⁹⁰ La utilización de estas plantas para la digestión anaeróbica producirá una cantidad de biogás por hectárea que puede sustituir 1,5 toneladas de gas natural. Esto ahorrará emisiones de hasta 3,6 toneladas de CO₂ equivalentes. Sin embargo, si todas estas plantas acuáticas se hunden hasta el fondo y se pudren, se pueden producir 1,3 toneladas de metano, generando emisiones de 33 toneladas de CO₂ equivalentes.

[§] Cabe señalar que, para mantener el nivel de carbono en el suelo, parte de la biomasa menos fácilmente degradable como los componentes lignocelulósicos, debe dejarse en la tierra o bien se deben retroalimentar otras fuentes de carbono para este fin.

efecto invernadero del metano es 25 veces mayor por kilogramo que el del dióxido de carbono.⁸⁹ Las plantas acuáticas que se hunden hasta el fondo de un lago o curso de agua se convierten rápidamente en metano, que forma burbujas de gas metano que viajan a la atmósfera. ¿Pero no es esto solo un proceso natural? No, no lo es, porque el agua de la superficie holandesa está sobre fertilizada, lo que hace que crezcan cantidades anormales de plantas acuáticas. Incluso fertilizar la tierra con estiércol o inyectarlo en el suelo a menudo produce emisiones de metano. La ruta preferida sería canalizar estas emisiones de metano hacia una planta de digestión anaeróbica que pueda capturar metano y se pueda utilizar como biogás.

8 Uso de biomasa en las distintas aplicaciones

8.1 Introducción

Como se ha indicado en el capítulo anterior, hay una justificación detrás del uso de la biomasa en las diversas aplicaciones que viene dictada por las propiedades específicas de la propia biomasa. En este capítulo hablaremos del uso más lógico de la biomasa para las diversas áreas de aplicación.

8.2 Consumo humano

Nuestra comida siempre se produce a partir de biomasa. El uso de la biomasa para la alimentación tiene, por tanto, el mayor valor emocional. Sin embargo, en la producción de alimentos se produce una gran cantidad de biomasa como corriente residual que no es apta para el consumo humano.⁹¹ Estos residuos de biomasa se utilizan en parte para la alimentación animal, pero a menudo se pueden aprovechar como materia prima para la bioeconomía. Además, también se pueden utilizar los flujos de residuos generados por la industria dedicada al procesamiento de alimentos.

8.3 Alimentación animal

Además de los flujos secundarios y los flujos de residuos de la industria alimentaria (desechos, granos usados de la cervecería), los cultivos se utilizan para la alimentación animal (pasto o maíz para ensilado). La alimentación animal representa una cantidad de biomasa mucho mayor que la utilizada directamente para la alimentación humana.⁹² La producción de biomasa para la alimentación animal puede reducirse minimizando el consumo de carne y creando más espacio para la producción de otros tipos de biomasa para la bioeconomía.

8.4 Energía

Biogás

Los flujos de biomasa húmedas de bajo valor se pueden convertir (mediante una digestión anaeróbica o fermentación de metano, véase el apartado 5) en biogás, que contiene metano, mediante un proceso biológico. Se puede utilizar un proceso termoquímico para distintos tipos de biomasa seca (menos del 15% de contenido de humedad), en el que también se produce gas metano (gasificación, ver apartado 5). Ambos tipos de gas se pueden convertir en un producto que contenga principalmente metano. Como el gas natural, este gas se puede licuar por enfriamiento (-162 °C), lo que reduce el volumen en un factor de 600. Esta es una operación de rutina para el gas natural que se remonta a 50 años. En 2017, se enviaron 29 millones de toneladas de

gas natural licuado (GNL) a todo el mundo desde Qatar y otros países. Rotterdam (Maasvlakte) tiene una terminal de GNL donde el líquido se puede reconvertir en gas y añadir a la red de gas natural.

Por tanto, el biogás se puede utilizar como combustible para la producción de electricidad y calor o para la producción de GNL. La digestión anaeróbica se puede utilizar para procesar principalmente productos húmedos de bajo valor como flujos de biomasa que no son adecuadas para otros usos en un producto útil. El producto final es el biogás, que es similar en forma purificada al gas natural y que puede inyectarse en la red de gas natural y aplicarse ampliamente. Esta combinación hace de la digestión anaeróbica una tecnología valiosa para la bioeconomía.

Electricidad y calor

La biomasa seca de baja densidad mineral y alta densidad como la madera, que pueden incinerarse en las actuales centrales eléctricas de carbón, deberían utilizarse preferentemente para producir electricidad y calor a partir de biomasa. La torrefacción también produce un producto (biocarbón) que se puede utilizar como combustible para centrales eléctricas. El biocarbón producido por torrefacción es resistente al agua (lo cual lo hace adecuado para el transporte y el almacenamiento) y tiene una densidad energética más alta que la biomasa original. Por último, la pirólisis de biomasa se puede utilizar para producir aceite de pirólisis que a su vez generará electricidad y calor.

Dado que la electricidad y el calor cubren gran parte de nuestra demanda energética (Figura 28), es fundamental que, además de la biomasa, haya otras formas de energía renovable como el sol y el viento que formen parte de la cantidad total necesaria, especialmente si los pasajeros se cambian al transporte eléctrico. Los paneles solares y los calentadores de agua que funcionan con energía solar en los hogares hacen una pequeña contribución en términos absolutos a la demanda total de electricidad y calor, pero es una forma en que los consumidores pueden contribuir a la transición de los combustibles fósiles a las energías renovables.

Combustibles de transporte

Se utilizan diferentes tipos de combustibles de transporte para el transporte de pasajeros, transporte pesado por carretera, transporte marítimo y transporte aéreo.

Hay varios tipos de alternativas renovables disponibles para el transporte de pasajeros como el biogás, el gas hidrógeno, el biodiésel, el bioetanol o la electricidad. Mientras tanto, los grandes fabricantes de automóviles han decidido realizar la transición a vehículos eléctricos y se espera que en el futuro la flota de vehículos esté compuesta por vehículos eléctricos. La electricidad se sigue produciendo a gran escala mediante

centrales eléctricas de carbón (posiblemente cocidas con biomasa), pero también existen alternativas sin biomasa.

Es poco probable que la electricidad ofrezca una solución para el transporte pesado por carretera, el transporte marítimo y el transporte aéreo, y se están buscando alternativas para el diésel, el fueloil y el queroseno de uso pesado. Estas alternativas, los llamados biocombustibles avanzados, deberán tener una serie de propiedades, incluida una alta densidad energética y un gran radio de acción. Se espera que la biomasa desempeñe un papel en esto.

Un desafío técnico abrumador que tiene por delante el sector del transporte aéreo es la sustitución del queroseno por una fuente de energía renovable. Disuadir a la población a hacer uso de los vuelos como modo de transporte mediante el aumento significativo de las tarifas aéreas contribuirá en parte a solucionar este problema, especialmente si existen alternativas más respetuosas con el medio ambiente como el tren para vuelos de corta distancia. Se espera que se siga necesitando biomasa para la producción de alternativas al queroseno que sean renovables.

8.5 Materiales

La biomasa es necesaria para la producción de papel y cartón. Principalmente se usa biomasa leñosa, pero otros tipos de biomasa como las especies herbáceas, son igualmente adecuados como materia prima. La producción de papel y cartón podría aumentar en los próximos años, especialmente si se materializa la sustitución de los envases de plástico por envases de papel. La madera es una materia prima importante para materiales de construcción, muebles, suelos, escaleras, etc. Además de los productos de madera de alto valor añadido, los bosques producen flujos laterales como cortezas, aserrín y ramas que pueden aprovecharse en la bioeconomía.

Aunque la contribución actual de la biomasa a la producción de plásticos es menor, (menos del 1% del total⁹⁴) podría incrementar significativamente si se materializa la transición de los plásticos de materias primas fósiles a renovables. La Fundación Ellen MacArthur describe lo que como podría verse la nueva economía de los plásticos (véase también la Figura 31).⁹³ Los tres elementos más importantes de la nueva economía de los plásticos son:

- Todos los plásticos deben circular en la medida de lo posible (reciclados) en aplicaciones equivalentes.
- Debe evitarse la fuga de plásticos al medio ambiente.
- La producción de plásticos vírgenes se desvinculará de las materias primas fósiles.

Los plásticos de base biológica son un elemento importante en este nuevo modelo debido al desacoplamiento de las materias primas fósiles.

En los últimos años, se están utilizando cada vez más materias primas fósiles en la producción textil (principalmente en países fuera de Europa), mientras que los textiles se producían originalmente a partir de materiales naturales (por ejemplo, lana, algodón, lino y seda). Este es otro sector en el que la biomasa deberá hacer una mayor contribución si se quiere evitar el uso de materias primas fósiles. El lino y el cáñamo podrían utilizarse como materias primas alternativas para las fibras de algodón. El bambú y otros flujos lignocelulósicos, incluidos el reciclaje de textiles y residuos, se utilizan cada vez más como fuente de celulosa para la producción de viscosa. Además, se están desarrollando variantes de base biológica de fibras sintéticas como el ácido poliáctico, los poliésteres y la poliamida.

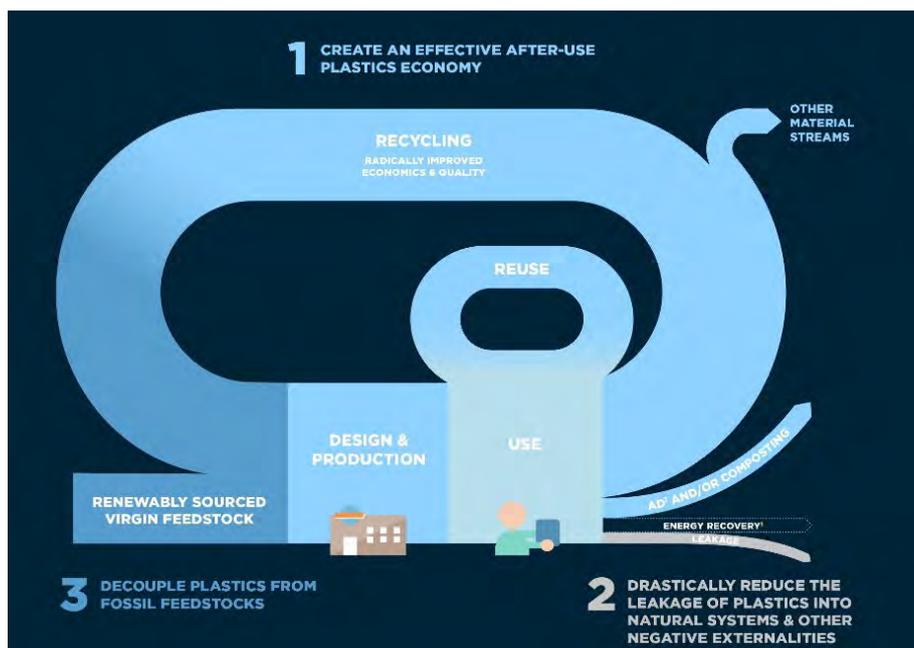


Figura 31. La 'nueva economía de los plásticos' (Fundación Ellen MacArthur).⁹³

8.6 Químicos

La industria química lleva utilizando materias primas renovables (aceite, almidón, azúcar, celulosa) para la producción de productos químicos y materiales desde hace



Figura 32. El bambú es una planta que se utiliza cada vez más en aplicaciones textiles.

décadas. Con la aparición de las materias primas fósiles, muchas materias primas renovables fueron sustituidas por materias primas fósiles y se crearon numerosos productos químicos y materiales nuevos (plásticos), que nos ofrecen una gran comodidad. Algunos ejemplos son el material de envasado de alimentos, que prolonga considerablemente su vida útil, y los envases ligeros, que mantienen bajos los costos derivados del transporte.

En la actualidad, el 80% de las materias primas para la industria petroquímica se utilizan para producir plásticos. La producción de estos materiales a partir de biomasa en lugar de fuentes fósiles contribuirá considerablemente al desarrollo de la bioeconomía. Desde un punto de vista técnico, normalmente es posible producir componentes químicos a partir de biomasa. Principalmente, los integrantes y los bloques de construcción químicamente idénticos a sus homólogos fósiles están aumentando notablemente porque pueden usarse directamente en la infraestructura existente.⁸⁷

Los azúcares son muy adecuados para producir componentes químicos con funcionalidades ácidas y alcohólicas como el etanol, butanol, glicoles, ácido láctico y ácido succínico, porque la materia prima ya contiene los átomos de oxígeno necesarios para estos componentes básicos. La producción de ácido láctico para ácido poliláctico (PLA) ni siquiera tiene una contraparte fósil y es un excelente ejemplo de un nuevo material de base biológica. Los componentes químicos que se pueden utilizar en muchos

plásticos diferentes debido a su estructura química específica son prometedores y se espera que crezcan considerablemente. Los poliésteres, unos polímeros que generalmente constan de dos componentes químicos, uno con dos funcionalidades ácidas y otro con dos funcionalidades alcohólicas, son especialmente interesantes porque tienen el potencial de fabricarse a partir de biomasa. Esto incluso puede provocar un cambio en el uso de diferentes tipos de plásticos. Las poliolefinas como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), en particular, son menos eficientes para producirse a partir de biomasa y su tamaño de mercado podría disminuir a favor de los poliésteres de base biológica si aumenta el uso de biomasa como materia prima.

8.7 Composta y mejora del suelo

La composta se utiliza para mejorar la tierra, pero las fracciones minerales de los flujos de biomasa también se pueden utilizar para este propósito. Además, el metano del biogás se puede utilizar como materia prima para la producción de amoníaco, un ingrediente para fertilizantes químicos.



Figura 33. La remolacha azucarera y la pulpa de remolacha azucarera son una fuente de diversos carbohidratos que pueden aprovecharse en la industria química.

8.8 Conclusiones

Los Países Bajos necesitarán importar una parte sustancial de la biomasa necesaria en el futuro, al igual que lo hace hoy. Además, se espera que la energía sea una aplicación importante. Estos dos aspectos deben sincronizarse entre sí en forma de biomasa densa en energía, seca y baja en minerales que, además, deberá transportarse a través de los continentes. Esto requiere la conversión de residuos de biomasa de agricultores y procesadores de todo el mundo en productos básicos, es decir, en unidades fácilmente comercializables de productos semiacabados uniformes como los pellets.

La biomasa holandesa se puede utilizar de manera más eficaz y se puede incrementar su disponibilidad en mayor cantidad. Los tipos de biomasa que pueden estar disponibles en los Países Bajos tienen propiedades de amplio rango, lo que significa que pueden usarse en diversos tipos de aplicación. La biomasa es una materia prima extremadamente importante para su aplicación en alimentos, alimento para animales, materiales y productos químicos, especialmente si se debe evitar el uso de materias primas fósiles para materiales y productos químicos. Además, sería lógico utilizar carbohidratos de remolacha azucarera y granos para diversas aplicaciones en la industria química.

El uso eficiente y sostenible de la biomasa depende de elegir entre las distintas combinaciones adecuadas de propiedades, conversiones y aplicaciones de la biomasa. Esperamos que este folleto haya ofrecido una serie de pautas en este sector.

9 Referencias

1. www.co2levels.org
2. Harmsen, P., S. Lips, H. Bos, B. Smit, S. van Berkum, J. Helming, R. Jongeneel (2014) Suiker als grondstof voor de Nederlandse chemische industrie; WFBR Report 1494
3. CBS Achtergrond-informatie Soja, 2014
4. Poorter, H., A.M. Jagodzinski, R. Ruiz-Peinado, S. Kuyah, Y. Luo, J. Oleksyn, V.A. Usoltsev, T.N. Buckley, P.B. Reich and L. Sack, 2015. How does biomass distribution change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytologist*: July 2015:1-14
5. www.sankey-diagrams.com/tag/canada/
6. Richtlijnen voor het meten van inlands rondhout ten behoeve van de verkoop, Bosschap 2002
7. Kuiper, L. and S. de Lint (2008) Binnenlands biomassapotentieel: biomassa uit natuur, bos, landschap, stedelijk groen en houtketen; Ecofys
8. Nabuurs, G.J., M.J. Schelhaas, J. Oldenburger, A. de Jong, R. Schrijver, G. Woltjer, H. Silvis and C.M.A. Hendriks, 2016. Nederlands bosbeheer en bos- en houtsector in de bio-economie; Scenario's tot 2030 in een internationaal bio-economie perspectief. WUR Report 2747
9. Microalgen: het groene goud van de toekomst? Grootschalige duurzame kweek van microalgen voor de productie van bulkgrondstoffen, Hans Wolkers, Maria Barbosa, Dorinde Kleinegris, Rouke Bosma, Rene Wijffels, Paulien Harmsen (editor) (2011)
10. CBS Renewable Energy 2017
11. www.follow-this.org
12. www.afpm.org
13. www.cbs.nl: Energy balance sheet; supply, transformation and consumption
14. www.wikipedia.com, Groningen gas field
15. DUKES: Digest of United Kingdom Energy Statistics (2017) Calorific values of fuels; publication of the UK Dept for Business, Energy & Industrial Strategy; www.gov.uk/government/statistics/dukes-calorific-values
16. www.phyllis.nl
17. Internationalisation monitor - CBS, 2016
18. Bos, H.L., M.J.A. van den Oever and K.P.H. Meesters (2014) Kwantificering van volumes en prijzen van biobased en fossiele producten in Nederland, WFBR Report 1493.
19. CBS Achtergrondrapport sojabarometer 2012

20. CBS www.cbs.nl/en-gb/news/2018/12/palm-oil-imports-on-the-rise-again, 2018
21. Bosberichten 2016/3
22. www.bosenhoutcijfers.nl
23. www.alcogroup.com
24. www.fcn.eonerc.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaahdapq
25. www.cbs.nl. Afvalbalans, afval naar sector; nationale rekening
26. European Union, 2012. Energy Roadmap 2050. ISBN 978-92-79-21798-2
27. www.kylesconverter.com/energy,-work,-and-heat/petajoules-to-tons-of-oil-equivalent
28. Bos, H.L., Meesters, K.P.H., Conijn, S.G., Corré, W.J., Patel, M.K., 2012. Accounting for the constrained availability of land: a comparison of bio-based ethanol, polyethylene, and PLA with regard to non-renewable energy use and land use. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 6(2):146-158
29. Bos, H.L. and J.P.M. Sanders, 2013. Raw material demand and sourcing options for the development for a bio-based chemical industry in Europe: Part 1 : Estimation of maximum demand. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 7(3):246-259.
30. www.ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/9172750/KS-EN-18-001-EN-N.pdf/474c2308-002a-40cd-87b6-9364209bf936
31. IEA Renewables Information Overview, 2017
32. IEA Key World Energy Statistics, 2018
33. Stork, M., J. de Beer, N. Lintmeijer and Bert den Ouden, 2018. Chemistry for Climate: Acting on the need for speed; Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050
34. De Gooijer, C.D., (2018) Bio-based Economy in NL: Tour de horizon
35. www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html
36. FAOstat, <http://chartsbin.com/view/1162>
37. Bos H.L. and J. Broeze (2019) BioFPR, publication in preparation.
38. Koppejan, J., W. Elbersen, M. Meeusen and P. Bindraban, 2009. Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020. SenterNovem project 200809.
39. Schulze, P., J. Holstein, H. Vlap, 2017. Biomassapotentieel in Nederland- Verkennende studie naar vrij beschikbaar biomassapotentieel voor energieopwekking in Nederland. DNV.GL Report GCS.17.R.10032629.2.

-
40. Ros, J., J. Olivier, J. Notenboom, H. Croezen and G. Bergsma, 2012. Sustainability of biomass in a bio-based economy: A quick-scan analysis of the biomass demand of a bio-based economy in 2030 compared to the sustainable supply. PBL Publication number: 500143001
 41. Elbersen, H.W., M. van der Zee and H.L. Bos, 2010. The role of 4F crops in EU27 under contrasting future scenarios - Final report on WP6; DOI: 10.13140/RG.2.1.2661.3603
 42. Mendes Souza, G., R.L. Victoria, C.A. Joly and L.M. Verdade (eds), 2015. Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps. SCOPE Report 72
 43. Dornburg, V., D. van Vuuren, G. van de Ven, H. Langeveld, M. Meeusen, M. Banse, M. van Oorschot, J. Ros, G.J. van den Born, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, P. Verweij, E. Lyseng and A. Faaij, 2010. Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. *Energy Environ. Sci.* 2010 (3):258–267
 44. Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Khesghi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
 45. www.groengas.nl/kaart-bio-energie-installaties-nederland/
 46. www.meerlanden.nl
 47. www.boerderij.nl/Home/Nieuws/2016/1/Akkerbouwer-casht-met-mest-2752844W/
 48. www.icis.com/explore/resources/news/2018/03/29/10207802/eu-fuel-ethanol-prices-plummet-on-market-length-eu-policy-worries/
 49. www.bvor.nl/kaart-biomassawerven/
 50. Bruins and Kwast, 2017. *Tarievenlijst 2017*
 51. www.grondwerkentrikikoen.be
 52. www.warmtebedrijfede.nl
 53. AEB Annual Report 2016.
 54. AEB Annual Report 2017.
 55. www.wisenederland.nl/groene-stroom/dossier-kolen

56. www.nl.wikipedia.org/wiki/Houtgas
57. Smekens, K., Meijer, R., M. Cremers, 2017. Kostenonderzoek verbranding en vergassing van biomassa SDE+ 2018. ECN Report ECN-N--17-009
58. Meijden, C.M. van der, W. Sierhuis, A. van der Drift, 2011. Waste wood fueled gasification demonstration project. Presented at the Renewable Energy World Europe Conference and Exhibition, 7-9 June 2011, Fiera Milano City, Milan, Italy
59. www.btg-btl.com
60. <https://www.biobasedeconomy.nl/2019/04/02/mega-order-uit-finland-voor-twentse-energie-innovatie/>
61. www.ecp-biomass.eu/sites/ecp-biomass.eu/files/books/HP_reviewECP%20technologie%20beschrijving%20Pyrolyse%20-%2028_01_2011.pdf
62. Verbraeken, 2017. ChainCraft schaal op bij productie biologische vetzuren. Het Financiële Dagblad 1-5-2017, p. 15.
63. www.reverdia.com
64. Groenestijn, J.W. van, Abubackar, H.N., Veiga, M.C. & C. Kennes (2013) Bioethanol. In: C. Kennes & M.C. Veiga (Eds) Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy. John Wiley & Sons
65. www.lanzatech.com
66. www.natureworksllc.com
67. www.besustainablemagazine.com/cms2/a-biorefinery-to-turn-urban-waste-into-biobased-products/
68. www.urbiofin.eu
69. Strong, P.J., B. Laycock, S.N.S. Mahamud, P.D. Jensen, P. A. Lant, G. Tyson and S. Pratt, 2016. The Opportunity for High-Performance Biomaterials from Methane. *Microorganisms* 4(11): 1-20
70. www.corbion.com/fdca
71. [www.nl.wikipedia.org/wiki/Kritisch_punt_\(thermodynamica\)](http://www.nl.wikipedia.org/wiki/Kritisch_punt_(thermodynamica))
72. www.snb.nl/minifabriek-test-nieuwe-technologie-slibvergassing/
73. www.avantium.com
74. www.biorizon.eu
75. www.pulp2value.eu
76. www.voltachem.com
77. www.wur.nl/nl/project/Duurzaam-bio-asfalt-uit-lignine.htm
78. Wang, H., Y. Pu, A. Ragauskas and B. Yang, 2019. From lignin to valuable products—strategies, challenges, and prospects. *Bioresource Technology* 271: 449–461 :228–240

-
79. www.bioref-integ.eu/fileadmin/bioref-integ/user/documents/Martin_Lersch__Borregaard_-_Creating_value_from_wood_-_The_Borregaard_biorefinery.pdf
 80. www.en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage
 81. The global status of CCS 2018. Global CCS Institute.
 82. www.en.wikipedia.org/wiki/Bio-energy_with_carbon_capture_and_storage
 83. Kemper, J., 2017. Biomass with carbon capture and storage (BECCS/Bio-CCS); https://ieaghg.org/docs/General_Docs/IEAGHG_Presentations/2017-03-10_Bioenergy_lecture_2_Read-Only.pdf
 84. www.drax.com/press_release/world-first-co2-beccs-ccus/
 85. Burhenne, L., M. Damiani and Th. Aicher, 2013. Effect of feedstock water content and pyrolysis temperature on the structure. Fuel 107:836–847.and reactivity of spruce wood char produced in fixed bed pyrolysis
 86. Kumar, H., P. Baredar, P. Agrawal and S.C.Soni, 2014. Effect of moisture content on gasification efficiency in down draft gasifier. International Journal of Scientific Engineering and Technology 3(4):411-413.
 87. Paulien F. H. Harmsen, Martijn M. Hackmann and Harriëtte L. Bos, 2014. Green building blocks for bio-based plastics. Biofuels Bioproducts and Biorefining 8(3) 306-324
 88. Dammer, L., Carus, M. and S. Piotrowski, Sugar as feedstock for the chemical industry. What is the most sustainable option? Nova-Institut GmbH, Germany, January 2019
 89. www.climatechangeconnection.org
 90. Heerdt, G. ter, 2014. Waterplanten maaien, conserveren en verwerken. Waternet Report no. 14.123373
 91. Meesters, K., P. Boonekamp, M. Meeusen, D. Verhoog, W. Elbersen, 2010. Monitoring groene grondstoffen. Platform Groene Grondstoffen
 92. Nova Insitut at <http://bio-based.eu/graphics>
 93. www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/activities/new-plastics-economy
 94. www.european-bioplastics.org

Detalles de la publicación

Biomasa para la economía circular

Todo lo que querías saber sobre la biomasa no te atrevías a preguntar

Johan van Groenestijn, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos

Con nuestro agradecimiento especial a Wolter Elbersen, René van Ree, Koen Meesters y Lesly García Chávez

Encargado por TKI-BBE

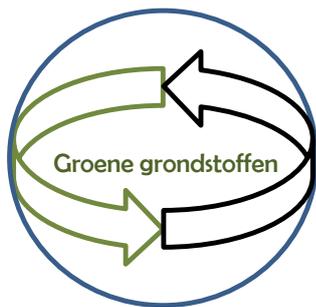
La traducción al inglés fue financiada por el Ministerio de Economía y Clima de los Países Bajos y por el proyecto BLOOM, que tiene como objetivo impulsar el conocimiento de la bioeconomía de los ciudadanos europeos y está financiado por la Comisión Europea en el marco del Programa Marco Horizonte 2020, Acuerdo de subvención nº 773983.

La traducción al español fue financiada por Wageningen UR.

© 2020 Todos los derechos reservados
Wageningen Food & Biobased Research
DOI: <https://doi.org/10.18174/535237>
ISBN: 978-94-6395-623-9

Wageningen Food & Biobased Research
Bornse Weilanden 9
PO Box 17
6700 AA Wageningen
<https://www.wur.nl/wfbr>

Esta publicación fue posible gracias a TKI-BBE. Es la vigésimo tercera publicación de una serie de publicaciones sobre el uso de la biomasa, las materias primas agrícolas y las corrientes secundarias en productos seguros y saludables para los mercados de consumo e industriales (ver también: www.groenegrondstoffen.nl y www.biobasedeconomy.nl).



Boosting European Citizens' Knowledge and Awareness
of Bio-Economy Research and Innovation

