

ECONOMIA
CIRCULAR:
ENERGÍA Y
COMBUSTIBLES

5





La Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA) es una asociación mundial, independiente y sin fines de lucro, que trabaja en el interés público para promover y desarrollar la gestión sostenible de los residuos.

La ISWA tiene miembros en más de 60 países y es la única asociación mundial que promueve la gestión sostenible, integral y profesional de residuos.

El objetivo de la ISWA es el intercambio mundial de información y experiencia en todos los aspectos de la gestión de residuos. La asociación promueve la adopción de sistemas aceptables de gestión profesional de los desechos mediante el desarrollo tecnológico y la mejora de las prácticas de protección de la vida humana, la salud y el medio ambiente, así como la conservación de los materiales y los recursos energéticos

La visión de ISWA es una Tierra donde no existan residuos. Los desechos deben ser reutilizados y reducidos al mínimo, luego recogidos, reciclados y tratados adecuadamente. La materia residual debe ser eliminada de forma segura, asegurando un ambiente limpio y saludable. Todas las personas en la Tierra deberían tener el derecho de disfrutar de un ambiente con aire, tierra, mares y suelos limpios. Para poder lograr esto, necesitamos trabajar juntos.

Resumen ejecutivo



Imagen por Sysav

En junio de 2014 la Junta del ISWA estableció el Grupo de Tareas del ISWA sobre gestión de recursos para esbozar la creciente contribución de los sectores de desechos a la gestión de recursos y a la economía circular.

El presente informe es uno de los seis preparados por el Equipo de Tareas y en él se describe el valor de la utilización de los desechos para generar energía y combustibles y las economías logradas en el uso de combustibles fósiles y otros recursos energéticos.

Los principios esbozados son válidos a escala mundial, pero los datos y las tecnologías examinadas se centran en los países de la OCDE.

Existe una gama de métodos para producir energía y combustibles a partir de desechos. Los más comunes son:

- - procesos de combustión para generar electricidad y calor;
- - procesos de digestión anaeróbica (AD) para producir biogás; y
- - la recogida y el tratamiento del biogás emitido por los vertederos.

El biogás puede refinarse y añadirse a la red de distribución de gas natural; utilizarse como combustible para vehículos o para generar electricidad.

La recuperación de energía y el reciclado de materiales se complementan mutuamente. Hay muchos ejemplos, como:

- En las plantas de biogás, la materia orgánica se convierte en biogás y el residuo (digestato) se utiliza para mejorar la estructura y la fertilidad del suelo a través de su contenido de nutrientes.
- Plantas de conversión de desechos en energía (WtE) que eliminan los residuos de los procesos de reciclaje, los desechos contaminados y los materiales que ya no se pueden reciclar (debido al deterioro de la calidad a través de muchas etapas de reciclaje). Los metales (que son difíciles de reciclar de los productos compuestos) se recuperan de las cenizas de fondo, que a su vez pueden utilizarse en la construcción.

La recuperación de energía sirve al mismo objetivo de alto nivel que muchas actividades de reciclaje de materiales. Por ejemplo, uno de los objetivos del reciclaje de plástico es el ahorro de petróleo o gas natural, que normalmente se utilizan con fines energéticos. De manera similar, el petróleo, el gas u otros recursos energéticos primarios se ahorran mediante la recuperación energética de los plásticos en las instalaciones de producción de electricidad de la WtE. El sistema de proceso que se utilice dependerá de los resultados, la eficiencia del proceso y las circunstancias locales.

SALIDAS EN LA OCDE	ACTUAL	POTENCIALES	
	TWh POR AÑO*	TWh POR AÑO*	VALOR B€ POR AÑO
● Electricidad de WtE	75	300	15
● Calor de Wte	70	400	8
● Biogás/metano de la EA**	-	40	1.2 - 1.6
● Gas de vertedero**	50	20***	0.6 - 0.8
● Metales recuperados de las cenizas de fondo, WtE	-	-	4

*: 1 TWh es el contenido energético de unos 90 millones de m³ de gas natural, o el consumo anual de electricidad de unos 300.000 hogares para iluminación y aparatos.

** de MSW, solamente

***Después de desviar los residuos para WtE y AD. 130 TWh suponiendo una mejor recogida de gas y sin cambios en las cantidades de los vertederos.

El consumo de energía de los países de la OCDE es enorme, y más del 60% de esa energía es suministrada por combustibles fósiles. Los residuos, actualmente contribuyen con alrededor del 1% de ese suministro de energía, pero tiene el potencial de aumentar más de tres veces. Para reducir el uso de combustibles fósiles y mitigar los efectos climáticos asociados, todos los demás recursos energéticos deben emplearse al máximo de su potencial, incluidos los desechos.

El cambio climático no se trata sólo de reemplazar los combustibles fósiles. También se trata de mitigar otros gases climáticos como las emisiones de metano de los vertederos. El principal impacto climático del sector de los desechos se reduce sustancialmente cuando se recoge el gas de los vertederos y se utiliza para la recuperación de energía. Sin embargo, se obtienen mayores beneficios ambientales cuando la recuperación de materiales y la utilización de recursos energéticos se utilizan conjuntamente para desviar los residuos a las plantas de AD, instalaciones de WtE y de vuelta a las actividades de fabricación, como parte de los programas de gestión integrada de residuos.

En este informe se llega a la conclusión de que la materia prima para el WtE podría duplicarse con creces, tomando otros 200 millones de toneladas anuales (Mtpy) de desechos de los vertederos, y otras 40 Mtpy para la generación de biogás sin interrumpir las actividades de reciclaje dedicadas.

En el cuadro anterior se enumeran los productos actuales y potenciales en materia de energía, combustibles y metales procedentes del tratamiento de desechos, junto con una indicación de su valor económico.

Las tecnologías para WtE, plantas AD y recuperación de gas de vertedero están completamente desarrolladas. Los mercados para la producción de electricidad y/o biogás están fácilmente disponibles. Muchas instalaciones ya funcionan como plantas de cogeneración de calor y energía, siempre que la infraestructura de calor esté presente. La futura coordinación entre el desarrollo del calentamiento de los distritos y los sistemas de recuperación de energía a partir de los desechos puede aumentar la eficiencia de los productos energéticos y aprovechar la oportunidad de enfriamiento cuando la demanda de calor sea baja o inexistente.

En este informe también se han evaluado otras formas de recuperación de energía, como el gas de la pirólisis y la gasificación. Esta tecnología no se considera una solución importante para la mayoría de los países de la OCDE para la gestión de los desechos sólidos municipales heterogéneos, durante los próximos 30 años debido a los problemas técnicos y financieros que siguen existiendo.

Se requiere urgentemente el desvío de los desechos de los vertederos para reducir al mínimo las emisiones de metano a la atmósfera como parte de los esfuerzos por reducir los gases del cambio climático.

La producción de energía y combustibles a partir de residuos es una solución que reducirá la demanda de combustibles fósiles y proporcionará nutrientes y carbono a nuestros suelos. Se necesitan marcos legislativos y fiscales eficaces en todos los países de la OCDE para obtener los resultados que se indican en el presente informe. Los primeros pioneros han demostrado cómo se puede lograr ese cambio utilizando una serie de objetivos jurídicos, el apoyo a las nuevas infraestructuras e incentivos fiscales, como los impuestos sobre los vertederos. Es necesario adoptar medidas urgentes para aprovechar estas oportunidades.

Mensajes clave

La recuperación de energía de los desechos va de la mano con el reciclaje y como tal es una parte integrada de la economía circular

- La recuperación de energía complementa el reciclaje aumentando la recuperación total alcanzable, y ambos sirven al mismo propósito de ahorrar recursos naturales.
- Los residuos de los procesos de reciclaje pueden ser utilizados para la recuperación de energía.
- cuando la calidad de los productos reciclados se deteriora en el curso de varios círculos de reciclaje y el reciclaje ya no es factible, todavía se pueden utilizar para la recuperación de energía.
- Los metales que no se capturan en el sistema de recolección, por ejemplo porque están atrapados en productos combinados, pueden recuperarse de los residuos inertes después de la combustión.
- Los residuos contienen materiales y sustancias contaminadas con, por ejemplo, peligros sanitarios y de salud y, por lo tanto, deben ser retirados de la circulación. Tales materiales pueden ser destruidos sin peligro por combustión mientras se recupera la energía.
- Los países que tienen objetivos ambientales claros y ambiciosos para la gestión de sus desechos tienen una combinación de recuperación de materiales y energía. Los países con el mayor grado de recuperación de material son también, en su mayoría, los que tienen un mayor grado de recuperación de energía.

La recuperación de energía mediante la digestión anaeróbica de los desechos de origen biológico es un medio importante de utilizar materiales fácilmente degradables para la producción de energía

- Los nutrientes valiosos para reemplazar el fertilizante pueden ser recuperados cuando los desechos son digeridos en las plantas de biogás.
- La recuperación del gas de los vertederos es importante para limitar la emisión del gas climático, el metano, y para que esté disponible como fuente de energía.

La recuperación de energía a partir de los desechos es un importante factor que contribuye a ahorrar combustibles fósiles y a reducir el impacto climático

- los países de la OCDE y otros países similares tendrán un potencial para utilizar la energía de los residuos.
- requiere un sector de gestión de residuos bien organizado y una infraestructura energética para utilizar la producción a su máximo potencial.
- Si bien la infraestructura de electricidad suele existir, el desarrollo ulterior de las infraestructuras de gas, calefacción y refrigeración ofrecerá oportunidades para aumentar la eficiencia de la recuperación y el uso de la energía.

La recuperación de energía a partir de los residuos ha el potencial de expandirse y así aumentar su participación en el suministro de gas, electricidad y calor y ser un importante contribuyente a la reducción de los combustibles fósiles

- se estima que el potencial de recuperación de energía de los desechos sólidos urbanos y de los desechos similares a éstos en las instalaciones de conversión de desechos en energía de la OCDE es de 400 a 500 millones de toneladas anuales (Mtpy), de las cuales apenas la mitad se utilizan actualmente, lo que deja un potencial sin utilizar de unos 200 millones de toneladas.
- Las instalaciones de conversión de desechos en energía están presionando continuamente hacia una mayor eficiencia, haciendo que las nuevas instalaciones futuras sean más eficientes cuando se trata de reemplazar los combustibles fósiles.
- Las condiciones locales pueden afectar al valor de la energía generada. Por ejemplo, si se complementa la generación de electricidad con la producción de calefacción, refrigeración o vapor de proceso, aumentará el valor de los desechos como recurso energético.
- El biogás tiene el potencial de ser utilizado para la generación de energía de carga máxima o como combustible de transporte, dependiendo de las oportunidades de la infraestructura local.

Preparado por el grupo de trabajo de la ISWA sobre la gestión de los recursos

Autor principal:
Tore Hulgaard
Especialista en energía de residuos
Ramboll
Dinamarca



Con más de 20 años de experiencia en el asesoramiento sobre sistemas de recuperación de energía a partir de desechos en todo el mundo, Tore Hulgaard tiene una larga trayectoria en el tratamiento de cuestiones técnicas y ambientales relacionadas con los sistemas de conversión de desechos en energía, la recuperación de recursos y el tratamiento biológico de los desechos orgánicos.

Tiene una formación en ingeniería química y un doctorado de la Universidad Técnica de Dinamarca (1991) que proporciona la base técnica para tratar los sistemas de procesos con un enfoque particular en el control de las emisiones nocivas de los sistemas de conversión de energía. Tras adquirir experiencia en el sector en una empresa de fabricación de calderas (Alfa Laval Aalborg), en 1995 se incorporó a Ramboll como consultor independiente en todo el mundo.

Como una de las autoridades líderes en tecnologías de tratamiento de residuos en Dinamarca, ha proporcionado servicios de consultoría especializada a una amplia gama de clientes públicos y privados dentro del sector de los residuos. Ahora ocupa un puesto como Gerente Técnico en Ramboll.

Tabla de contenido

10	Introducción
10	Alcance
12	Materias primas
12	Residuos para su tratamiento mediante la conversión de desechos en energía
15	Residuos para la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica
16	Residuos de vertederos para la producción de gas
16	Lo que puede afectar a la disponibilidad futura de residuos para la recuperación de energía y combustibles
	Métodos de extracción de energía
18	Energía de desecho
18	Recuperación de material de las instalaciones de WtE
21	AD de los residuos orgánicos domésticos
23	Extracción y uso de gas de vertedero
25	Formas alternativas de energía, y desarrollos
26	
27	Rendimiento de la energía y los combustibles
28	Electricidad y calor
31	Gas natural y biogás
33	Gas de vertedero
34	Efectos climáticos de las formas de energía
38	Mercados y distribución
38	Electricidad
39	Calefacción/enfriamiento
39	Metano
40	Desarrollo de los mercados energéticos
40	Valoración de la energía y los combustibles y tendencias del mercado
42	Atractivo para los inversores
44	Referencias
46	Anexo

Introducción

La gestión de los recursos en el sector de los desechos tiene el objetivo de alto nivel de ahorrar recursos naturales. Los recursos naturales van desde los recursos energéticos primarios como el carbón, el gas natural, el petróleo y la madera/biocombustibles, pasando por el agua, los minerales y los metales, hasta los elementos de las tierras raras. Algunos son críticos porque su apariencia es limitada o por razones geopolíticas, y algunos recursos naturales están asociados con los impactos ambientales de su extracción o uso.

El reto es generar valor a partir de los desechos en términos de recursos naturales ahorrados. La recuperación de materiales es mejor que la recuperación de energía en este sentido cuando se trata de materiales clasificados, puros y homogéneos de alto valor que se recuperan fácilmente, como el plástico de la industria, el papel de prensa y donde los procesos energéticos no añaden ningún valor, como el vidrio y los metales puros.

Sin embargo, la recuperación de energía tiene su lugar cuando se trata de materiales que no se reciclan fácilmente, como materiales sucios o contaminados, materiales compuestos y materiales con una calidad no apta para la recuperación, por ejemplo, debido al deterioro de la calidad por la caída en cascada en el curso de varias secuencias de reciclaje. La recuperación de energía también puede ser la mejor opción para los materiales de bajo valor, como la madera y los materiales que requieren recursos desproporcionados para su recolección, manipulación y recuperación en un sistema de proceso separado.

Este estudio investiga, describe y analiza las posibilidades de recuperación de energía y combustibles a partir de residuos. Se investigan los mercados energéticos y las condiciones de mercado para el comercio de la energía y los combustibles, y se describen los beneficios y desventajas relacionados con la recuperación y el uso de la energía y los combustibles (en adelante, técnicos, financieros, ambientales y sociales).

El objetivo del informe es destacar la contribución que la recuperación de energía de los desechos aporta a la economía circular.

El estudio forma parte del grupo de trabajo de la ISWA sobre la gestión de los recursos y debe considerarse junto con las demás partes realizadas en paralelo con este estudio.

En el informe se abordarán las siguientes formas de energía y combustibles, ya que son las formas predominantes de producción de energía a partir de desechos:

- electricidad
- el vapor, el calentamiento, el enfriamiento
- biogás (metano)

La conversión de residuos en energía (WtE), donde los residuos son convertidos térmicamente con recuperación de energía, genera principalmente electricidad y calor. Las plantas de biogás generan biogás por digestión anaeróbica (AD), y el biogás es también el producto de los vertederos. El biogás puede utilizarse para la producción de electricidad (y calor) en el sitio o distribuirse para su uso en otros lugares, por ejemplo, para energía de procesos, procesos químicos o como combustible para el transporte.

Un beneficio común de la energía y los combustibles procedentes de desechos es que estos productos sustituyen a otros recursos energéticos, en particular a los combustibles fósiles y, por lo tanto, a sus emisiones de dióxido de carbono. En el informe se cuantificarán las contribuciones actuales y potenciales.

Así pues, las plantas de recuperación de energía a partir de los desechos tienen un doble propósito: sustituir otros recursos energéticos y formar parte del sistema de gestión de los desechos. En el informe se describirá la forma en que las plantas aportan otras contribuciones a la recuperación de los recursos, como los nutrientes de los desechos orgánicos y los metales de las cenizas de fondo.

Alcance

El ámbito geográfico y de mercado primario del estudio es el de los países de la OCDE, que representan a los países con un cierto nivel de desarrollo y un sistema de gestión de desechos establecido. Otras prioridades e iniciativas pueden ser pertinentes para los países en desarrollo, véase, por ejemplo, el informe sobre la globalización y la gestión de los desechos (ISWA, 2012) y la directriz de ISWA sobre la conversión de los desechos en energía en los países de ingresos bajos y medios (ISWA, 2013). Cuando los datos de la OCDE parezcan escasos o cuando sea importante incluir a otros países para obtener el cuadro completo, se podrán abordar otras zonas geográficas.

Se ha elegido un plazo de unos 30 años a partir de hoy para las perspectivas esbozadas, que es comparable a la vida técnica de los sistemas de procesos comunes y el lapso de tiempo que se puede considerar de manera realista. La atención se centra en las tecnologías que son las predominantes y que funcionan a gran escala y están disponibles comercialmente hoy en día. Sólo se describen brevemente las plantas a escala piloto y los sistemas de procesamiento que no se prevé que se utilicen ampliamente en el plazo previsto.

Energía de desecho (o WtE) se utiliza con el mismo significado que "incineración con recuperación de energía" en este informe. "Recuperación de energía a partir de residuos" se utiliza como expresión general para WtE, generación de biogás y otros tipos de recuperación de energía o combustibles a partir de residuos. La "digestión anaeróbica" (AD) se utiliza para un proceso biológico por el cual la materia orgánica se convierte en biogás. La EA podría ocurrir en plantas de biogás dedicadas o en vertederos, y el biogás generado en los vertederos se denomina "gas de vertedero" (LFG).



Materia prima

Residuos para el tratamiento por Waste-to-Energy

La materia prima para la producción de energía y combustibles son básicamente los desechos sólidos municipales (RSU) recogidos en los hogares y los desechos comerciales con un carácter similar al de los desechos domésticos. También puede incluir ciertos tipos de residuos industriales, de construcción y demolición (residuos C&D) aunque estas fracciones no se cuentan normalmente como MSW.

La generación de desechos sólidos urbanos es registrada por la OCDE a un nivel de alrededor de 530 kg per cápita por año, figura 1, y la eliminación varía entre los países, figura 2, lo que indica un uso significativo de los vertederos en algunos países con un reciclado y una recuperación de energía y combustibles limitados.

La figura 1 incluye sólo el MSW. Las definiciones en que se basa la distinción indicada entre los desechos domésticos y no domésticos para los RSU pueden variar entre los países en función del sistema de gestión de los desechos, y en particular la parte no doméstica puede clasificarse como RSU en algunos países y excluirse de los RSU en otros.

Las estadísticas de la OCDE revelan que la producción total de RSU en la OCDE asciende a 658 millones de toneladas por año (Mtpy), y que la cantidad de residuos de fabricación, residuos industriales y residuos de C&D típicamente sería aproximadamente igual a la cantidad de RSU, pero con grandes variaciones entre los países (OCDE, 2015).

Cinco grandes países no pertenecientes a la OCDE (Brasil, China, India, Indonesia y Rusia) producen un total de 300 Mtpy de DSM. Otros países tienen una generación de DSM aproximadamente en la misma escala que los países de la OCDE, medida en kilogramos per cápita por año, por ejemplo, Hong Kong, Singapur y otros lugares del Asia sudoriental.

Históricamente, los cambios en las cantidades de desechos se han correlacionado con el crecimiento económico. Las iniciativas políticas se esfuerzan por dissociar el crecimiento económico y la generación de desechos. Por lo tanto, en el presente informe se presupone que las cantidades de desechos no han variado, aunque se prevé cierto crecimiento económico en los países de la OCDE.

De la figura 2 se desprende que la proporción de RSU incinerados con recuperación de energía varía significativamente entre los países, y oscila entre el 0 y más del 50%, con un promedio de alrededor del 19%. Una pequeña parte de los desechos sólidos urbanos se incinera sin recuperación de energía, lo que representa aproximadamente el 3% de los desechos sólidos urbanos en la OCDE (OCDE, 2013). Por lo tanto, se estima que la incineración total de DSM es el 22% de 658 Mtpy o 145 Mtpy, (OCDE, 2013).

Además de los RSU, algunos tipos de residuos industriales y parte de los residuos de C&D son tratados por la WtE y aumentarán considerablemente la cantidad de residuos utilizados para la recuperación de energía. Las estadísticas de la OCDE no revelan detalles sobre cómo se gestionan los flujos de residuos industriales y de C&D. Sin embargo, el promedio de materia prima para WtE parece ser 70% de MSW y 30% de residuos industriales y C&D, cf. Cuadro 3 de la sección 5.1. Con esta cuota, alrededor de 60 Mtpy de residuos industriales y residuos de C&D son tratados por WtE, cf. Figura 3.

En la figura 2 se muestra que los países con objetivos ambientales claros y ambiciosos para su gestión de desechos prácticamente todos tienen una combinación de recuperación de materiales y energía. Los países con mayor grado de recuperación de material son también a menudo los que tienen un mayor grado de recuperación de energía. Esto se aplica, por ejemplo, a Suiza, los Países Bajos, Suecia, Dinamarca, Japón y Noruega, que prácticamente han eliminado los vertederos, y alrededor del 50% de los residuos domésticos se utilizan para la recuperación de energía en las instalaciones de WtE. Desde esta perspectiva, la recuperación de material, la recuperación de energía y el tratamiento biológico no se excluyen mutuamente. El potencial máximo de WtE puede evaluarse a partir de la situación en esos países.

En caso de que todos los países de la OCDE instalaran suficiente capacidad de WtE y alcanzaran el 50% de WtE de los desechos sólidos urbanos, esto duplicaría con creces el

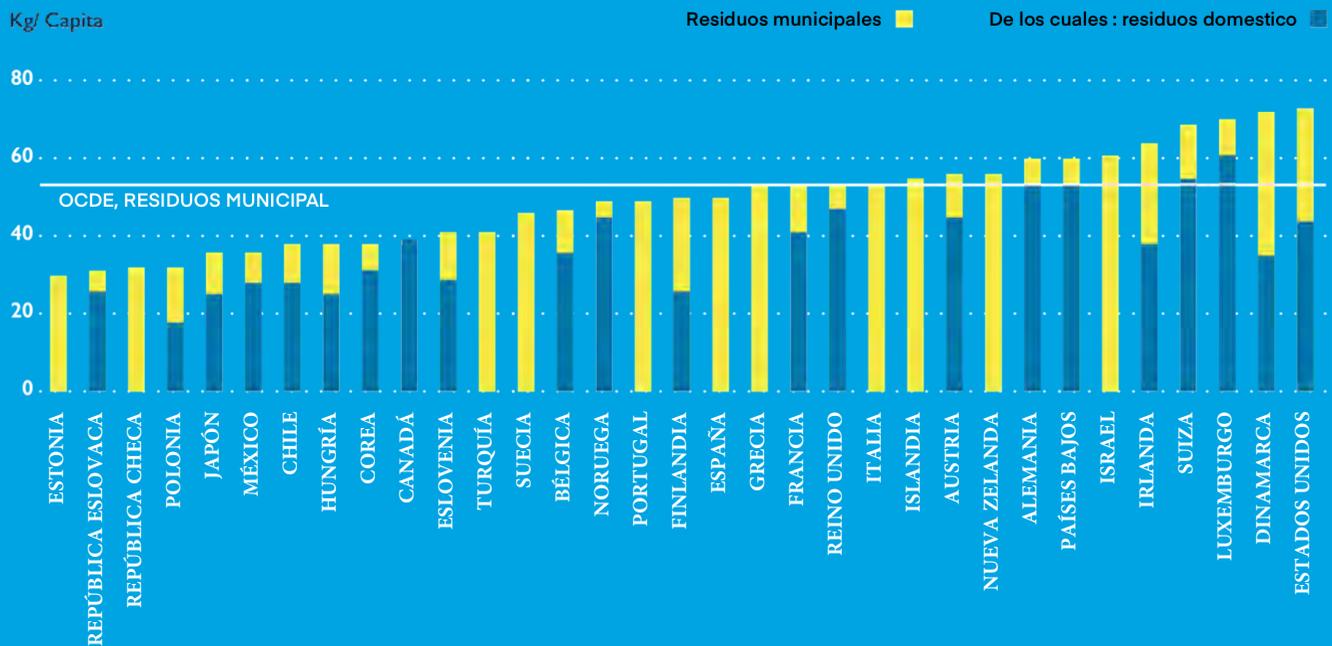
rendimiento de los desechos para la recuperación de energía, pasando de unas 145 Mtpy a unas 330 Mtpy de desechos sólidos urbanos, y por lo tanto, más del doble de la producción de energía de esta fuente.

Con la proporción de 70:30 entre los RSU y los residuos industriales y de I+D, el potencial de los residuos industriales y de I+D adecuados para el tratamiento de aguas residuales se estima en unos 140 millones de toneladas por año.

El potencial total de WtE de los desechos municipales e industriales/C&D suma 470 Mtpy, recuperando un potencial no utilizado de alrededor de 265 Mtpy, que actualmente está en los vertederos.

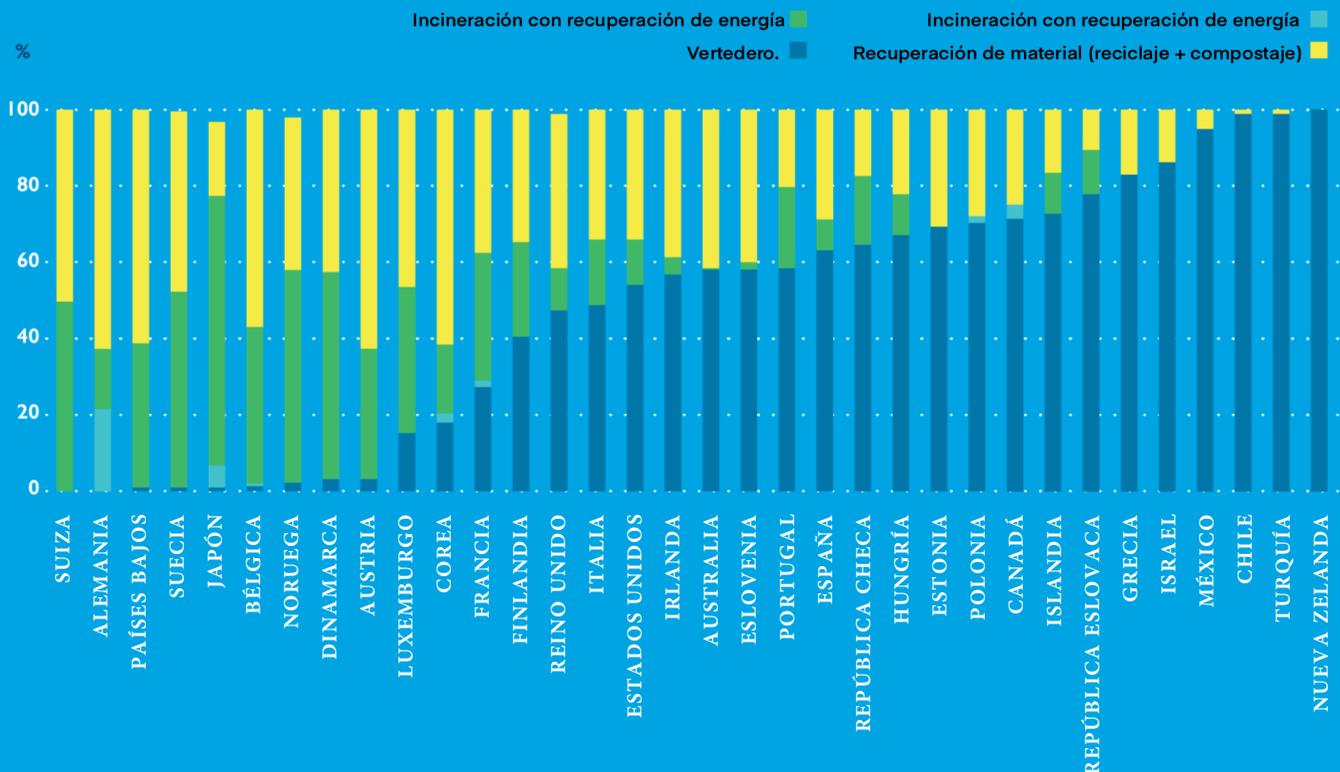


Fig. 1 | Generación de desechos sólidos municipales en los países de la OCDE, kg per cápita en 2011



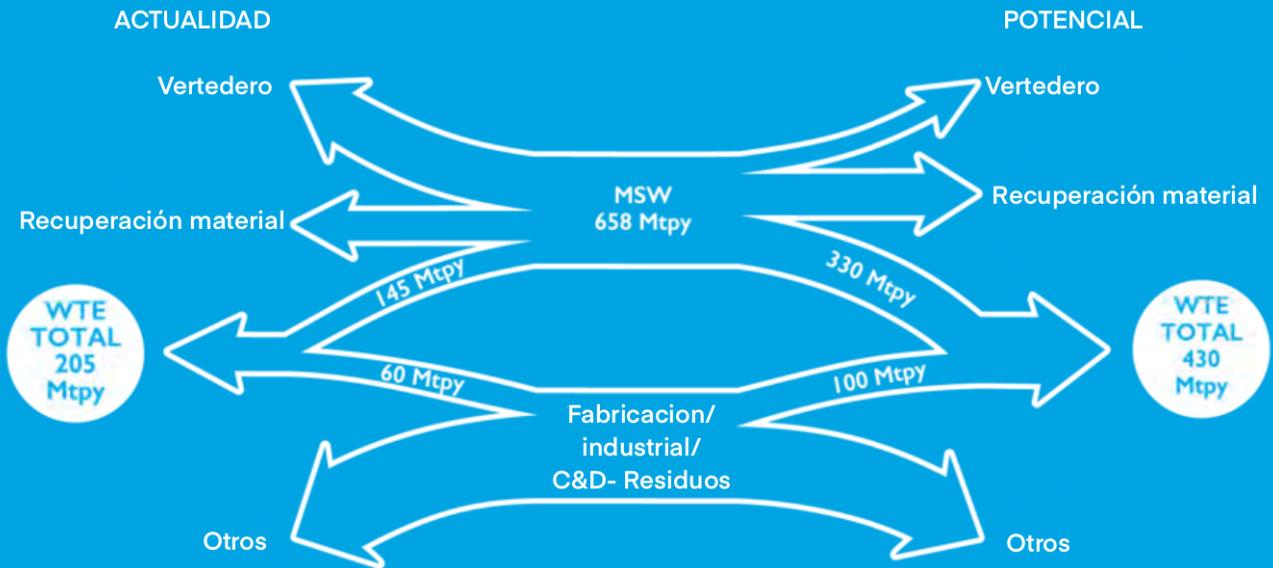
Fuente: OCDE, 2013

Fig. 2 | Acciones de eliminación y recuperación de residuos municipales, 2011



Fuente: OCDE, 2013

Fig. 3 | Flujos de residuos actuales y potenciales a WtE



Las iniciativas políticas para aumentar la recogida de desechos de alimentos, así como las iniciativas de reciclado, dirigen los desechos de las ELA a otras opciones de tratamiento de desechos, como se describe en las secciones siguientes. Sin embargo, se considera que los materiales contaminados, los materiales compuestos, los materiales de calidad no apta para la recuperación, los materiales de bajo valor y los rechazos de los procesos de recuperación constituyen una cantidad significativa.

Un reciente informe sueco describe con más detalle las relaciones entre la calidad de los materiales, la recuperación del material y la recuperación de la energía, (Avfall Sverige, 2015). En el informe se describe que en los estudios de sistemas ambientales que comparan la recuperación de material y la recuperación de energía, los cálculos suelen suponer una recuperación de material basada en fracciones puras y homogéneas, y que en realidad los desechos consisten en una gran variedad de bienes desechados con enormes diferencias en cuanto al potencial de recuperación de material. Los desechos residuales están compuestos en la mayoría de los casos por productos heterogéneos para los que hay poco potencial de recuperación material realista y económicamente viable.

El informe también aborda los bienes contaminados: "En el caso de algunos tipos de

desechos es necesario destruir el material mediante la combustión, ya que el proceso de recuperación de material puede exponer riesgos para la salud debido, por ejemplo, al alto contenido de bacterias o si el material contiene por otros medios sustancias peligrosas que no deberían llegar a la sociedad".

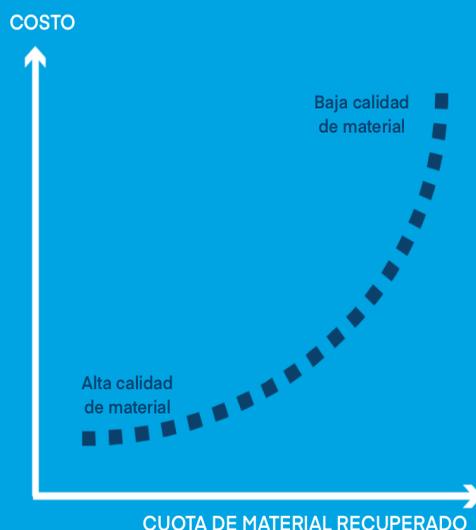
El autor considera acertado dar prioridad a la recuperación de material sobre la recuperación de energía, como en la jerarquía de los desechos, y que hay formas de crear condiciones para una mejor recuperación de material mediante una mejor separación y un desarrollo del producto hacia bienes más reciclables. Los productos simples y de alta calidad serán los primeros en ser separados para la recuperación del material. Una baja calidad del material significa que el beneficio ambiental de la recuperación también será menor. Como se ilustra en la figura 4, el costo de la recuperación aumenta con la proporción de materiales recuperados, mientras que la calidad del material disminuye. Por lo tanto, siempre habrá un punto de equilibrio para una determinada categoría de desechos, en la que ya no se justifica un mayor grado de recuperación de material desde el punto de vista de los costos y los recursos, y la recuperación de energía será una solución mejor. El informe de Avfall Sverige también señala que los materiales desechados del reciclaje, "Un factor está relacionado con la

calidad del material recuperado. Cada vez que un material es reciclado, la calidad se deteriora y cuando la calidad del material finalmente es pobre no tiene mercado. Otro factor que debe mencionarse es que los propios procesos de recuperación de materiales pueden dar lugar a residuos o desechos que no pueden recuperarse. Esto es particularmente el caso de los plásticos y el papel. Esto también sugiere que la recuperación de material y energía son complementarias entre sí.

Para la evaluación posterior se supone que el potencial de 470 millones de toneladas anuales aptas para el WtE se reducirá con el tiempo a unos 430 millones de toneladas anuales debido al aumento de la recuperación de materiales y a la mejora de las opciones de reciclado. Esto supone una mayor disponibilidad de residuos para el WtE que es, por tanto, de 225 Mtpy.

El potencial no utilizado no incluye los desechos de la agricultura, por ejemplo, la paja, los residuos forestales, el estiércol y la paja de las aves de corral. Estos pueden considerarse biocombustibles, que quedan fuera del ámbito del presente estudio (aunque el tratamiento térmico de algunos residuos agrícolas puede estar sujeto al reglamento de incineración de desechos).

Fig. 4 | **Relación entre el costo de recuperación del material y la calidad de la materia prima**



El costo de la recuperación aumenta con la proporción de material recuperado, mientras que la calidad de los materiales recuperados disminuye.

Residuos para la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica

Los residuos para la digestión anaeróbica (AD) en plantas dedicadas a la AD suelen contarse como parte de los residuos reciclados, que en los países de la OCDE se contabilizan en un promedio del 24% (160 Mtpy). Los residuos compostados, incluida la EA, se contabilizan por separado como un promedio del 9% (60 Mtpy) para la OCDE y del 14% para los países de la OCDE en Europa, (OCDE, 2013).

La generación total de residuos domésticos orgánicos para su posible segregación y digestión se cifra en unos 80 kg/persona al año en Suecia, aplicable sólo a los residuos alimenticios (NATURVÅRDSVERKET, 2014). Esto corresponde a aproximadamente el 15% de la generación total de MSW. Algunos residuos comerciales e industriales, en particular los productos desechados de los supermercados y restaurantes y los residuos de la industria alimentaria se suman al potencial. En el informe se estima que el total de desechos de alimentos en la cadena de suministro de alimentos de Suecia (excepto en la producción primaria) asciende a 127 kg per cápita por año.

La materia prima real disponible para las plantas de biogás será menor. Esto se debe en particular a la eficiencia de la segregación. Una parte de los residuos de alimentos se mezclará con otros residuos y no será posible separarlos y recogerlos mediante la recogida selectiva de residuos de alimentos. En segundo lugar, los desechos de alimentos recogidos por separado contienen cierta cantidad de sustancias extrañas y deben ser sometidos a un tratamiento previo. El rechazo después del pre-tratamiento puede constituir típicamente el 25-40% de los residuos entrantes.

Para las evaluaciones posteriores asumimos que el potencial explotable para la producción de biogás en plantas dedicadas a la deforestación asciende a la mitad de lo que se obtiene en las viviendas. Suponiendo 40 kg por año per cápita y 1.250 millones de habitantes en la OCDE, esto equivale a aproximadamente 50 Mtpy en los países de la OCDE.

La utilización de los residuos orgánicos para la recuperación de energía a través de la EA podría reducir el uso del compostaje, que convierte básicamente los mismos tipos de residuos y sufre de no tener recuperación de energía. Sin embargo, la materia prima para el compostaje suelen ser desechos de jardines y parques, de los cuales grandes partes no son particularmente adecuadas para la producción de biogás porque no se degradan fácilmente.

Los desechos de alimentos recogidos en los hogares, los desechos comerciales e industriales y otros desechos de origen biológico fácilmente degradables son posibles materias primas para la digestión anaeróbica y, por consiguiente, materias primas para la producción de biogás.

Residuos de vertederos para la producción de gas

De la figura 2 se desprende que en muchos países los vertederos son el destino predominante de los desechos, y en promedio los vertederos constituyen casi el 50%, con un total de alrededor de 300 millones de toneladas métricas de desechos sólidos urbanos como total para la OCDE (OCDE, 2013).

Los desechos para la producción de gas de vertedero (LFG) mediante la digestión anaeróbica en el vertedero no parecen contarse por separado en la OCDE. Constituirá una gran parte de los desechos vertidos, siempre que el contenido biodegradable, según el diseño y el funcionamiento del vertedero, tenga un potencial de generación de recuperación de energía en forma de metano.

Según los datos de los países de la OCDE con la mayor tasa de recuperación de materiales y energía, la cantidad de residuos que se depositan en los vertederos es inferior al 5% en el caso de los RSU. Se prevé que, junto con la aplicación de mejores sistemas de gestión de desechos y el aumento de la recuperación de material y energía en todos los países de la OCDE, la cantidad de desechos destinados a los vertederos se reducirá considerablemente en los próximos 30 años. La UE exigió que se redujera el vertido de desechos biodegradables para 2005, por lo que se han emprendido diversas iniciativas para reducir los vertidos. La velocidad de desviación de los vertederos depende de una serie de factores políticos, véase 3.4... Con el desarrollo en varios países europeos de verter sólo un pequeño porcentaje (la parte mineral) de los RSU, parece realista suponer que el vertido de RSU se reducirá a un tercio del nivel actual en el plazo considerado de 30 años. Por lo tanto, el vertedero de 100 Mtpy se utiliza más adelante en el informe para evaluar la generación de LFG.

Si bien es posible que la energía procedente de los GFT no sea una fuente importante de energía en los países de la UE y la OCDE, en muchos otros países existe una oportunidad considerable de utilizar esta energía. Esto es especialmente cierto en los países con economías en desarrollo que seguirán vertiendo cantidades importantes de desechos y que, por razones económicas, no considerarán los WtE en el futuro previsible. En esos países, la energía procedente de LFG puede proporcionar una fuente de energía local renovable.

Lo que puede afectar a la disponibilidad futura de residuos para la recuperación de energía y combustibles

En el futuro, una serie de factores afectarán a las posibilidades de alcanzar los potenciales de recuperación de energía y combustibles a partir de los desechos, como se ilustra en la tabla 1, en el que se resumen los principales factores impulsores y barreras para la extracción de WtE, AD-plantas y gas de vertedero.

Como el gas de los vertederos se genera a partir de residuos biodegradables en los vertederos, los factores que promueven el uso de los vertederos también apoyarán la producción de gas de los vertederos, pero su generación depende también del uso adecuado de la tecnología en la construcción de los vertederos y el uso del biogás recuperado.

Parece que hay muchas cuestiones que afectan a la disponibilidad futura de residuos para energía y combustibles. Es probable que continúe el desvío de desechos de los vertederos y que el incentivo de la abolición de los combustibles fósiles haga que los WtE y AD sean importantes contribuyentes en los futuros sistemas de gestión de desechos y energía.



Imagen por Ramboll

Tab. 1 Factores que afectan al futuro uso de WtE, AD y vertederos con recuperación de gas

Conversión de residuos de energía

Empujando hacia el wte.

- Políticas energéticas que favorezcan las energías no fósiles para reducir el impacto climático y la dependencia de los recursos energéticos importados.
- Generación de electricidad y calor en WtE como medio para sustituir los combustibles fósiles.
- ambición de desviar los residuos de los vertederos.
- Las actividades de reciclado generarán un rechazo de materiales no reciclables que es mejor utilizar para la WtE.
- El reciclaje en ciclos repetidos reduce gradualmente la calidad de los productos reciclados (efecto cascada), lo que requiere una salida para mantener la calidad, y estas salidas son probablemente entradas a la WtE.
- El desarrollo económico puede aumentar las cantidades de residuos y las infraestructuras asociadas necesarias.

Desvío de residuos de los wte

- políticas de gestión de residuos; amplias ambiciones de reciclaje. Esto incluye cambios en los métodos de producción de los nuevos bienes de consumo que hacen que el desmontaje facilite la reutilización o el reciclaje de los diferentes componentes.
- Recogida selectiva de residuos alimentarios.
- El vertedero puede ser preferible si la economía es el principal criterio de selección de la opción de gestión de residuos.

Digestión anaeróbica

Empujando hacia el anuncios

- políticas energéticas que favorezcan las energías no fósiles para reducir el impacto climático y la dependencia de la energía importada; la generación de biogás como medio de sustituir los combustibles fósiles para, por ejemplo, la generación de energía o el transporte.
- Políticas de desvío de residuos biodegradables de los vertederos (objetivos vinculantes/prohibición/impuestos).
- políticas de desvío de residuos alimentarios de la WtE.
- ambición de reciclar los residuos alimentarios digeridos para enriquecer el suelo con materia orgánica y nutrientes (especialmente fósforo y nitrógeno)

Desvío de residuos de los anuncios

- El vertedero puede ser preferible si la economía es el principal criterio de selección de la oportunidad de gestión de residuos.
- El coste de la recogida selectiva y las dificultades para alcanzar una calidad adecuada.
- Dificultad para utilizar el digestato generado como fertilizante

Vertedero con recuperación de gas

Impulsar el vertido y la recuperación de gases.

- espacio disponible para vertederos a una distancia manejable
- políticas que favorezcan soluciones de bajo coste para la gestión de residuos

Desviar los residuos del vertedero

- políticas energéticas que favorezcan la generación de energía a partir de los residuos.
- limitada eficiencia energética de la generación de gas.
- ausencia de recuperación de materiales.

Métodos de extracción de energía

Energía de desecho

Las instalaciones de conversión de desechos en energía (WtE) tienen como objetivo principal el tratamiento de los desechos, en particular en lo que respecta al saneamiento, el olor, la prevención de la propagación de enfermedades y otros tipos de contaminación; el objetivo secundario es recuperar la mayor cantidad de energía posible de los desechos.

La WtE se utiliza en todo el mundo, figura 5. En total, alrededor de 2.000 plantas están en funcionamiento en los países de la OCDE. En los 28 países de la UE (más Noruega y Suiza) están registradas unas 460 instalaciones de WtE que tratan aproximadamente 65 Mtpy de residuos. En América del Norte hay 85 instalaciones de WtE en funcionamiento que tratan aproximadamente 16 Mtpy. Los números se refieren a la lista de instalaciones de WtE en la mayoría de los países europeos y en América del Norte en (ISWA, 2012).

En Corea del Sur están en funcionamiento 35 instalaciones de WtE (cf. WTERT) que tratan alrededor de 3 millones de toneladas por año.

El Japón tiene una estructura ligeramente diferente, con unas 1.100 plantas WtE en funcionamiento que tratan aproximadamente 35 Mtpy, lo que da un rendimiento medio de menos de 30.000 tpy por planta. En Europa la capacidad media es de 150.000 tpy por instalación WtE. En Europa la capacidad media es de 150.000 tpy por instalación WtE. Aunque muchas plantas de WtE en

Japón son del mismo tamaño que en Europa, la mayoría de las plantas son muy pequeñas. Además, sólo el 26% de las instalaciones japonesas generan energía.

Las instalaciones de WtE están disponibles comercialmente en diferentes tamaños que van desde las típicas 200 tpd hasta 1.000 tpd para una unidad de WtE, y hasta 4.000 tpd para las instalaciones que tienen varias unidades de WtE. Con unos 330 días de funcionamiento al año, la capacidad puede ser de más de 1 Mtpy para una instalación.

Las instalaciones de WtE suelen basarse en hornos equipados con una caldera de recuperación de energía y un sistema de depuración de gases de combustión para garantizar el cumplimiento de los requisitos en materia de emisiones, Figura 6. Las plantas de WtE con una capacidad inferior a 200 tpd suelen generar calor sólo porque la producción de electricidad normalmente no es económicamente viable.

Una instalación de WtE se diseña, dimensiona y opera específicamente para cumplir los requisitos de emisión de una amplia gama de tipos de desechos con sus grandes variaciones en cuanto al aspecto físico, el valor calorífico y el contenido de las sustancias potencialmente contaminantes. La capacidad de hacer frente a las variaciones y los estrictos requisitos de emisión son lo que hace que las instalaciones de WtE se diferencien de los combustores convencionales para, por ejemplo, las centrales eléctricas que utilizan gas natural, carbón o biomasa.



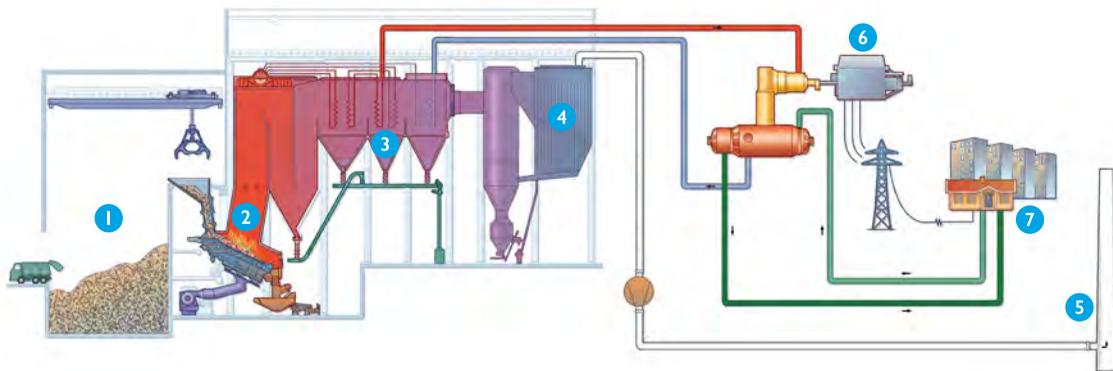
Imagen por Ramboll

Fig. 5 | WtE facilities in OECD



Numbers are approximate values

Fig. 6 | Instalación típica de conversión de desechos en energía (sin condensación de gases de combustión)



Funciones principales:

1. Búnker de residuos

2. Horno

3. Recuperación de energía en una caldera de vapor

4. Tratamiento de los gases de combustión

5. Apilar

6. Generación de electricidad en turbina/generador

7. Venta de calor por calefacción de distrito.

Para producir electricidad, el contenido energético de los gases de combustión se transfiere a vapor de alta presión en la caldera desde la cual se conduce a la turbina de vapor que acciona un generador de electricidad. La salida de vapor a baja presión de la turbina se condensa en un condensador enfriado por aire o agua. Si existe la posibilidad de utilizar el calor de la planta, el agua de refrigeración es agua de calefacción de distrito, que se calienta en el proceso, recuperando así cantidades importantes de energía adicional y aumentando la eficiencia energética total. La combinación se denomina cogeneración o combinación de calor y energía (CHP). Como alternativa a la venta de calor, algunas plantas exportan vapor a las industrias cercanas.

En caso de producción de enfriamiento, el vapor de baja presión es conducido a un enfriador de absorción, que enfría el agua que corre en un circuito cerrado.

En las plantas de sólo calor, la energía recuperada en la caldera se transfiere a la red de calefacción del distrito. Por lo tanto, la caldera no estará diseñada para suministrar vapor a alta presión, y no es necesario un conjunto de turbina/generador.

En los últimos decenios, varias instalaciones han sido equipadas con una recuperación adicional de energía mediante la condensación de los gases de combustión, mediante la cual se impulsa la producción de calor mediante la recuperación del calor de la condensación del vapor de agua en los gases de combustión.

En una larga serie de referencias aparecen más detalles sobre la producción de energía a partir de la incineración de desechos, por ejemplo, CEWEP (Reiman, 2012), Eurostat, Asociación Internacional de la Energía (AIE), (AIE, 2015) y OCDE (OCDE, 2013).

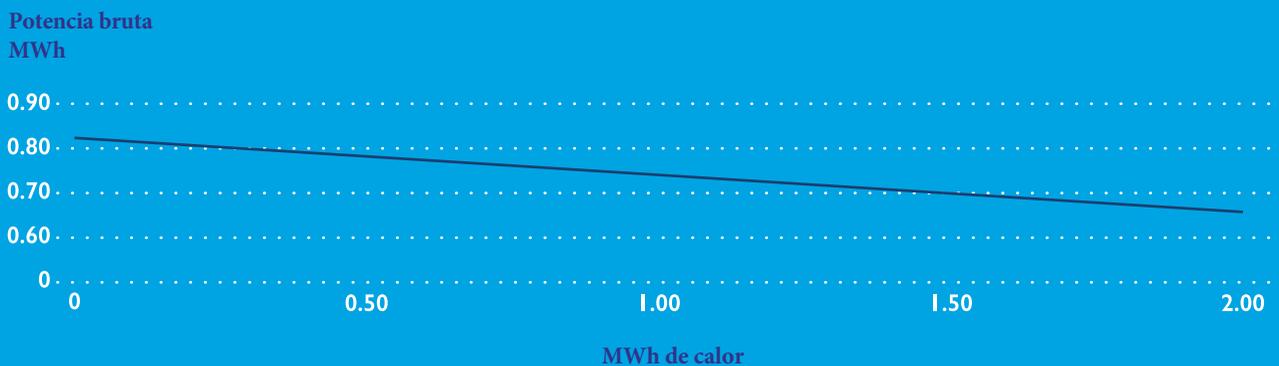
La producción neta típica de las nuevas instalaciones de WtE es de un 25-30% para las plantas que sólo producen electricidad (es decir, después de restar el consumo de parásitos).

El uso de la cogeneración aumentará significativamente la producción de energía, en un 85% o más, y el uso de la condensación de gases de combustión puede añadir más de un 10% a la eficiencia total. Al extraer el calor la eficiencia eléctrica disminuirá ligeramente como se ilustra en la figura 7. La disminución es típicamente de 0,05-0,2 MW de electricidad por 1 MW de calor, dependiendo de la configuración de la turbina/condensador y las temperaturas de calentamiento del distrito, entre otras cosas.

En el apéndice figuran más detalles sobre la eficiencia.

Cuando se construye una nueva instalación de WtE, su tecnología y optimización energética es el resultado de la optimización financiera, que se basa en una serie de criterios, que son diferentes de los sistemas de energía convencionales, porque otras propiedades también son importantes, entre ellas la capacidad de tratar los desechos en casi todo momento gracias a la alta disponibilidad de la planta.

Fig. 7 | Ejemplo de relación entre la producción de calor y energía a partir de una tonelada de residuos en una planta de cogeneración optimizada



Por ejemplo, una producción de calor de 2 MWh reduce la producción de electricidad con alrededor de 0,15 MWh

Recuperación de material de las instalaciones de WtE

Los RSU y otros tipos de residuos similares contienen metales que pueden recuperarse de las cenizas de fondo. Una gran parte del contenido metálico de los desechos está contenida en productos compuestos en los que los metales constituyen una fracción relativamente pequeña. Esos metales no serían en gran medida recuperables a menos que el componente de desecho se exponga a un proceso que elimine la materia que rodea al metal. Un proceso de incineración se adapta bien al propósito y, por lo tanto, proporciona acceso a un recurso que de otro modo sería difícil de recuperar.

La recuperación del metal de las cenizas de fondo se realiza mediante el uso de tamices, imanes, separadores de corrientes de Foucault, separadores de rayos X, clasificación por inducción y otros separadores. El desarrollo es rápido en estos años.

El metal recuperado se vende para la producción de nuevos productos metálicos y así reemplaza a los recursos vírgenes, cerrando el ciclo en la economía circular.

La recuperación de metal de las cenizas de fondo variará en función del carácter de los desechos incinerados, en particular las tareas de segregación en la fuente. La recupe-

ración típica del metal ferroso es de alrededor del 7% y la no ferrosa de alrededor del 2% de la ceniza de fondo, /Allegrini/, donde la parte no ferrosa tiene el mayor valor.

La recuperación de metal de las cenizas de fondo puede superar el 90% de su contenido de metal si se utilizan las técnicas más modernas. Con aproximadamente 200 kg de ceniza de caldera por tonelada de desechos, y considerando el potencial de WtE de 430 Mtpy (véase la figura 3), se estima que el potencial total de recuperación de metales es de alrededor de 7 Mtpy de metal.

El valor de los recursos del metal recuperado no es fácil de cuantificar, pero el valor económico de los metales podría ser de unos 10 euros por tonelada de desechos de insumos, lo que ofrece cortos plazos de amortización para la inversión en sistemas de clasificación. Para el potencial de WtE de 430 Mtpy de residuos esto corresponde a un valor potencial de alrededor de 4 mil millones de euros por año.

La propia ceniza de fondo, que constituye alrededor del 20% de la masa de desechos de entrada, puede utilizarse para fines de construcción, en particular la construcción de carreteras o la recuperación de tierras. Las reglamentaciones de la OCDE no están alineadas, por lo que existen grandes variaciones entre los países. Algunos países alientan el uso para la construcción en virtud de reglamentos basados, por ejemplo, en las

propiedades de lixiviación de los metales pesados, y en otros países esas actividades están restringidas, por lo que las cenizas de fondo se depositan en vertederos.

Las cenizas volantes también pueden utilizarse para la recuperación de metales. En una planta de Suiza se extrae zinc metálico de alta pureza a una tasa de hasta 1 kg por tonelada de desechos incinerados. (Kebag, Emmenspitze KVA, 2015). Otras plantas lavan las cenizas volantes para recuperar los lodos que contienen zinc, que posteriormente se envían para su recuperación en instalaciones industriales de fundición.

En el caso de la condensación de los gases de combustión para la recuperación de calor, el contenido de agua de los gases de combustión se condensa, en principio como agua destilada. Tras una mayor purificación puede utilizarse con fines técnicos, sustituyendo así a otros recursos hídricos.

En la figura 8 se ilustra el proceso general de recuperación de una nueva instalación de WtE en Copenhague que está en construcción y se prevé que entre en funcionamiento a partir de 2016.

Como la WtE sustituye a los combustibles fósiles y se recuperan otros materiales, sirve para el mismo propósito de alto nivel que muchas actividades de reciclaje. Por lo tanto, debe considerarse como una parte integrada de la economía circular, como se ilustra en la figura 9.

Fig. 8 | Recuperación esperada de material y energía en una nueva instalación de WtE de alta eficiencia

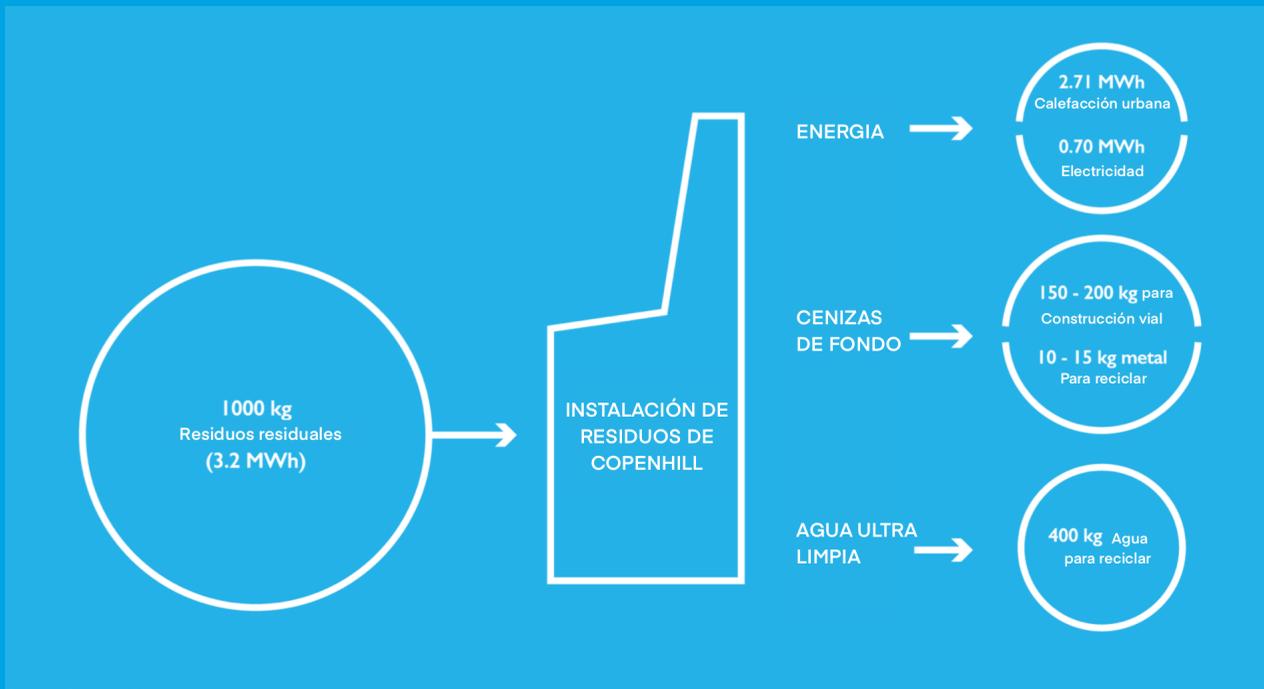
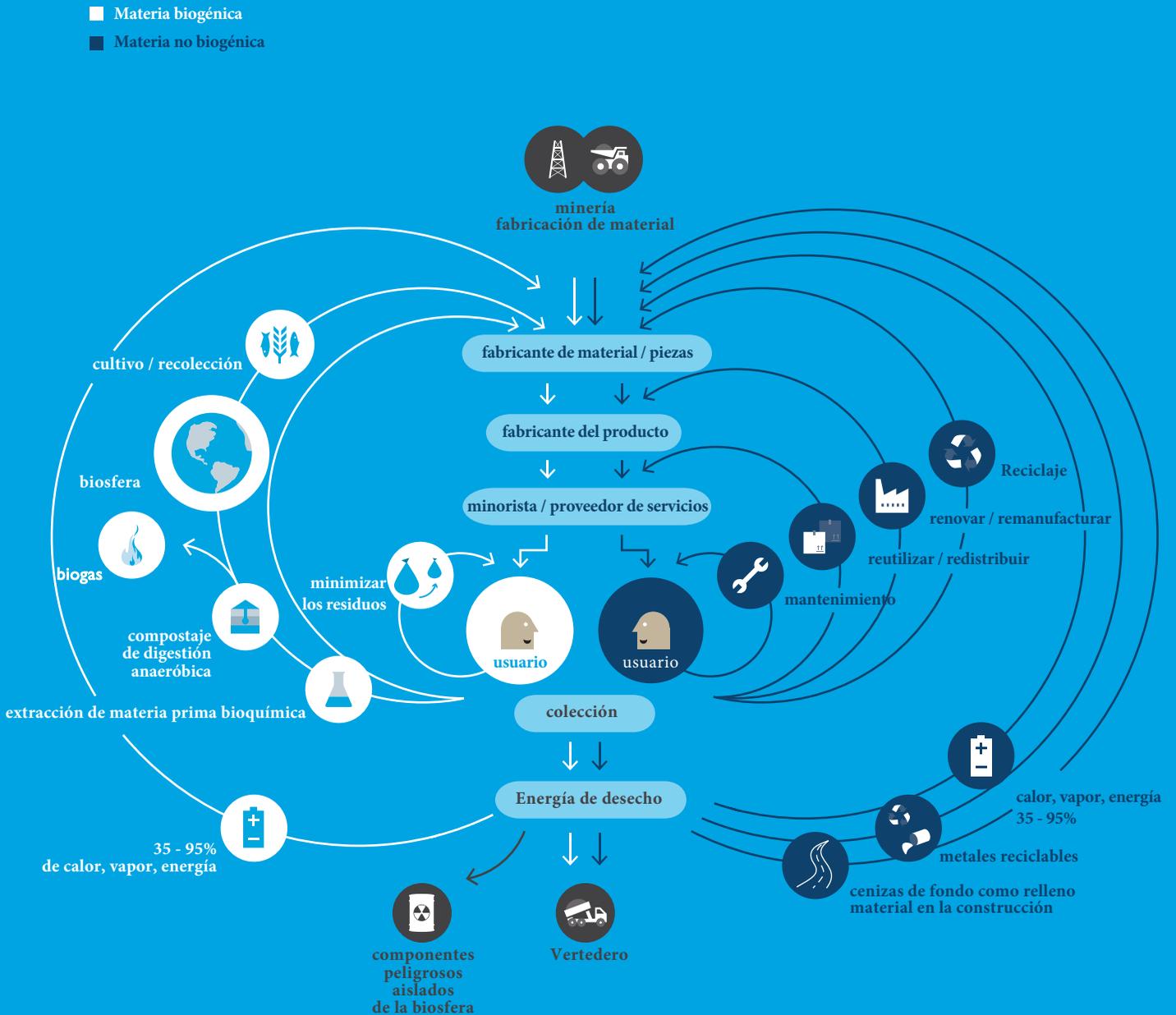


Fig. 9 Ilustración de la conversión de desechos en energía como parte de la economía circular



AD de los residuos orgánicos domésticos

La digestión anaeróbica puede aplicarse a una serie de materiales orgánicos biodegradables por microorganismos productores de metano. La mayoría de los tipos de materiales orgánicos serán parcialmente biodegradables, de modo que algunas materias se degradan y otras permanecen en el digestato (residuos/compuestos del proceso de digestión).

Los residuos domésticos orgánicos separados de la fuente contienen materias orgánicas altamente y menos degradables junto con algunas materias extrañas. La etapa de pre-tratamiento eliminará las materias extrañas y otros componentes que puedan afectar al proceso de digestión causando sedimentación, flotación, bloqueos, aumento del desgaste, etc. Incluyen materiales como bolsas de plástico de la recogida de residuos, embalajes, huesos, arena, piezas de metal, etc. Este llamado "rechazo" se retira y se envía a una instalación de la WtE. Según los sistemas de recolección y pre-tratamiento, la proporción de desechos puede ser importante, es decir, entre el 25% y el 40%, pero en la segregación en la fuente de las casas unifamiliares la proporción de desechos puede reducirse a un pequeño porcentaje (Christensen, 2003).

La biomasa se transfiere al reactor, que se calienta a una temperatura entre 32 y 55°C. El tiempo de residencia sería típicamente de alrededor de 20 días y el biogás es generado por microorganismos en el reactivo. El digestato es removido y a menudo post-compuesto para mitigar el olor. La deshidratación después de la digestión es deseable para las plantas energéticamente eficientes porque el porcentaje de sólidos secos se reduce cuando una gran parte del contenido de sólidos secos se transforma en biogás.

El biogás contiene típicamente alrededor de 55-60%(v/v) de metano, 30% de dióxido de carbono y algo de nitrógeno, por lo que la generación se expresa mejor mediante la

producción de metano, siendo el componente portador de energía.

La producción de metano a partir de los desechos domésticos orgánicos suele estimarse en unos 70-90 m³/tonelada, por ejemplo, 90 m³/tonelada, como se encontró en la escala piloto de (Christensen, 2003). En plantas bien optimizadas, el rendimiento de metano representa aproximadamente el 50% del contenido energético de la materia seca en la biomasa de entrada, dependiendo de la degradabilidad de los constituyentes, el tiempo de residencia y otros parámetros de diseño y funcionamiento.

El bajo contenido de metano del biogás es una limitación para su uso como alternativa al gas natural en ciertas aplicaciones, en las que necesitaría ser mejorado a metano casi puro para ser un sustituto del gas natural. Cuando se mejora, podría, por ejemplo, utilizarse en un proceso industrial local, transferirse a una red local de gas natural o transportarse en contenedores de alta presión a centros de distribución para su uso en el llenado de vehículos, con lo que sustituiría a los combustibles de transporte.

También podría utilizarse en el lugar para la producción de electricidad en un motor de gas o para la producción de calor y energía, en cuyo caso es necesaria la purificación pero no la mejora. Podrían utilizarse otros sistemas de recuperación de energía que producen electricidad y calor, como la turbina de gas, los sistemas de ciclo combinado o una caldera de vapor con una turbina de vapor.

En caso de que el biogás producido se distribuya para uso externo, la mejora del biogás y la presurización del metano conllevan una pérdida de metano y un consumo de electricidad, que asciende a alrededor del 10% del contenido energético del metano generado.



Los resultados energéticos netos de la Tabla 2 de las instalaciones de sólo electricidad son de magnitud similar o inferior a los de los sistemas convencionales de conversión de desechos en energía basados en la combustión de los RSU o de los típicos desechos domésticos orgánicos, y para los sistemas de cogeneración la producción de las plantas de biogás es aproximadamente la mitad de la producción de WtE. La razón principal es que el proceso de digestión deja un digestato que contiene carbono, lo que representa una pérdida de energía. Sin embargo, AD puede llegar a ser energéticamente atractiva para las plantas que sólo producen electricidad con un contenido muy bajo de sólidos secos (por debajo del 20-25%), ya que la eficiencia de los sistemas convencionales de WtE (sin condensación de gases de combustión) hace que los residuos sean más húmedos.

Otras actividades en la cadena desde la recolección hasta la generación de electricidad afectarán la eficiencia total de los sistemas de AD. Esto incluye el impacto energético de la separación de las fuentes, incluido el embalaje en la cocina, y las actividades relacionadas con la recogida selectiva de residuos orgánicos que no se consideran en este informe.

La recuperación de recursos en la EA, aparte de la energía, se refiere principalmente al contenido de carbono fibroso y nutrientes en el digestato, en particular el nitrógeno,

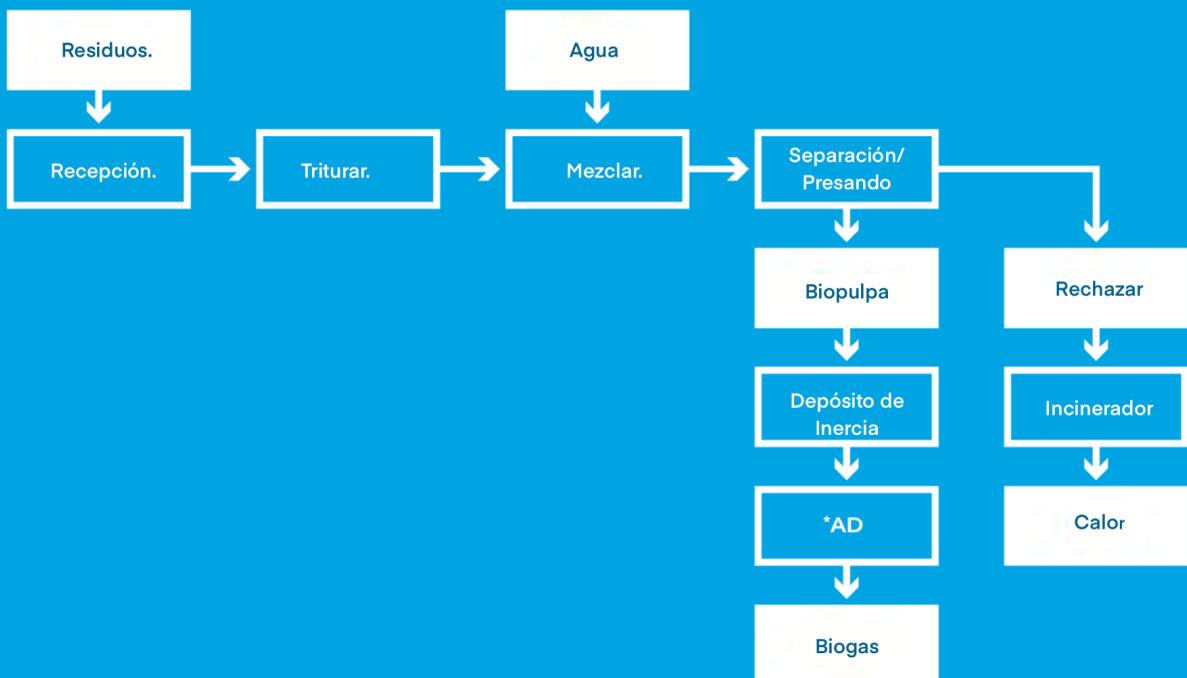
el fósforo y el potasio, que son útiles para el mejoramiento del suelo y los fertilizantes. El contenido de nitrógeno de la materia prima asciende a unos 8 kg por tonelada (con un contenido de sólidos secos de alrededor del 30%), siendo valioso porque la producción de fertilizante de nitrógeno requiere energía. La necesidad energética para la producción de la misma cantidad de fertilizante de nitrógeno corresponde al 4% del contenido energético de los desechos orgánicos, que se suma al balance energético de la Tabla 2. El fósforo se considera un recurso crítico y, por lo tanto, de particular interés para la recuperación. El contenido de fósforo en los desechos domésticos orgánicos suele ser de alrededor de 1,2 kg por tonelada, (Christensen, 2003).

Si los desechos domésticos orgánicos se recogen a razón de 40 kg per cápita por año (véase la sección 3.2), el fósforo de los desechos asciende a unos 50 g por persona y año, que se ponen a disposición para ser utilizados en las tierras de cultivo en sustitución de los fertilizantes. Con alrededor de 1.250 millones de habitantes en los países de la OCDE, constituye alrededor de 60.000 tpy de fósforo. Su valor como recurso no es fácil de cuantificar, pero la referencia al valor económico podría dar una indicación. El valor económico se sitúa en torno a 0,1 euros per cápita al año con el precio actual del fósforo o alrededor de 100 millones de euros al año para la OCDE. Su importancia debe

considerarse desde una perspectiva geopolítica y a largo plazo, ya que el acceso a los recursos de fósforo puede verse dificultado por el hecho de que la explotación minera del fósforo esté confinada en zonas geográficas limitadas, lo que a su vez tiene posibles consecuencias para la fijación de los precios del fósforo.

Hay más información sobre los nutrientes y el carbono en el informe sobre el Carbono, los Nutrientes y el Suelo.

Fig. 10 | Principales procesos en una instalación típica de digestión de desechos domésticos orgánicos



*digestión anaerobica

Tab. 2 | **Eficiencia energética de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos domésticos, 3 casos**

PARÁMETRO	SALIDA DE METANO	PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD, SÓLO	PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD Y CALOR
Producción de metano	50%	50%	50%
Mejora y presurización	-5%	0%	0%
Consumo de electricidad (parásito)	-2%	-2%	-2%
Consumo de calor para Calentar el reactor	-2%	0%	-2%
Producción de electricidad del motor de gas, producción bruta		20%	20%
Producción de calor		0%	25%
Energía neta total (sin tener en cuenta la forma de energía)	41%	18%	41%

Salida típica de un sistema de energía optimizada en % del contenido de energía en los residuos de entrada representado por el valor calorífico neto de la materia seca

Extracción y uso de gas de vertedero

El gas de los vertederos es generado por microorganismos como ocurre en las plantas de AD. La generación de gas comienza poco después de que los desechos son depositados en un vertedero y se previene la entrada de oxígeno mediante la superposición de los desechos, lo que promueve el desarrollo de microorganismos anaeróbicos. Al igual que el biogás de las plantas de AD, el componente de transporte de energía del LFG es el metano, que se produce típicamente alrededor del 50%, pero la composición del gas de la celda individual del vertedero varía con el tiempo, (Christensen, 2011).

El gas restante es principalmente dióxido de carbono y algo de nitrógeno, pero el gas también puede incluir pequeñas cantidades de hidrógeno y sustancias peligrosas como sulfuro de hidrógeno, cloruro de vinilo, etilbenceno, tolueno y benceno, (Christensen, 2011), (USEPA, 2003).

Los vertederos deben ser diseñados y operados particularmente para la recuperación de gas, de lo contrario el gas generado se difundirá a la atmósfera a través de los residuos depositados o a través del suelo circundante,

si el vertedero no está equipado con un revestimiento inferior hermético al gas. Por lo tanto, la eficiencia de la recolección de gas suele ser baja para los vertederos no sanitarios comunes en los países en desarrollo.

La extracción de gas se hace a través de un gran número de pozos con tuberías de recolección de gas en todo el vertedero. También se pueden utilizar sistemas de recolección horizontal en las primeras etapas durante el llenado. El vertedero se cierra con una cubierta que tendrá una baja permeabilidad hacia el escape de LFG, pero que aún permite la infiltración de la humedad, que es necesaria para la generación de gas (Willumsen, 2011). Para obtener un rendimiento óptimo de gas, asegurar la descomposición de los desechos y limitar las emisiones de metano, el vertedero debe ser diseñado, inspeccionado y operado como un sistema de proceso, y de hecho existen diseños particulares de vertederos de reactores, por ejemplo, como se describe en (Christensen, 2011).

La extracción de gas puede ser asistida por una succión que proporcione una presión negativa en los tubos de recolección de gas de manera equilibrada para evitar que la presión negativa provoque la entrada de aire.

Las tasas de generación de gas dependen del

contenido y la naturaleza de los materiales biogénicos depositados en los vertederos, la temperatura y el contenido de humedad, entre otras cosas. Por lo tanto, la modelización de las tasas de generación a partir de los RSU mixtos sólo puede hacerse con gran incertidumbre, y a su vez esto también se aplica a la eficiencia de la recogida de gas, porque la línea de base es desconocida. Algunas fracciones de desechos, como los residuos de alimentos, tienen altas tasas de descomposición, mientras que otras, como la madera, tienen una baja tasa de descomposición. Los residuos de alimentos también tienen un alto potencial de producción de gas, una de las razones por las que la liberación de gas suele alcanzar su punto máximo en las primeras etapas de la vida de un vertedero.

La recolección de los LFG generados depende de la permeabilidad de la cubierta y del fondo y del sistema de extracción de gas. Dado que no se puede disponer de un sistema eficiente de cobertura y extracción durante el llenado, la eficiencia de la recolección suele ser baja en las etapas iniciales de un vertedero, en las que la tasa de generación de gas suele ser alta (Steger, 2013).

También después de varias décadas es un desafío recolectar y utilizar el gas debido a que tanto la tasa de producción como el porcentaje de metano caen.

Formas alternativas de energía y desarrollo

Existen formas alternativas de energía y combustibles a partir de desechos, como por ejemplo el gas de gasificación/pirolisis (monóxido de carbono e hidrógeno, en particular), el hidrógeno de procesos biológicos o de electrólisis, el etanol de desechos biogénicos y el aceite de plástico.

Los procesos biológicos están en desarrollo y pocos se utilizan con los desechos domésticos como fuente de energía de base. Se asemejarán en gran medida a la AD en términos de eficiencia energética, por lo que se hace referencia a la Tabla 2. Sin embargo, los productos líquidos, como el etanol, tendrán un mayor potencial para su uso como combustible de transporte porque su almacenamiento y transporte son menos exigentes que el de la gasolina.

La electrólisis tiene como punto de partida el inconveniente de transformar la electricidad de alto valor en combustibles de menor valor, véase la figura 11. Sin embargo, la electrólisis puede ser pertinente cuando se dispone de cantidades abundantes de electricidad de bajo valor, por ejemplo, de la energía hidroeléctrica en zonas remotas de las que no es viable el cableado de alto voltaje a un número suficiente de consumidores, y en los picos en los que se instala un exceso de capacidad de turbinas eólicas.

En la actualidad sólo se utiliza la gasificación a una escala significativa, por lo que el enfoque principal es la gasificación térmica. La gasificación es un proceso por el cual se produce un gas de síntesis calentando un combustible y haciéndolo reaccionar con aire o vapor. El gas de síntesis generado consiste principalmente en monóxido de carbono e hidrógeno, pero el proceso también genera alquitrán y gases no deseados como el ácido clorhídrico y el sulfuro de hidrógeno, por lo que es necesario el tratamiento del gas.

A menudo se habla de la gasificación térmica para la recuperación de energía de los desechos porque el gas podría, en principio, distribuirse, almacenarse y utilizarse en plantas de alta eficiencia. Si bien la gasificación térmica ha funcionado durante muchos años con combustibles homogéneos como el carbón o las virutas de madera, la gasificación de un material heterogéneo como los desechos sólidos urbanos ha resultado difícil, en particular debido a su naturaleza heterogénea en lo que respecta al aspecto físico y la composición química.

Alrededor del 10% de la generación total de residuos en Japón, o 3,6 Mtpy, se trata mediante gasificación térmica, pirólisis o gasificación por plasma. Alrededor de 110 plantas con una capacidad media de alrededor de 100 tpd están en funcionamiento



Imagen por Valorsul

utilizando la gasificación u otras tecnologías de conversión térmica. La eficiencia energética suele ser modesta (varias por debajo del 5%) debido al elevado consumo propio para el pre-tratamiento y el calentamiento del reactor y a las pérdidas relativamente grandes, por ejemplo, para el enfriamiento del gas de gasificación crudo. La materia prima es en algunos casos CDR de residuos separados de la fuente, por ejemplo, residuos plásticos e industriales que en otros países se reciclarían. Esto hace que la experiencia japonesa sea difícil de transferir a países con otra estructura de gestión de desechos y un alto valor de energía generada.

En Europa se han construido algunas instalaciones de gasificación de RSU, pero todas parecen haber sido cerradas. Además de las dificultades técnicas, una de las razones es la eficiencia energética que ha demostrado ser baja o muy baja en comparación con los sistemas convencionales de WtE, principalmente debido al alto consumo para el pre-tratamiento de los desechos, el consumo de energía para calentar los desechos, la pérdida por enfriamiento del gas de síntesis y la energía para la producción de oxígeno, si es necesario. La eficiencia potencialmente alta del uso del gas no ha demostrado superar suficientemente los consumos parasitarios del proceso de gasificación. Un examen de la tecnología reveló que la producción neta de electricidad para las plantas que funcionan sólo con electricidad se encuentra en el rango del 13 al 24%, que para los porcentajes más altos no incluye el pre-tratamiento de los desechos (Fichtner, 2004). Los informes resumían que "En términos de eficiencia energética de las plantas independientes cuando se optimizan para la generación de energía, las tecnologías de gasificación y pirólisis existentes son menos eficientes que la tecnología de combustión moderna".

ISWA ha publicado un informe que describe las tecnologías alternativas de conversión térmica, (ISWA, 2013a). Aunque las techno-

logías térmicas alternativas ofrecen una perspectiva interesante, el informe concluye que la cantidad de información objetiva fácilmente disponible sobre el rendimiento de las tecnologías térmicas alternativas de tratamiento de desechos es limitada, y se constata que el gas de síntesis generado en la mayoría de los casos se trata aguas abajo por combustión y, por lo tanto, la tecnología es más bien de combustión por etapas que de gasificación. El informe de ISWA está en línea con las conclusiones del informe de SWANA (la Asociación de Residuos Sólidos de América del Norte) sobre la gasificación, (SWANA, 2011):

- la gasificación no está probada a escala comercial para el MSW;
- La gasificación de los desechos sólidos urbanos para producir electricidad es tecnológicamente viable, sin embargo, la gasificación de los desechos sólidos urbanos no es una tecnología madura y, por lo tanto, sería necesario elaborar algunas estrategias de mitigación de riesgos para limitarlos; y
- La ampliación de los procesos y equipos es necesaria para demostrar la fiabilidad de los sistemas y definir la economía. Las aplicaciones comerciales en MSW serán muy desafiantes e implican altos costos.

Las tecnologías alternativas de tratamiento térmico deben considerarse principalmente para determinadas corrientes de desechos y sobre todo si se puede utilizar el gas de síntesis para mejorarlo y convertirlo en hidrógeno para su utilización en procesos industriales o en etanol o combustibles similares. Sin embargo, no se encuentran informes de plantas que mejoren el gas de síntesis a partir de residuos a escala comercial.

En conclusión, los métodos de recuperación alternativos para la producción de energía y combustibles no se utilizan actualmente en grado apreciable y, por las razones expuestas, no se prevé que desempeñen una función significativa para el tratamiento de los desechos sólidos urbanos durante el período investigado.

Rendimiento de la energía y los combustibles

La energía es una piedra angular de la sociedad moderna y se utiliza para muchos fines como la calefacción, la refrigeración, el transporte, los procesos industriales, la iluminación, el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos, etc.

Las necesidades energéticas de la sociedad están cubiertas por una gama de diferentes fuentes, por ejemplo, gas natural, gasolina/diesel, viento, sol, procesos nucleares, energía hidráulica, carbón, madera y residuos. Las formas de energía no son particularmente comparables en términos de calidad, pero todas pueden caracterizarse por el contenido de energía en kWh, GJ, Btu o similares. Algunas formas de energía pueden convertirse en otras con una cierta eficiencia y pérdida. Por ejemplo, el carbón se utiliza para generar electricidad con una eficiencia del 30-50%.

Por consiguiente, es importante comprender las principales diferencias de calidad y valor, como se ilustra a continuación.

La electricidad es la forma de energía de mayor rango porque puede ser utilizada para realizar trabajos mecánicos a través de un motor eléctrico prácticamente sin pérdidas. La electricidad es la única forma de energía que es multiuso y se utiliza para muchas aplicaciones, por ejemplo, la electrónica y los electrodomésticos.

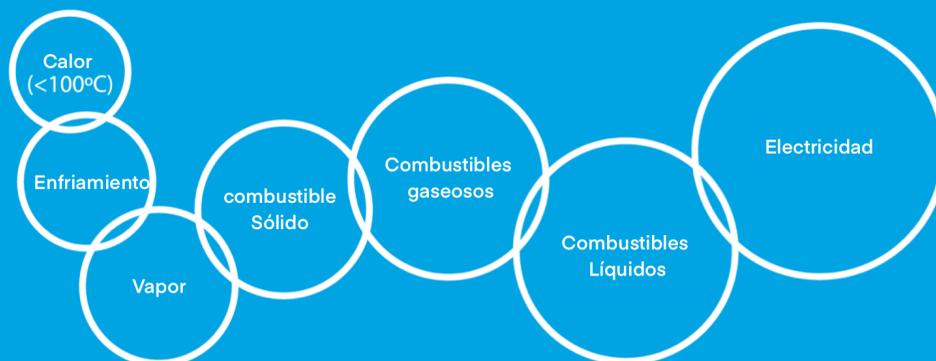
La electricidad tiene la ventaja de ser fácil de transportar a largas distancias en cables de alta tensión, pero tiene la desventaja de ser difícil de almacenar.

El calor es la forma de energía de menor rango porque posee poco potencial para generar trabajo, y la calefacción de los edificios es el uso predominante. El calor en forma de agua caliente tiene la ventaja de ser fácil de almacenar. La desventaja es que la venta de calor requiere una demanda de calor, regida principalmente por las condiciones climáticas locales, y una red de calefacción de distrito para llegar a los consumidores. El enfriamiento equivale a que el calor tiene poca capacidad de transformarse en otras formas de energía, pero su generación viene con un consumo ligeramente mayor de energía primaria, y por lo tanto se valora más.

El metano, siendo el componente portador de energía del biogás, es una forma intermedia de energía. El gas natural contiene alrededor de 90% de metano y biogás, típicamente en el rango de 50-60%. El metano no se utiliza para generar trabajo mecánico directamente, sino que tiene que ser quemado en, por ejemplo, una turbina de gas, un motor o una caldera para generar trabajo o electricidad. La conversión a la electricidad tiene típicamente una eficiencia de alrededor del 35-40% cuando se usa localmente, y podría ser mayor si se usa

en sistemas de ciclo combinado de gran escala. El metano también puede utilizarse como materia prima en la industria de procesos, por ejemplo, para generar combustibles líquidos. El metano tiene la ventaja de ser relativamente fácil de transportar en tuberías y de almacenar en cavernas subterráneas cerradas hechas para este propósito, pero es necesaria una red de gas para llegar a la mayoría de los clientes. La infraestructura de gas también podría incluir buques cisterna, camiones y una gasolinera local para el uso de vehículos. En cualquier caso, la mejora y la presurización (o licuefacción) de la calidad del gas natural requiere energía, lo que representa un consumo parasitario. Las salidas de energía de los diferentes usos se enumeran en la Tabla 2.

Fig. 11 | Valoración de la energía y los combustibles



Valor indicativo de su capacidad para generar trabajo (o alta temperatura), facilidad de transporte y uso en sistemas de energía.

Electricidad y calor

Existen formas alternativas de energía y combustibles a partir de desechos, como por ejemplo el gas de gasificación/pirolisis (monóxido de carbono e hidrógeno, en particular), el hidrógeno de procesos biológicos o de electrólisis, el etanol de desechos biogénicos y el aceite de plástico.

Los procesos biológicos están en desarrollo y pocos se utilizan con los desechos domésticos como fuente de energía de base. Se asemejarán en gran medida a la AD en términos de eficiencia energética, por lo que se hace referencia a la Tabla 2. Sin embargo, los productos líquidos, como el etanol, tendrán un mayor potencial para su uso como combustible de transporte porque su almacenamiento y transporte son menos exigentes que el de la gasolina.

La electrólisis tiene como punto de partida el inconveniente de transformar la electricidad de alto valor en combustibles de menor valor, véase la figura 11. Sin embargo, la electrólisis puede ser pertinente cuando se dispone de cantidades abundantes de electricidad de bajo valor, por ejemplo, de la energía hidroeléctrica.

La proporción de residuos es del 1,2% del total de la producción de energía de electricidad y calor, como se ilustra en la figura 12, generada en más de 1000 instalaciones de WtE. La participación de la WtE en la producción de electricidad es del 0,7%, y su participación en la producción de calor es de alrededor del 8%. Las cifras se enumeran en la Tabla 3.

Aunque la contribución de los desechos al suministro de energía se da en pequeños porcentajes, la producción de energía sigue siendo importante y su parte es comparable en magnitud a la energía solar fotovoltaica (a partir de células solares fotovoltaicas) y a más de un tercio de la generación a partir de biocombustibles convencionales. El aporte energético total de los desechos corresponde, por ejemplo, a unos 130 millones de toneladas de astillas de madera, lo que equivale al crecimiento anual de un bosque del tamaño de Gran Bretaña.

Parece que más del 60% de la electricidad se produce a partir de combustibles fósiles, es decir, carbón, petróleo y gas. Los combustibles fósiles son actualmente tan dominantes que es poco probable que se eliminen progresivamente en el período de tiempo considerado de unos 30 años. Por lo tanto, para reducir al mínimo el uso de combustibles fósiles es necesario optimizar ampliamente todas las demás fuentes de producción, incluidos los desechos. La contribución de la energía de desechos es importante porque la fuente de energía alternativa a los desechos sería en la mayoría de los casos fósil.

Las cifras de la OCDE indican una eficiencia de generación de electricidad del 16% en promedio para los RSU y los desechos industriales, y la venta de calor es de magnitud similar, calculada a partir de los datos de la Tabla 3. Como se desprende del Apéndice, las

nuevas instalaciones se construyen con mayor eficiencia, proporcionando más electricidad (y calor) que hasta ahora a partir de un recurso similar. Gradualmente la eficiencia eléctrica promedio aumentará en el tiempo considerado de unos 30 años del 16% al 25-30%.

Mediante el aumento de la eficiencia y el uso de todo el potencial de WtE, la contribución de los residuos aumentará del 0,7% a alrededor del 3% de la producción actual de electricidad.

Así pues, el potencial de generación de electricidad sería de unos 300 TWh anuales, si se utiliza todo el potencial de desechos de 430 Mtpy en las modernas instalaciones de WtE con una mayor eficiencia, figura 3.

La utilización de desechos para la producción de calor ya constituye una parte importante del 8% en la OCDE, aunque sólo una pequeña parte del potencial de calor de los WtE se utiliza actualmente para la venta de calor, véase la Tabla 3.

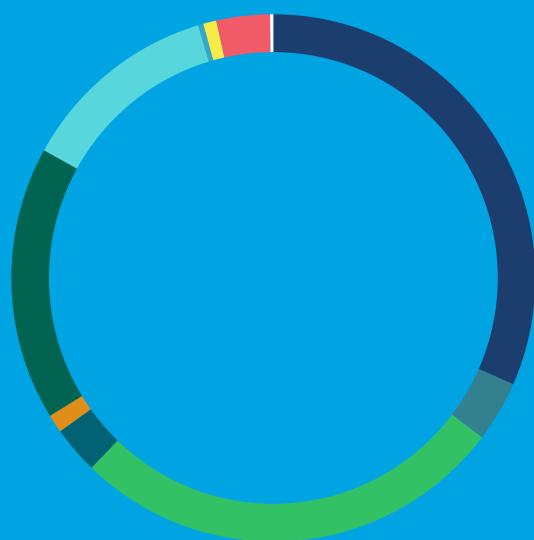
La energía potencial recuperada por la WtE depende del valor calórico de los desechos, como se ilustra en la figura 13.

Tab. 3 | Producción de energía a partir de desechos en la OCDE, base anual, 2012

ENERGÍA	MSW TWh	Residuos Industriales	Suma TWh	Participación de la Producción total %
Electricidad	61.4	13.4	74.8	0.7
Calor	60.2	10.2	70.4	8.1
Aporte de energía por residuos	319	148	467	-

1 TWh = 1000 GWh = 3600 TJ

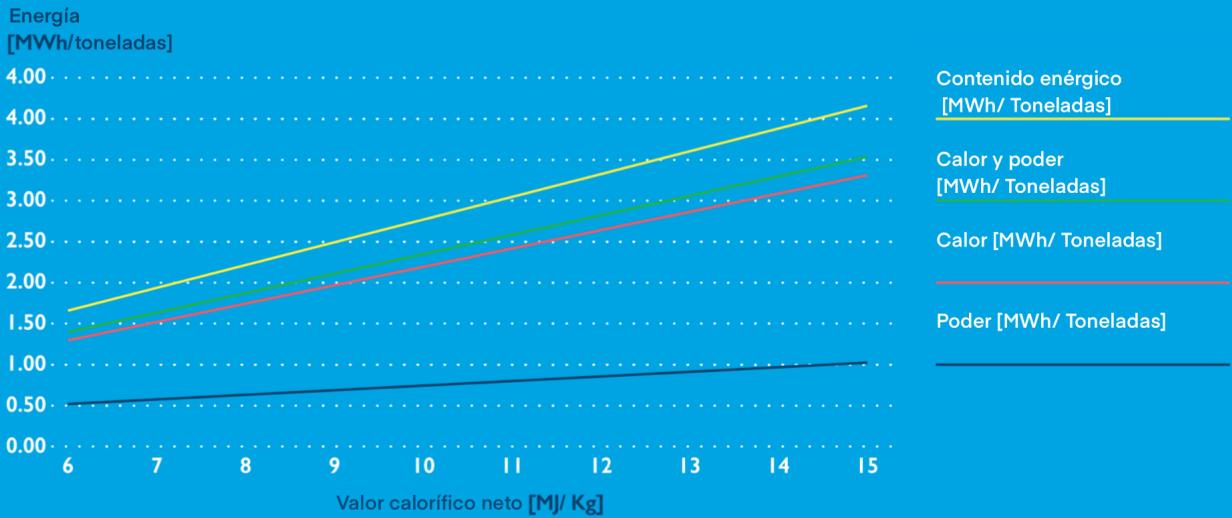
Fig. 12 | Producción de energía



Suma de energía y calor en la OCDE 2012

- Carbón 31,6%
- Petróleo 3,8%
- Gas 26,7%
- Biocombustibles 3,0%
- Residuos 1,2%
- Nuclear 16,7%
- Hidroeléctrica 12,4%
- Geotérmica 0,4%
- Energía solar fotovoltaica 0,7%
- Eólica 3,2%
- Otras fuentes 0,2%
- Solar térmica 0,0%
- Mareas 0,0%

Fig. 13 | El contenido y la producción de energía dependen del valor calórico



Fuente: ISWA, 2013

Fig. 14 | Salida típica de energía de la instalación de cogeneración con entrada de RSU a 10 MJ/kg (2,8 MWh/tonelada) de valor calórico neto



Salida típica de energía de la instalación de cogeneración con entrada de MSW a 10 MJ/kg (2,8 MWh/tonelada) de valor calórico neto. La generación de calor de la condensación de los gases de combustión no está incluida. El vapor puede transformarse en calor con una pérdida insignificante. Sin salida de vapor, la producción de electricidad aumentaría

Gas natural y biogás

Para un DSM con un valor calorífico neto típico de alrededor de 10 MJ/kg la generación de electricidad a partir de 1 tonelada de residuos es de alrededor de 0,7 MWh y una producción potencial de calor de alrededor de 2 MWh y hasta 2,5 MWh si se instala la condensación de gas de combustión.

La venta de calor requiere la presencia de un mercado local de calor, que se rige por las condiciones climáticas locales y la existencia de una red de calefacción de distrito. Cuando hay una demanda de calor, el uso de la cogeneración puede aumentar la producción en un factor 4, o incluso en un factor 5 mediante el uso de la condensación de gases de combustión (véase el apéndice) en comparación con la energía, solamente. Hay que tener en cuenta que el uso actual de la calefacción de distrito es pequeño y, por ejemplo, sólo constituye el 13% del mercado de suministro de calor a edificios y a la industria en la Unión Europea, UE27, (Connolly, 2013). En el mismo estudio se considera realista aumentar la proporción de calefacción urbana al 50% para 2050, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles y la contribución del dióxido de carbono del suministro de calor de los edificios y la industria, ya que los combustibles fósiles son actualmente las fuentes de energía predominantes para la calefacción.

El calor de los WtE puede contribuir de manera significativa al aumento de la venta de calefacción urbana, si se utiliza el potencial de desechos de 430 Mtpy, véase la sección 3.1.

La venta de calor de WtE tiene el potencial de aumentar desde el nivel actual de 70 TWh (cf. Tabla 3) a 400 TWh por año, siempre que se aumente el uso de la calefacción de distrito de manera que se venda el 40% del potencial de calor, donde el aumento a su vez podría ahorrar el equivalente a unos 30.000 millones de m³ de gas natural.

Al igual que el calor, la venta de refrigeración requiere un mercado para la refrigeración y una red de refrigeración de distrito. Esas redes no están tan extendidas como la calefacción de distrito, pero el potencial sigue siendo grande. Las redes de calefacción de los distritos también pueden utilizarse como suministro de energía para generar refrigeración en las instalaciones de refrigeración locales.

El vapor de baja presión que queda en la turbina también puede utilizarse para fines industriales o para la desalinización en la que el agua de mar se convierte en agua dulce. Tal uso depende de las posibilidades locales.

El consumo total anual de gas natural en los países de la OCDE representa un contenido energético de alrededor de 16.000 TWh (OCDE, 2015).

Como se ha mencionado anteriormente, el biogás puede utilizarse localmente para la generación de electricidad, mejorarse a la calidad del gas natural como para su transferencia a las centrales eléctricas centrales a través de las redes de gas existentes o utilizarse como sustituto del combustible de transporte.

Si se supone que todo el potencial estimado de 50 Mtpy de desechos de alimentos por año (véase la sección 3.2) podría ponerse a disposición para la generación de metano a 80 m³ de metano por tonelada, representaría un contenido energético en metano de unos 40 TWh por año, lo que corresponde a casi 4.000 millones de m³ de gas natural por año (el metano tiene casi el mismo contenido energético que el gas natural por m³).

Por lo tanto, el potencial de los desechos biológicos domésticos se estima en un 0,3% del consumo actual de gas natural.

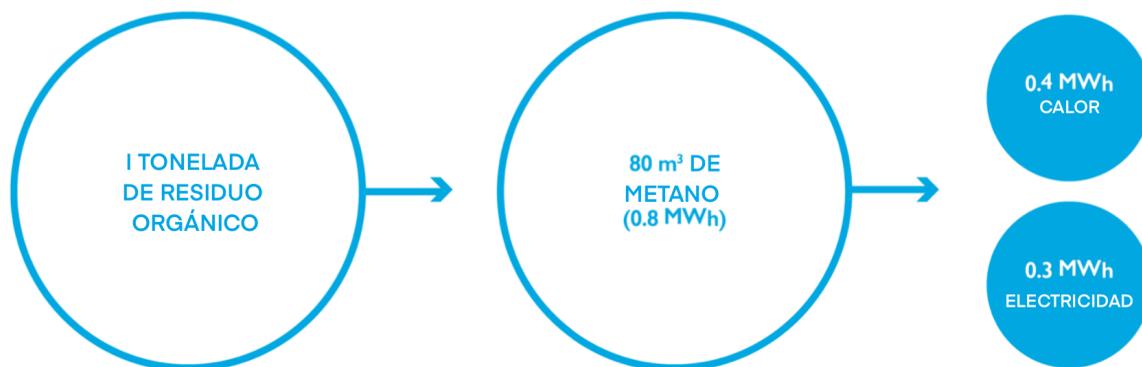
En conjunto, la producción de metano a partir de los desechos municipales podría encajar en el actual sistema de gas natural y contribuir así a ahorrar combustible fósil. Puede desempeñar un papel a nivel local, en particular con otras fuentes de biogás (como el estiércol y los lodos de depuración).

Tab. 4 | **Potencial de producción de metano a partir de residuos en la OCDE, 2012**

ENERGIA	ENERGIA METANO. TWh/Año	PORCENTAJE DE CONSUMO DE GAS NATURAL
Residuos de alimentos de los hogares	40	0.3%
Gas natural, total OVDE	16,000	100%



Fig. 15 | **Producción de energía típica de una instalación de biogás optimizada para residuos orgánicos domésticos**



Salida típica de energía de una instalación de biogás optimizada para residuos orgánicos domésticos con entrada a un 30% de contenido de sólidos secos que corresponde a un contenido energético de materia seca de 6 MJ/kg (1,7 MWh/tonelada) de bajo valor calorífico.

Gas de vertedero

No se ha encontrado ninguna recopilación de datos sobre la actual generación, recolección y uso de gas de vertedero (LFG) a nivel de la OCDE. El orden de magnitud podría estimarse de manera aproximada combinando las cantidades depositadas en los vertederos con la generación estimada de gas por tonelada y la eficiencia de la recolección de gas. Como se mencionó en la sección 4.4, existe una gran incertidumbre en la estimación de las tasas de generación de gas y la eficiencia de la recolección, entre otras cosas porque la generación de gas se produce a lo largo de muchos decenios. La generación media se supone a partir de una experiencia de generación de gas final a 60 m³ de metano por tonelada de DSM húmedo (potencial total acumulado a lo largo del tiempo (Barlaz, 2010) La experiencia de 60 m³ por tonelada parece desviarse de la cifra estándar utilizada de 100 m³ por tonelada (Willumsen, 2011). La diferencia puede ser causada por la descomposición incompleta de la materia biogénica, incluso durante mucho tiempo.

Para la evaluación aproximada se supone una eficiencia promedio de recolección de corriente de gas del 30% de los vertederos. Aunque muchos vertederos están equipados

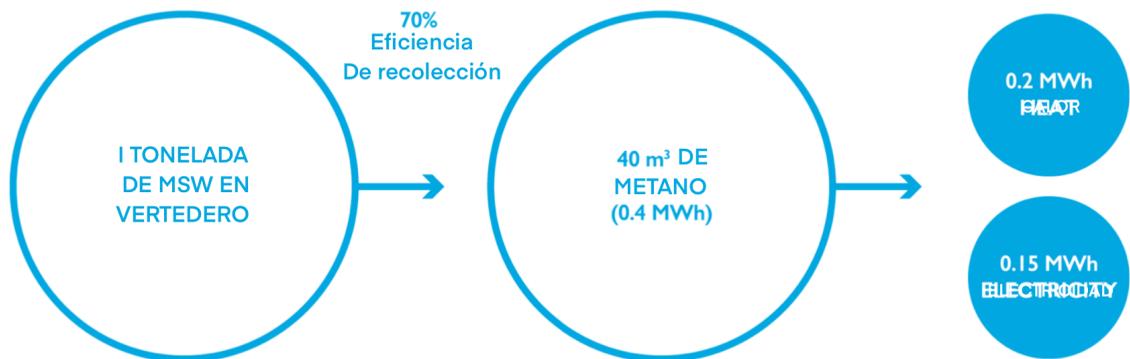
con una eficiente recolección de gas, la mayoría de los vertederos no tendrían ninguna o una ineficiente recolección de gas. Así pues, la recuperación total actual de LFG de 300 Mtpy de RSU en los vertederos de la OCDE se estima aproximadamente en unos $300 \times 60 \times 30\% \times 0,001 = 5.000$ millones de m³ de metano al año, lo que equivale a un contenido energético de 50 TWh al año. Utilizada en motores de sólo electricidad o similares, la producción bruta de electricidad sería de alrededor de 20 TWh por año. Esta estimación aproximada no incluye la contribución de los desechos industriales depositados en vertederos y de otros tipos de desechos distintos de los RSU. La generación de gas de estas fuentes dependerá de una evaluación del contenido biodegradable, de la que no se dispone de datos de fondo.

La mayoría de los LFG recuperados se utilizan para la producción de electricidad en motores de pistón, turbinas de gas o calderas con turbinas de vapor, según se desprende de la base de datos LMOP de los Estados Unidos que resume más de 600 proyectos de recuperación de LFG en ese país (US EPA, 2015). Ocasionalmente el LFG se utiliza para la combinación de calor y energía, sólo calor

o energía de proceso, y hay varios proyectos con la mejora de la calidad del gas natural (incluido el gas licuado) para el uso de vehículos u otros fines.

Se están realizando esfuerzos para aumentar la eficiencia de la recolección de LFG impulsados no sólo por el rendimiento energético sino también por las intenciones de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos y de metano, que es un poderoso gas de efecto invernadero. Hay pocas pruebas sobre las eficiencias de recolección que se pueden lograr. La modelización de un sistema optimizado de recuperación de gas encuentra que hasta alrededor de un 80% de recuperación sería realista (Stege, 2013), y se podrían diseñar y operar nuevos vertederos de gran escala para lograr tales eficiencias de recolección. En el plazo considerado de 30 años seguirá habiendo un gran número de vertederos existentes con una baja eficiencia de recogida, teniendo en cuenta que los vertederos generan gas durante muchas décadas. Por esta razón se supone una eficiencia media de recolección del 70% para las proyecciones de potenciales que se presentan a continuación y en la figura 16.

Fig. 16 | **Indicación aproximada de la producción de energía de un vertedero de residuos sólidos urbanos mezclados**



Indicación aproximada de la producción de energía de un vertedero de RSU mixto del que se utiliza el LFG en una planta de cogeneración.

Efectos climáticos de las formas de energía

Con una eficiencia de recolección del 70%, el potencial de LFG podría estimarse en 130 TWh por año suponiendo un vertido sin cambios de 300 Mtpy, y suponiendo que la composición de los desechos sólidos urbanos vertidos no cambie significativamente. Esto corresponde al equivalente a unos 12.000 millones de m³ de gas natural.

El rendimiento energético del gas disminuiría en el plazo considerado de 30 años a unos 20 m³ de metano por tonelada de DSM o a unos 20 TWh por año en caso de que se reduzca a la mitad el porcentaje medio de materia biogénica, se reduzca el vertido de DSM a 100 Mtpy y se aumente la eficiencia media de recogida de gas al 70%. Esto equivale a unos 2.000 millones de m³ de gas natural al año.

No se ha encontrado ninguna recopilación de datos sobre la actual generación, recolección y uso de gas de vertedero (LFG) a nivel de la OCDE. El orden de magnitud podría estimarse de manera aproximada combinando las cantidades depositadas en los vertederos con la generación estimada de gas por tonelada y la eficiencia de la recolección de gas. Como se mencionó en la sección 4.4, existe una gran incertidumbre en la estimación de las tasas de generación de gas y la eficiencia de la recolección, entre otras cosas porque la generación de gas se produce a lo largo de muchos decenios. La generación media se supone a partir de una experiencia de generación de gas final a 60 m³ de metano por tonelada de DSM húmedo (potencial total acumulado a lo largo del tiempo (Barlaz, 2010) La experiencia de 60 m³ por tonelada parece desviarse de la cifra estándar utilizada de 100 m³ por tonelada (Willumsen, 2011). La diferencia puede ser causada por la descomposición incompleta de la materia biogénica, incluso durante mucho tiempo.

Para la evaluación aproximada se supone una eficiencia promedio de recolección de corriente de gas del 30% de los vertederos. Aunque muchas energías terrestres y combustibles recuperados de los residuos sustituirán a otros recursos energéticos primarios, de los cuales una gran parte es fósil, y por lo tanto la energía de los residuos estará generalmente asociada a la reducción de las emisiones de CO₂.

La reducción del CO₂ dependerá del sistema energético local, al que se entrega la energía, es decir, qué recursos de energía primaria se reemplazan y qué proporción de combustibles fósil constituye la energía primaria reemplazada. Con el uso actual de más del 60% de combustibles fósiles en el sistema energético total de los países de la OCDE, la gran mayoría de la energía procedente de residuos sustituirá a los combustibles fósiles.

Esto puede explicarse porque la proporción de fósiles es tan alta que no es realista eliminar completamente los combustibles fósiles en el plazo considerado. La reducción proviene principalmente del aumento del uso de alternativas (hidroeléctrica, nuclear, biomasa, eólica, mareomotriz, solar), pero la expansión de éstas se ve limitada por razones técnicas, ambientales o económicas. Por lo tanto, es muy probable que cualquier aumento de la recuperación de energía a partir de los desechos contribuya de manera significativa a la sustitución de los combustibles fósiles.

Cualquier forma de energía, electricidad, calor, refrigeración o gas tendrá un potencial de reducción de CO₂, pero habrá diferencias entre las formas de energía. La producción de electricidad tendrá un alto potencial porque gran parte de la electricidad se genera a partir de combustibles fósiles, y por razones regidas por leyes físicas la electricidad se produce con una eficiencia limitada a partir de combustibles fósiles causando una emisión de CO₂ relativamente alta cuando se mide en kg por MWh de electricidad.

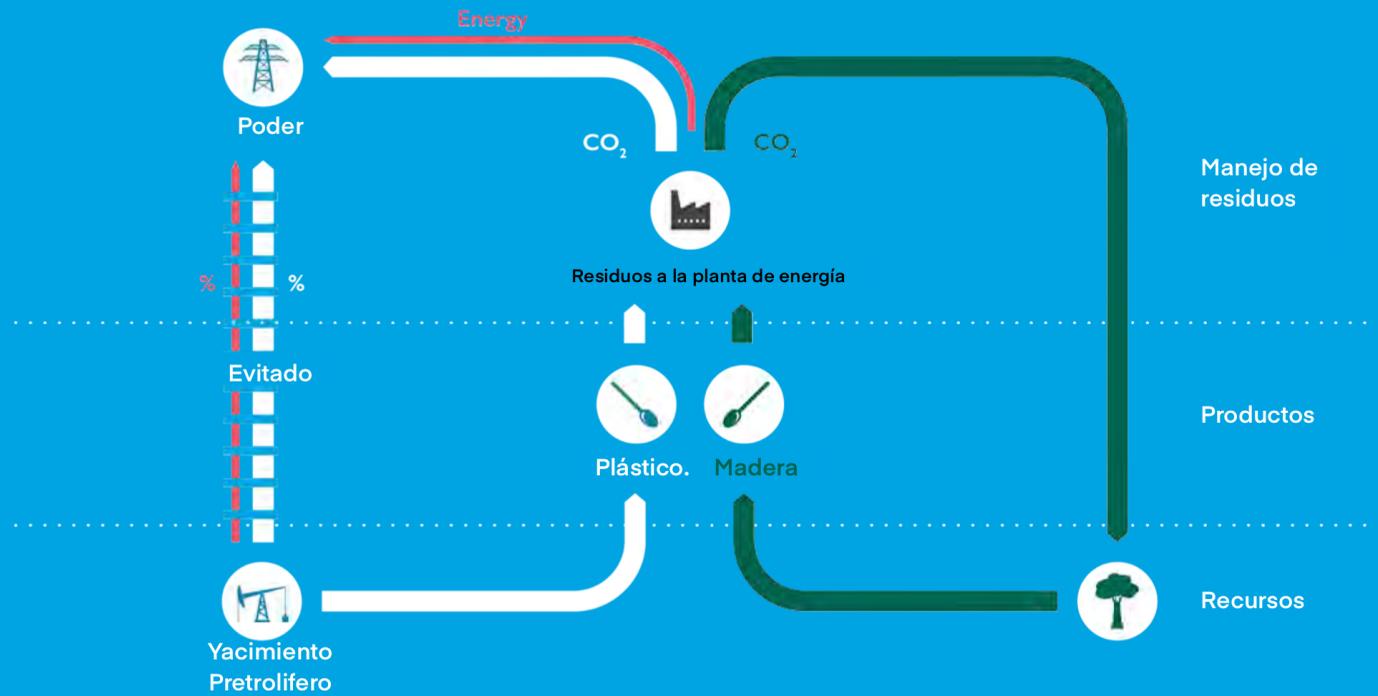
En lo que respecta específicamente a las WtE, al aumentar la implantación de instalaciones de WtE en los países de la OCDE de las 200 Mtpy actuales a las 430 Mtpy estimadas, el potencial de reducción de CO₂ es significativo.

Al plástico de los residuos para la producción de energía se le suele atribuir una cierta emisión de CO₂ en el sistema de contabilidad de CO₂ porque el plástico típicamente se origina a partir del petróleo y el gas natural y, por lo tanto, de origen fósil. Esto afecta el balance de CO₂ de la recuperación de energía, y la emisión de CO₂ debe ser distribuida entre una parte fósil, que se cuenta, y una parte biogénica, que no se cuenta como emisión.



Imagen de Kjeld Madsen -Dragor Luftfoto

Fig. 17 | **Sistemas circulares para materiales biogénicos y no biogénicos**



La cuchara representa un componente de la corriente de residuos y está hecha de madera o de plástico. En ambos casos, la energía eléctrica es la salida de la instalación de WtE, sustituyendo así la misma cantidad de energía producida por otras centrales eléctricas. A su vez, el petróleo u otros combustibles fósiles se ahorran porque la gran mayoría de la producción de energía marginal es de origen fósil. Si la cuchara está hecha de madera, la emisión de CO₂ se considera neutra ya que forma parte del círculo biogénico. En caso de que sea de plástico, el CO₂ emitido reemplaza al CO₂ emitido por la generación de energía usando combustibles fósiles.

Para ilustrar el orden de magnitud de la reducción de CO₂ mediante el aumento de la implantación de instalaciones de WtE de alta eficiencia con producción de energía y, por consiguiente, la sustitución de los combustibles fósiles y la evitación de los vertederos, puede establecerse un sencillo equilibrio ambiental como se ilustra a continuación, en la figura 18.

Como muestra la Figura 18, la incineración de una tonelada de residuos ahorra finalmente emisiones de 100 kg de CO₂ por tonelada de residuos en comparación con el gas natural.

La implementación de instalaciones de WtE que incineran 225 Mtpy adicionales (430-205 Mtpy) de residuos, supone un importante ahorro de CO₂ como se muestra a la derecha.

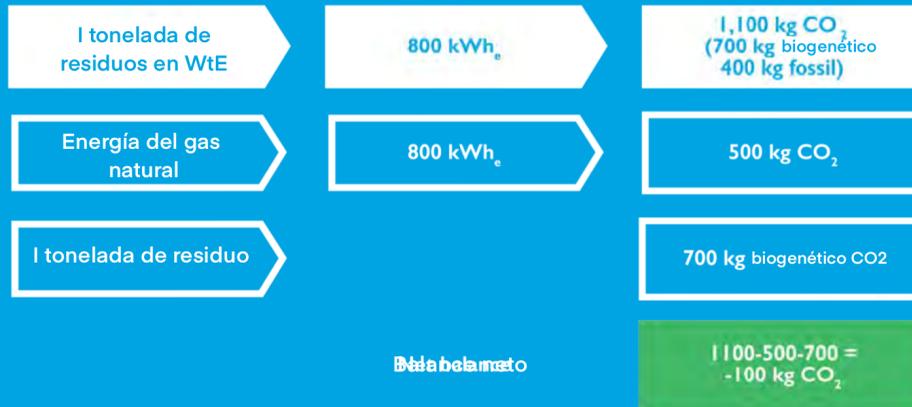
El cálculo anterior se basa en la compensación del gas natural. Si el cálculo se realiza mediante la compensación del carbón, el ahorro de CO₂ sería alrededor de 3 veces mayor porque el carbón tiene una mayor emisión de CO₂ por MWh de electricidad que el gas natural, como se ilustra en la Figura 19.

En la digestión anaeróbica de residuos, el metano generado puede reemplazar la misma cantidad de gas natural u otro combustible fósil y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas, porque el CO₂ de la conversión de materia biogénica no se considera como emisión de CO₂. Los múltiples usos del metano permiten buscar las mejores oportunidades a nivel local. Tendrá un alto potencial de reducción de CO₂ cuando reemplace al gas natural, cuando sustituya a la gasolina como combustible para el transporte o cuando se utilice para producir electricidad (y calor). Aunque el potencial de reducción de CO₂ dependerá de las oportunidades locales, a menudo será más alto para el reemplazo del gas natural o el uso del transporte que para la electricidad, porque el gas natural y la gasolina en sí mismos son fósiles, y la electricidad puede ser sólo parcialmente de origen fósil. Con un potencial de 50 Mtpy de residuos orgánicos domésticos, la generación de metano se estima en unos 4.000 millones de m³ al año, y la compensación de CO₂ se estima en 8 Mtpy, suponiendo que se sustituya el gas natural. Esto corresponde a la sustitución de las emisiones de la conducción

de unos 70 mil millones de kilómetros por año en coches de pasajeros.

Hay que tener en cuenta que el metano en sí mismo es un poderoso gas climático, 34 veces más poderoso que el CO₂ (en base a la masa en una escala de tiempo de 100 años) (Myhre, 2013). Cualquier fuga afectará significativamente el balance de los gases climáticos, y el escape del 1% del metano generado toma más del 10% del potencial de compensación de CO₂. Por lo tanto, se procura reducir al mínimo la emisión de metano no quemado durante su producción y utilización, desde la selección de la combinación de procesos en la planificación hasta el mantenimiento diario en las plantas de biogás. Por ejemplo, el uso de biogás en motores de gas se asocia con la emisión de metano no quemado (típicamente alrededor del 2% del insumo). Hay que tener cuidado de evitar la emisión difusa de metano porque los sistemas de biogás deben mantenerse a presión positiva para evitar la entrada de oxígeno, pero la presión positiva causará la emisión de metano de cualquier fuga menor.

Fig. 18 | **Balance simple de CO₂ para el manejo de una tonelada de residuos y la generación de 0,8 MWh de electricidad en plantas de sólo electricidad en dos sistemas alternativos**



La planta WtE trata 1 tonelada de residuos, genera 800 kWh de electricidad y emite 1.100 kg de CO₂. El sistema alternativo también produce 800 kWh de electricidad pero mediante el uso de gas natural, causando la emisión de 500 kg de CO₂ y los residuos son depositados en vertederos causando la emisión de 700 kg de CO₂ biogénico. Cualquier emisión de metano (siendo un fuerte gas de efecto invernadero) de los vertederos no ha sido considerada en el balance de CO₂.

**- 100 Kg CO₂
por tonelada de
residuos**

X

**225.000.000
toneladas por año**

=

**- 22.500.000 CO₂
por año**

El ahorro de CO₂ por el potencial adicional de WtE equivale a la emisión de 10.000 millones de m³ de gas natural por año o a la emisión por conducir 180.000 millones de kilómetros por año en automóviles de pasajeros, sobre la base de 123,4 g/km para los automóviles de pasajeros en 2014 (Comisión Europea, 2015).

El uso del digestato del proceso de AD como mejorador de suelo/fertilizante se considera a menudo un sumidero de carbono porque el contenido de carbono del digestato se deposita en el suelo y sólo se libera lentamente como CO₂. El sumidero inmediato de carbono es de alrededor de 70 kg por tonelada de residuos domésticos orgánicos, lo que equivale a 3,5 Mtpy de carbono suponiendo 50 Mtpy de residuos, pero esto se contrarresta con la liberación gradual de CO₂ y la generación del poderoso gas de efecto invernadero, el óxido nitroso, por los procesos biológicos en el suelo.

Uno de los mayores desafíos de los vertederos desde la perspectiva del gas climático es la emisión de metano. A escala mundial, el IPCC (Fischbeck M., 2014) ha estimado que se emiten más de 600 Mtpy de equivalentes de CO₂ como metano de los residuos sólidos vertidos, lo cual es notable si se compara con el ahorro estimado en el uso de energía de las WtE y AD. Aunque sólo una cierta fracción de ésta procede de la OCDE (no se disponía de datos de la OCDE sobre las emisiones de metano de los vertederos), es evidente que el desvío de los desechos biodegradables de los vertederos a la recuperación de energía o al reciclado tendrá un notable efecto climático positivo únicamente a partir de la reducción de las emisiones de metano de los vertederos,

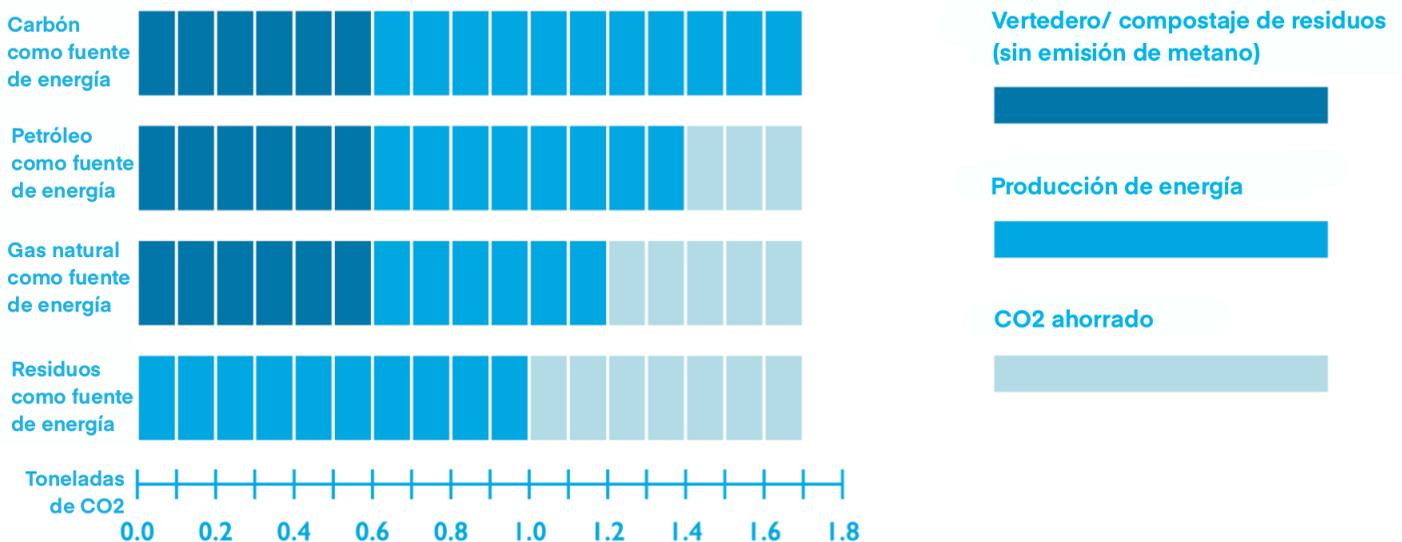
como se señala en (ISWA, 2009).

La mejora de la eficiencia de la recolección de LFG también reducirá la emisión de metano y aumentará la sustitución de los combustibles fósiles mediante el uso del LFG. Sin embargo, la eficiencia de recolección de LFG excederá el 90% para hacer que la generación y uso de LFG tenga un impacto climático positivo, si el LFG no recolectado se emite como metano.



Imagen por Ramboll

Fig. 19 | **Balace de CO2 del tratamiento de residuos y la generaci3n de energa**



Emissi3n de CO2 mediante la producci3n de 10 GJ (2,8 MWh) de calor/energa y el tratamiento de 1 tonelada de residuos

Mercados y distribución

Electricidad

Los precios de la energía pueden verse afectados por impuestos o subsidios, por lo general en cada país. El valor económico de la energía procedente de desechos se juzga mejor por el valor socioeconómico de la forma de energía que se reemplaza sin los efectos de subsidios, impuestos y gravámenes.



Imagen por Ramboll

La electricidad se transfiere fácilmente de la instalación de recuperación de energía a la red eléctrica local, lo que la hace disponible para todo tipo de clientes, incluso a distancia a través de conexiones transfronterizas.

Por lo tanto, la electricidad producida por los desechos reemplaza a otra producción y su valor se refleja en el valor de la producción reemplazada. Esto incluye su valor en términos de huella ambiental, emisiones atmosféricas asociadas y emisiones de dióxido de carbono, y su valor económico. En un período de unos 30 años, la recuperación de energía de los desechos sustituirá principalmente a los combustibles fósiles y la reducción de CO₂ se considera significativa, como se describe en la sección 5.3.

En algunas zonas (por ejemplo, en los Estados Unidos y en partes de Europa) existe un mercado separado para la electricidad verde, incluida la electricidad procedente de AD y WtE, que comprende al menos partes de la electricidad producida. La plataforma de mercado se utiliza para documentar que una cierta parte de la electricidad consumida proviene de fuentes renovables.

La electricidad suele venderse a precio de mercado sobre la base de contratos a corto o largo plazo o una combinación de ambos.

Este precio de venta es mucho más bajo que el precio de la electricidad en el hogar y consiste en una serie de elementos de precio adicionales como el costo de la red, las cuotas de suscripción, la tarifa de electricidad ecológica, el impuesto específico sobre la energía y el impuesto sobre las ventas. El coste medio en la UE de "energía y suministro" (sin incluir la red) se sitúa en torno a los 70-80 euros/MWh en 2012, (EURELECTRIC, 2013) y (COMISIÓN EUROPEA, 2014). El precio de venta de la electricidad generada a partir de

desechos puede ser algo inferior a la indicación de "energía y suministro", porque otros elementos de precio podrían incluirse en este epígrafe. Por ejemplo, en los países nórdicos de Europa el precio medio anual del sistema se sitúa en el rango de 30-47 euros/MWh para los años 2011-2014 (Nordpool spot, 2015). Los precios relativamente bajos en los países nórdicos se considerarán a la luz de una plataforma de mercado eficiente, el aumento de la capacidad de transporte transfronterizo de electricidad y la introducción de una gran producción adicional de turbinas eólicas, que se venderá a cualquier precio que traiga el mercado.

La venta potencial de electricidad de WtE tiene un valor de unos 15.000 millones de euros anuales, suponiendo que el potencial de venta de electricidad sea de 300 TWh/año y un precio típico de 50 euros/MWh.

Si el biogás de las plantas de AD se utiliza para la producción de electricidad, el valor del potencial de 50 Mtpy de residuos orgánicos domésticos asciende a unos 700 millones de euros al año, suponiendo el mismo precio de 50 euros/MWh.

Calefacción/enfriamiento Metano

La perspectiva de la producción de calor y frío a partir de residuos es, en primer lugar, que complementa la electricidad en las plantas de cogeneración recuperando la energía que no puede ser convertida en electricidad por razones dadas por las leyes físicas.

Mientras que la producción neta típica sería de alrededor del 25-30% de una planta de sólo electricidad, la recuperación total de energía podría incrementarse significativamente mediante el uso de la cogeneración de calor y electricidad (CHP), aunque causará una ligera reducción de la producción de energía como se describe en la sección 4.1,

La venta de calor/frío requiere la existencia de una demanda local, y que se establezca una red de transmisión. El calor podría ser suministrado por plantas de WtE de sólo calor o plantas de cogeneración.

En cuanto a la electricidad, el valor del calor/enfriamiento generado se expresa por el valor de las fuentes de energía que reemplazará. El precio del calor suele ser algo menor que el de la electricidad, lo que refleja su menor valor energético, véase la figura 11. Hay grandes variaciones entre las diferentes zonas de calefacción del distrito dependiendo de la naturaleza de las fuentes de calor locales, entre otras cosas.

En el extremo de bajo precio, el precio del calor podría ser el costo marginal del calor generado por CHP a partir de un combustible convencional, que puede ser inferior a 10 euros/MWh, porque se necesita poco combustible para generar el calor. En el extremo superior, por ejemplo, el precio resultante de, por ejemplo, la inversión y el funcionamiento de una caldera de gas natural podría dar lugar a un precio de producción de calor superior a 50 euros/MWh (sin incluir los impuestos). La venta potencial de calor de la cogeneración basada en WtE tiene un valor de unos 8.000 millones de euros anuales, suponiendo que el potencial de venta de calor sea de 400 TWh/año y un precio medio de 20 euros/MWh.

Podría haber cuestiones fiscales relacionadas con la venta de calor que afecten al mercado y a la fijación de precios, por ejemplo, el impuesto sobre el calor suministrado por la planta de conversión de desechos en energía y/o el impuesto sobre el combustible alternativo para el suministro de calor.

Si se genera calor a partir de unidades de cogeneración de biogás instaladas como parte de las plantas de AD, el potencial de generación asciende a 18 TWh por año a un valor de 180 millones de euros por año, considerando el potencial de 50 Mtpy de residuos orgánicos domésticos y suponiendo que el 50% del calor se venda.

La ventaja de producir metano es, en primer lugar, que podría sustituir al gas natural u otros combustibles fósiles, y su correspondiente emisión de dióxido de carbono, porque el uso del metano generado por los desechos se considera biogénico con cero emisión de dióxido de carbono.

El metano procedente de la digestión de desechos normalmente necesitaría ser mejorado y presurizado para su transferencia a una red local de gas natural o para su transporte a una gasolinera para su venta para su uso en el transporte por carretera. La mejora incluye la eliminación de dióxido de carbono y otros contaminantes, por ejemplo, siloxanos y sulfuro de hidrógeno. En algunas zonas (por ejemplo, en partes de Europa) se está desarrollando un mercado separado para el gas verde, en particular para el biogás que ha pasado a ser de calidad de gas natural y se ha transferido a la red de gas natural. Se emiten certificados para el gas verde producido, lo que permite a los consumidores extraer gas verde de la red común mediante la compra de certificados. Esos certificados también pueden documentar que una cierta parte de la energía consumida procede de fuentes renovables.

El precio del metano sería, como punto de partida, el precio de mercado del gas natural, pero pueden aplicarse subsidios que hagan que la producción y la venta del metano generado por los desechos sea económicamente atractiva. También podría haber un subsidio indirecto al permitir la venta libre de impuestos de metano (por ejemplo, para el transporte por carretera), donde se gravan otros combustibles.

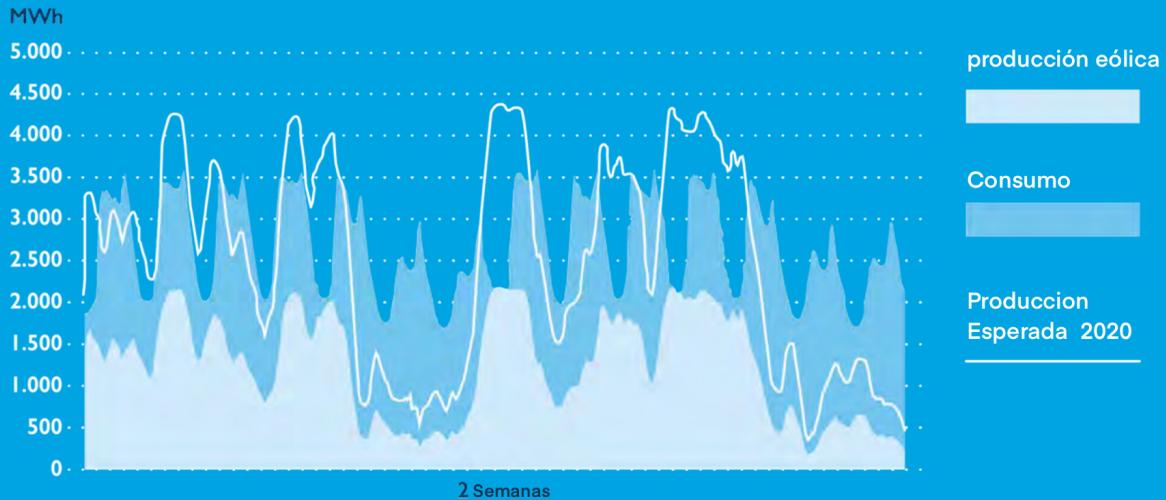
El precio medio del gas natural (energía y suministro) en Europa se sitúa en el rango de 30-40 euros/MWh en 2012 para la industria y los hogares (COMISIÓN EUROPEA, 2014). Por lo tanto, podría considerarse el valor actual típico del metano mejorado de las plantas de AD, excluyendo el efecto de los subsidios, impuestos y gravámenes.

Con este nivel de precios, el potencial de generación de biogás de las plantas de AD de 40 TWh por año tiene un valor de 1,2 a 1,6 mil millones de euros al año. Parece que el valor de la venta del metano podría ser, en promedio, mayor que su uso local para la producción de electricidad en una planta de sólo electricidad, lo que permitiría algunos gastos para la mejora, la presurización y el transporte del gas a los consumidores externos. También parece que las oportunidades de mercado y la fijación de precios dependen de la situación local, lo que requiere una evaluación individual para cada caso.



Imagen por Valorsul

Fig. 20 | Ilustración de la producción actual de energía eólica y el consumo de electricidad durante 2 semanas junto con la producción eólica prevista para el año 2020



La zona blanca delimita la producción eólica actual, la zona gris el consumo, la línea blanca muestra la previsión para 2020, y las zonas azules entre las líneas blancas y la zona gris indican la generación de electricidad eólica prevista en exceso del consumo.

Desarrollo de los mercados energéticos

El mercado de la electricidad ya se encuentra en algunas zonas afectadas por grandes insumos de energía renovable que no pueden controlarse fácilmente, por ejemplo, los sistemas fotovoltaicos solares y las turbinas eólicas, como se ilustra en la figura 20 de arriba. Esto hace que los demás actores del sistema de producción de electricidad se comporten de manera diferente porque la demanda, que no está cubierta por las energías renovables, variará significativamente, y se espera que los precios sigan la oferta/demanda.

Por lo tanto, la futura producción de electricidad debería ser más flexible. También Waste-to-Energy se enfrentará a este desafío y tendrá que ajustar el funcionamiento en consecuencia para maximizar el valor de la producción de energía, por ejemplo, estableciendo una mayor capacidad de tratamiento pero operando menos horas para alimentar la red en momentos en que otras fuentes de energía renovable no pueden seguir las demandas del mercado.

Con el impulso hacia una reducción significativa del uso de combustibles fósiles y una creciente demanda de energía en todo el mundo, otras fuentes de electricidad tendrá que

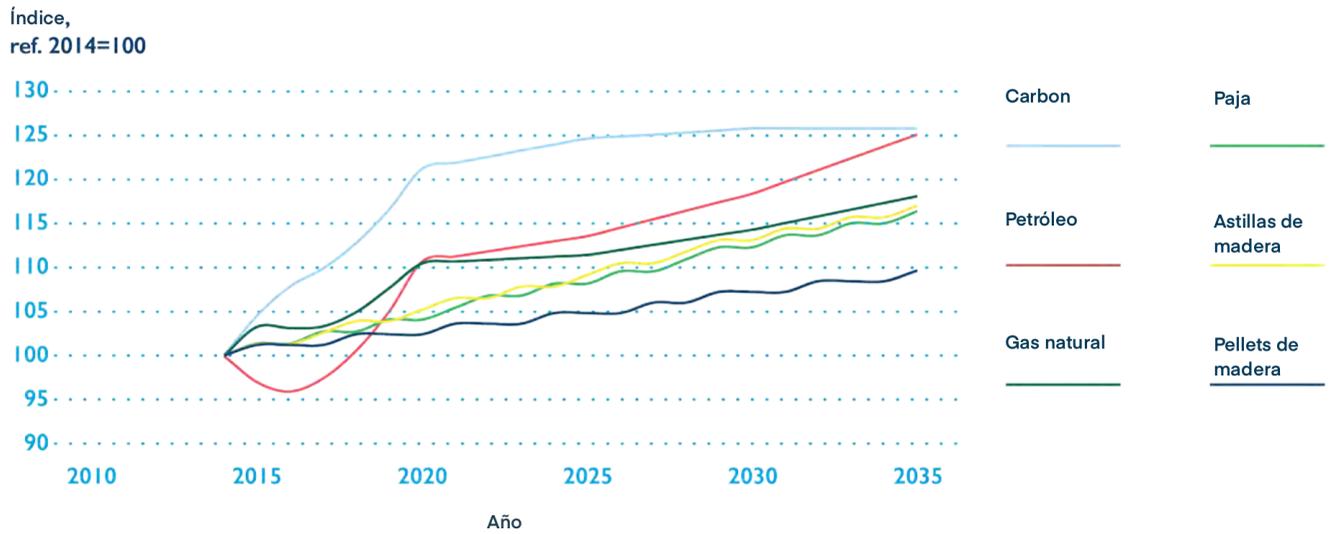
ampliar su producción de manera significativa. Para explotar al máximo los recursos energéticos primarios, la maximización de la eficiencia será un objetivo clave, sobre todo para las instalaciones de conversión de desechos en energía. Por lo tanto, se espera que las futuras instalaciones de WtE se desarrollen con una eficiencia energética sobresaliente y se espera que las plantas más antiguas de baja eficiencia energética sean sustituidas en un futuro previsible por plantas modernas y energéticamente eficientes.

Las plantas de cogeneración que suministran calefacción o refrigeración tendrán una ventaja en la energía futura marcada porque pueden alejarse de la producción de electricidad, cuando los precios de la electricidad son bajos. Además, las redes de calefacción de los distritos permitirán el almacenamiento intermedio del calor para la disociación completa del funcionamiento de los sistemas de recuperación de energía y el uso de la energía.

Valoración de la energía y los combustibles y tendencias del mercado

Las proyecciones de los precios futuros de la energía vienen con una gran incertidumbre. El precio puede verse influido por la evolución mundial de los precios de los combustibles, además de las circunstancias locales o regionales. Sin embargo, se espera un aumento del precio de la electricidad de alrededor del 40-60% en los próximos 20 años, figura 22, en cuyo caso la recuperación de energía de los residuos se hace aún más atractiva.

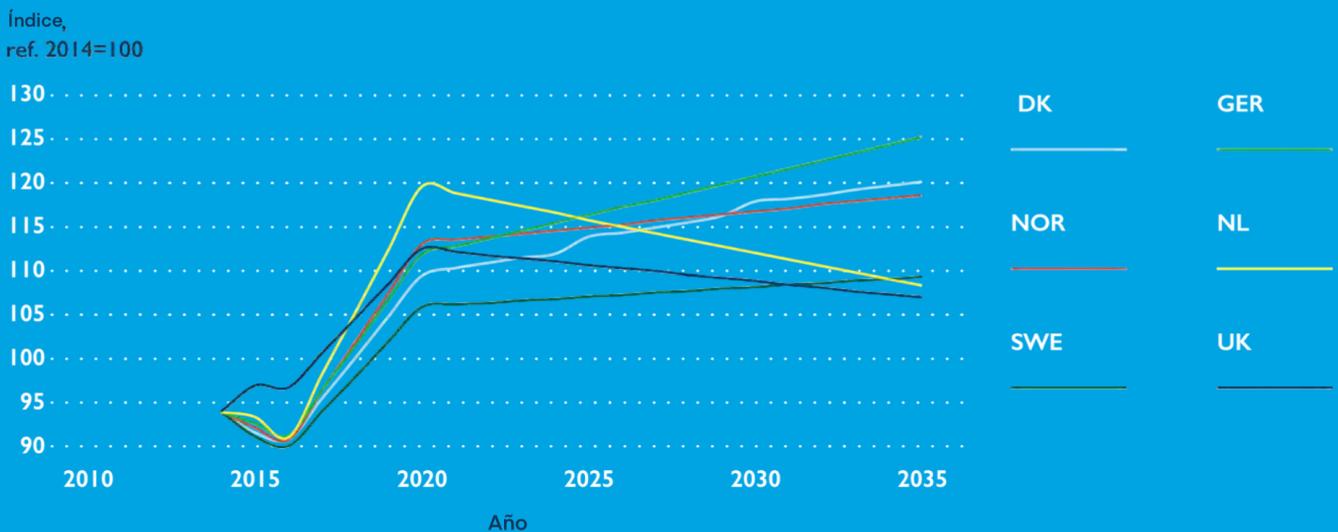
Fig. 21 | **Proyecciones del precio del combustible**



Proyecciones de los precios de los combustibles, precios constantes indexados con referencia al año 2014. El índice muestra para cada combustible respectivo, el precio del combustible (por MWh de contenido energético) en porcentaje del precio del año 2014.

Fuente: Energinet.dk, 2014

Fig. 22 | **Proyecciones del precio de la electricidad**



Proyecciones de los precios de la electricidad, precios constantes indexados con referencia al año 2014. El índice muestra el precio de la electricidad (por MWh) en porcentaje del precio del año 2014.

Fuente: Energinet.dk, 2014

Atractivo para los inversores



Imagen por Ramboll

Las instalaciones de recuperación de energía y combustibles son propiedad de empresas municipales en algunos países y en otros son de propiedad privada. La propiedad de los desechos municipales puede transferirse del público a la instalación de tratamiento mediante contratos que a menudo surgen de un proceso de licitación pública. Independientemente de la propiedad, el público tiene interés en garantizar una capacidad de gestión de residuos estable y respetuosa con el medio ambiente a largo plazo, y las instalaciones de tratamiento como las plantas WtE y AD pueden ser parte de esto. Al igual que otros proyectos de infraestructura, hay muchos interesados en el establecimiento de esas instalaciones, y es importante abordar las cuestiones y preocupaciones planteadas para que el proyecto tenga éxito.

La venta de gas, electricidad y calefacción/refrigeración suelen ser actividades que desempeñan un importante papel económico en el caso de los negocios, y la producción de energía es un importante copartícipe en un proyecto de tratamiento de desechos.

Con una vida financiera de una planta de unos 20 años, los contratos a largo plazo para la entrega de desechos son de alta prioridad, y por lo general se necesitaría adquirir financiación externa a través de los bancos. Como se describe en la sección 3, se prevé que el potencial de los desechos para la recuperación de energía aumente considerablemente en los próximos 25 a 30 años y que se disponga de grandes cantidades de desechos en todo el mundo. La forma en que estos desechos se ponen a disposición localmente debe ser considerada en cada caso. La certeza de los precios de la energía y la existencia de un mercado para la forma de energía generada también son importantes para el caso comercial. Los impuestos y las subvenciones pueden desempeñar un papel importante, pero ambos son susceptibles de cambios rápidos, lo que hace difícil utilizarlos como base para un caso comercial a largo plazo.

Por lo tanto, hacer que un proyecto de recuperación de energía sea atractivo para los inversores está asociado con la asignación de riesgos. Las tecnologías de WtE de alta eficiencia para el tratamiento de los desechos y la recuperación de energía son, como se ilustra en el informe, tecnologías bien probadas que han sido optimizadas y mejoradas a lo largo de decenios. Desde el punto de vista de los inversores, los riesgos tecnológicos se consideran bajos para los proyectos de WtE.

También se considera que las plantas de AD están bien probadas, y el riesgo tecnológico se considera bajo cuando se asegura un pre-tratamiento eficiente de los desechos junto con la mitigación de los olores. Sigue siendo un reto asegurar la eliminación del digestato para fines agrícolas porque existe el riesgo de contaminación o la percepción de que existe tal riesgo.

Las plantas de AD a menudo dependen de varias materias primas diferentes donde los residuos orgánicos domésticos son sólo uno. Los riesgos incluyen la incertidumbre de los precios futuros de la energía, la existencia de un mercado eficiente para la energía renovable y la fijación de precios y la disponibilidad de materias primas suplementarias.

Demuestra que el público y el inversor tienen un interés mutuo en mitigar los riesgos para que las instalaciones de recuperación de energía tengan éxito.



Referencias

- EURELECTRIC. 2013. Estadísticas y tendencias de energía 2013. s.l. : EURELECTRIC, 2013.
- Avfall Sverige. 2015. Aumento de la recuperación de material - ¿Qué papel jugará la recuperación de energía? s.l. : Avfall Sverige, 2015. ISSN 1103-4092.
- Barlaz, Morton A. y Cruz, Florentino de la. 2010. Modelización de gases de vertedero: Estimación de las constantes de la tasa de decaimiento del gas de los vertederos y los rendimientos de los componentes individuales de los residuos. 2010.
- CEWEP. Impuestos y prohibiciones sobre los vertederos. <http://cewep.eu>. [En línea] [Citado: 09. 04 2015.] http://cewep.eu/media/cewep.eu/org/med_557/1406_2015-02-03_cewep_-_landfill_inctaxesbans.pdf.
- Christensen, T y col. 2003. Documentación básica para biogaspotientialet i organisk dagrenovation, Miljøprojekt Nr. 802 (En danés, resumen en inglés). s.l. : Miljøstyrelsen, Agencia Danesa de Protección Ambiental, 2003.
- Christensen, T.H., Manfredi, S. y Knox, K. 2011. Vertederos: Rellenos del reactor. Thomas H. Christensen. Tecnología y gestión de residuos sólidos. s.l. : Blackwell Publishing, 2011.
- Connolly, D. y col. 2013. MAPA DE RUTA DEL CALOR EUROPA 2050, SEGUNDO ESTUDIO PREVIO PARA LA UE 27. s.l. : Departamento de Desarrollo y Planificación de la Universidad de Aalborg, 2013.
- Energinet.dk. 2014. Supuestos de análisis de Energinet.dk 2014-2035, actualización de septiembre de 2014. <http://www.energinet.dk/>. [En línea] 2014. [Citado: 11. 05 2015.] <http://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Engelske%20documents/El/Energinet%20dk's%20analysis%20supuestos%202014-2035%20-%20septiembre%202014.pdf>.
- Consejo de la UE. 2008. Directiva marco sobre residuos, DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 relativa a los residuos y por la que se derogan determinadas directivas. s.l. : consejo de la UE, 2008.
- COMISIÓN EUROPEA. 2014. Precios y costes de la energía en Europa. s.l. : COMISIÓN EUROPEA, 2014.
- Comisión Europea. 2015. Reducción de las emisiones de CO2 de los coches de pasajeros. 2015. [Citado: 22. Julio 2015.] http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm.
- EUROSTAT . 2014. Balances energéticos 2011-2012. s.l. : Eurostat, 2014.
- Fichtner. 2004. La viabilidad del tratamiento térmico avanzado de los desechos sólidos urbanos en el Reino Unido. Londres: Fideicomiso de Capacitación y Educación de Servicios Ambientales
- Fischedick M., J. Roy, A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J.M. Allwood, J.-P.Ceron, Y. Geng, H. Kheshgi, A. Lanza, D. Perczyk, L. Price, E. Santalla, C. Sheinbaum y K. Tanaka. 2014. Capítulo 10, Industria. O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Fara-hani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel y J.C. Minx (eds.) Edenhofer. Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- AIE. 2015. www.iea.org. 2015. [Citado: 5. 2 2015.] <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/re-port/?country=OECDTOT&product=re>.
- ISWA. 2012. Globalización y Gestión de Residuos, fase 1: Conceptos y hechos. s.l. : ISWA, 2012.
- ISWA. 2013. Directrices de ISWA: Residuos a la energía en países de ingresos bajos y medios. s.l. : ISWA, 2013a.
- ISWA. 2009. Residuos y Cambio Climático, Libro Blanco de ISWA. s.l. : ISWA, 2009.

ISWA. 2012. Conversión de residuos en energía. Informe de estado del arte. s.l. : ISWA, 2012. Estadísticas. 6ª edición.

ISWA. 2013a. Libro Blanco, Tecnologías Alternativas de Conversión de Residuos. s.l. : ISWA, 2013b.

Kebag, Emmenspitz KVA. 2015. Flurec (en alemán). <http://www.kebag.ch>. [En línea] 23. 02 2015. <http://www.kebag.ch/flurec.html>.

Myhre, Gunnar y col. 2013. Forzamiento radiativo antropogénico y natural. . [editor] T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.) [Stocker. Cambio climático 2013: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I a la Quinta Evaluación. s.l. : Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU., 2013.

AGENCIA SUECA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. 2014. ¿Qué se está haciendo sobre el desperdicio de alimentos ?, Informe 6620 (en sueco, resumen en inglés). s.l. : Agencia Sueca de Protección Ambiental, 2014.

Lugar de Nordpool. 2015. www.nordpoolspot.com. [En línea] 10. 02 2015. [Citado: 10. 2 2015.] <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Yearly/?view=table>.

OCDE. 2013. , El medio ambiente de un vistazo Indicadores de la OCDE. s.l. : Publicaciones de la OCDE, 2013.

OCDE. 2015. Datos de la OCDE sobre residuos urbanos. OECD.org. [En línea] 8. 02 2015. [Citado: 8. 2 2015.] <http://data.oecd.org/waste/municipal-waste.htm>.

Ramboll. 2014. Alta eficiencia Instalaciones de conversión de residuos en energía. [editor] Karl Thohmé-Komiensky. Waste Management - Waste-to-Energy, Conferencia en Viena. s.l. : TK Verlag Karl Thohmé-Komiensky, 2014. por Søndergaard, Inger Anette; Hul-gaard, Tore y Tobiassen, Lasse.

Ramboll. 2012. Desechos para la energía para la calefacción del distrito. ENCICLOPEDIA DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA DE LA SOSTENIBILIDAD. 2012. Por Tobiassen, Lasse y Kamuk, Bettina.

Reiman, D.O. 2012. Informe de energía CEWEP III. s.l. : CEWEP, 2012.

Stege, G. A. 2013. Eficiencia de recolección estimada en 100 años para vertederos de EE. UU. 2013.

SWANA. 2011. Tecnologías de conversión de residuos. s.l. : Asociación de Residuos Sólidos de Norteamérica, 2011.

EPA de EE. UU. 2015. Base de datos de proyectos de vertederos LMOP y de energía LFG. [En línea] 2015. [Citado: 25 de julio de 2015.] <http://www.epa.gov/lmop/proyectos-candidatos/operativo.html>.

USEPA. 2003. Normas nacionales de emisión de contaminantes atmosféricos peligrosos: vertederos de residuos sólidos urbanos. [En línea] 2003. [Citado: 20. 05 2015.] <http://www.epa.gov/ttn/atw/landfill/fr16ja03.pdf>.

Willumsen, H y Barlaz, M.A. 2011. Capítulo 10.10, Relleno sanitario: producción, extracción y utilización de gas. [editor] Thomas H. Christensen. Tecnología y Gestión de Residuos Sólidos. s.l. : Blackwell Publishing Ltd., 2011.

Anexo

La producción de las instalaciones de conversión de desechos en energía suele ser electricidad y vapor, que pueden utilizarse para calefacción, refrigeración y otras aplicaciones. De las plantas de AD y los vertederos la salida del proceso es el biogás, donde el componente que transporta la energía es el metano.

Esas formas de energía son bastante diferentes en calidad y valor, como se ilustra a continuación.

La electricidad es la forma de energía de mayor rango porque puede utilizarse para realizar trabajos mecánicos a través de un motor eléctrico prácticamente sin pérdidas, y la electricidad es la única forma de energía que se utiliza para muchas aplicaciones, por ejemplo, la electrónica y los electrodomésticos.

La electricidad tiene la ventaja de ser fácil de transportar a largas distancias en cables

de alta tensión y la desventaja de ser difícil de almacenar.

El calor es la forma de energía de menor rango porque posee poco potencial para generar trabajo, y la calefacción de los edificios es el uso predominante. El calor en forma de agua caliente tiene la ventaja de ser fácil de almacenar. La desventaja es que la venta de calor requiere una demanda de calor y una red de calefacción de distrito para llegar a los consumidores.

El enfriamiento es equivalente al calor, como alternativa para recuperar la parte de la energía que el vapor no puede ser convertido en electricidad. El enfriamiento puede generarse a partir del vapor en un enfriador de absorción.

El valor de la electricidad en relación con el calor dependerá de las circunstancias locales, en particular de lo que de otro modo habría

suministrado la electricidad y el calor. El patrón típico es que la electricidad se valora un factor 2-3 más alto que el calor. Por ejemplo, dentro de la UE, la llamada "fórmula R1", utilizada como medida de la eficiencia energética de las plantas, atribuye a la electricidad un peso de 2,6, mientras que al calor sólo se le atribuye 1,1, véase el Anexo II de la Directiva marco sobre residuos, (Consejo de la UE, 2008).

El vapor es un producto intermedio del sistema WtE (como en otras calderas). Se genera en la caldera desde la cual se transfiere al sistema de turbina/generador de vapor, generando electricidad y potencialmente calor. El vapor puede utilizarse directamente para fines industriales (calentar, hervir, secar, etc.). La conversión de la energía en vapor a electricidad en una turbina está limitada en su eficiencia regida por las leyes de la física.

Tab. 5 | Eficiencia bruta de las instalaciones de WtE

EFICIENCIA (%).	TÍPICO, EXISTENTE.	TÍPICO, NUEVO.	ALTA EFICIENCIA
Solo electricidad	24	28	33
CHP			
Electricidad	20	23	28
Calor	65	66	67
Total	85	89	95
Cogeneración con condensación de gases de combustión			
Electricidad	20	23	27
Calor	77	77	83
Total	97	100	110

Agradecimientos

Grupo de Referencia y Colaboradores: Deseamos expresar nuestra gratitud al Grupo de Referencia del Equipo de Tareas de Gestión de Recursos, al que se consultó continuamente y que aportó contribuciones y orientación a los informes. Los miembros del Grupo de Referencia fueron: Elisa Tonda (UNEP DTIE), Heijo Scharf (Avfalzorg), Jean-Paul Leglise (ISWA), John Skinner (SWANA), Liazzat Rabbiosi (UNEP DTIE), Patrick Dorvil (EIB), Peter Börkey (OECD), Sarah Sanders Hewett (ERM), Tore Hulgaard (Rambøll) Además, quisiéramos agradecer a los miembros de la Junta de la ISWA y a los miembros del Comité Científico y Técnico sus contribuciones a los resultados del Grupo de Tareas mediante sugerencias, comentarios escritos y en persona y la participación en las sesiones y talleres relacionados con el Grupo de Tareas organizados en septiembre de 2014 en Sao Paulo (Congreso Mundial de la ISWA 2014), y en junio de 2015 en París (taller del Grupo de Tareas sobre la gestión de los recursos). Por último, quisiéramos dar las gracias a los diversos expertos y consultados que hicieron avanzar la calidad del informe con sus valiosas aportaciones.

Diseño y diagramación: Ana Loureiro y Deslink Design

Fotografías y gráficos: Las fotografías y los gráficos fueron proporcionados y desarrollados por Deslink Design utilizando los gráficos existentes con el permiso de los autores acreditados.

Miembros del grupo de trabajo de la ISWA sobre la gestión de los recursos

Björn Appelqvist
Presidente
Ciudad de Copenhague, Dinamarca

Ana Loureiro
EGF, Portugal

Andreas Bartl
Universidad Tecnológica de Viena,
Austria

Bettina Kamuk
Rambøll, Dinamarca

Costas Velis
Universidad de Leeds, Reino Unido

Gary Crawford
Veolia, Francia

Jane Gilbert
Carbon Clarity, Reino Unido

Martin Brocklehurst
La Institución Colegiada de
Gestión de desechos, Reino Unido

Kata Tisza
ISWA General Secretaria

Preparado por el Grupo de Tareas de la
ISWA sobre la gestión de los recursos
con el apoyo de:



Asociación Internacional de Residuos Sólidos
Auerspergstrasse 15, Top 41 1080 VIENA - AUSTRIA
Teléfono +43 (1) 253 6001 Fax +43 (1) 253 6001 99
www.iswa.orgiswa@iswa.org