



# Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos

Guía para los Responsables de la Toma de Decisiones en Países en vías de Desarrollo y Emergentes

Como empresa federal, GIZ apoya al gobierno alemán en el logro de sus objetivos en el ámbito de la cooperación internacional para el desarrollo sustentable.

**Publicado por:**  
Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Oficinas registradas  
Bonn y Eschborn, Alemania

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40  
53113 Bonn, Alemania  
T +49 228 44 60-0  
F +49 228 44 60-17 66

E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)

**Descripción del proyecto:**  
Proyecto de asesoría: Conceptos para la Gestión Sustentable de Residuos Sólidos y la Economía Circular

**Autores:**  
Dieter Mutz, Dirk Hengevoss, Christoph Hugi, Thomas Gross de la Universidad de Ciencias y Artes Aplicadas del Noroeste de Suiza (FHNW).

**Editado por:**  
Daniel Hinchliffe, Johannes Frommann y Ellen Gunsilius de GIZ.

**Traducción al español por:**  
ATI Traducciones.

**Diseño/distribución:**  
Jeanette Geppert pixelundpunkt kommunikation, Frankfurt

**Créditos/Fuentes fotográficos:**  
© Doosan Lentjes GmbH: p. 8 y carátula, 21, 25; © Fachverband BIOGAS e.V.: p. 7, 31, 32, 34; © Geocycle: p. 9 y carátula, 27, 29; © GIZ: p. 6 y carátula, 10, 13, 36; © Dieter Mutz: p. 11, 18, 39; © Johannes Frommann: 34 (derecha) y carátula.

**URLs:**  
La presente publicación contiene ligas a sitios web externos. La responsabilidad del contenido de los sitios externos enlistados recae en las partes que publican dicha información. Cuando las ligas a dichos sitios se publicaron por primera vez, GIZ verificó el contenido de terceros para establecer si podían derivar en responsabilidades civiles o penales. No obstante, no se puede esperar una revisión continua de dichas ligas a sitios externos sin que exista una indicación concreta de la violación de algún derecho. En caso de que GIZ tuviera conocimiento o fuera notificado por un tercero de que un sitio externo al cual ofrece una liga de acceso deriva en alguna responsabilidad civil o penal, de inmediato eliminará la liga a dicho sitio. GIZ expresamente se desvincula del contenido en cuestión.

GIZ se declara responsable del contenido de la presente publicación.

Eschborn, mayo del 2017

# Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos



Guía para los Responsables de la Toma de Decisiones  
en Países en vías de Desarrollo y Emergentes

# TABLA DE CONTENIDO

Lista de Abreviaturas	5
Resumen ejecutivo	6
<b>1 Introducción</b>	<b>10</b>
1.1 Urbanización y nuevos retos en la gestión de residuos	11
1.2 Aprovechamiento energético de residuos: una tentación para los municipios	12
1.3 Aprovechamiento energético de residuos y la economía circular	14
1.4 Mitos acerca del aprovechamiento energético de residuos	16
<b>2 Condiciones previas para el aprovechamiento energético de residuos</b>	<b>17</b>
2.1 Características de los residuos urbanos	17
2.2 Marco legal e impactos ambientales	18
2.3 Aspectos financieros e institucionales de las plantas para el aprovechamiento energético de residuos	19
<b>3 Opciones de tecnologías para el aprovechamiento energético de residuos</b>	<b>20</b>
3.1 Incineración de residuos sólidos urbanos	21
3.2 Coprocesamiento	27
3.3 Digestión anaerobia para la producción de biogás	31
3.4 Captura de gas de relleno sanitario	34
3.5 Tecnologías alternativas: pirólisis y gasificación	39
<b>4 Matriz de apoyo para la toma de decisiones</b>	<b>42</b>
4.1 Objetivo	42
4.2 Matriz para los responsables de la toma de decisiones	44
4.3 Recomendaciones	48
<b>Anexo A: Descripción de los parámetros de la matriz de decisiones</b>	<b>50</b>
<b>Anexo B: Literatura adicional</b>	<b>56</b>
<b>Referencias</b>	<b>57</b>

## Lista de Abreviaturas

<b>AFR</b>	Materias primas y combustibles alternos
<b>CDR</b>	Combustible derivado de residuos
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CHP</b>	Unidad de Cogeneración
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CSR</b>	Combustibles sólidos recuperados
<b>CWG</b>	Grupo Colaborativo de Trabajo
<b>DA</b>	Digestión anaerobia
<b>GRS</b>	Gestión de Residuos Sólidos
<b>GRS</b>	Gas de relleno sanitario
<b>GRSU</b>	Gestión de residuos sólidos urbanos
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>HF</b>	Ácido fluorhídrico
<b>IRSU</b>	Incineración de residuos sólidos urbanos
<b>MDL</b>	Mecanismo de Desarrollo Limpio
<b>MDS</b>	Meta de desarrollo sustentable
<b>NAMA</b>	Acciones nacionales apropiadas de mitigación
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de nitrógeno
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas
<b>ONG</b>	Organizaciones no gubernamentales
<b>OyM</b>	Operaciones y mantenimiento
<b>PCI</b>	Poder calorífico inferior
<b>PET</b>	Tereftalato de polietileno
<b>PVC</b>	Cloruro de polivinilo
<b>RS</b>	Relleno sanitario
<b>RSU</b>	Residuo sólido urbano
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de azufre
<b>TA</b>	Tecnologías alternativas (pirólisis/gasificación)
<b>TMB</b>	Tratamiento mecánico-biológico
<b>VCO</b>	Velocidad de carga orgánica
<b>WBCSD</b>	Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable
<b>WtE</b>	Waste-to-Energy – Aprovechamiento energético de residuos

# RESUMEN EJECUTIVO



El enorme incremento en la generación de los residuos sólidos urbanos (RSU) en las ciudades de crecimiento acelerado de países en vías de desarrollo y emergentes, ha generado preocupación por parte del público con respecto a los impactos sobre la salud y el medio ambiente. Hoy por hoy, los residuos generados por cerca de 3 mil millones de personas se siguen depositando en formas no controladas [1]. Al crearse mayor conciencia entre ciudadanos y los responsables de la toma de decisiones con respecto a la contaminación ambiental y su impacto sobre la calidad de vida, la gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRSU) ha adquirido relevancia en las agendas políticas locales. En la búsqueda de la modernización de sus sistemas de gestión de residuos, los responsables de la toma de decisiones locales a menudo se enfrentan con el dilema de la inversión en tecnologías para el aprovechamiento energético de residuos (Waste-to-Energy o WtE). Las tecnologías WtE se presentan cada vez más como opciones atractivas para resolver no sólo los urgentes problemas de la disposición de residuos sino también varios otros retos simultáneos: escasez en la generación de energía eléctrica, espacios limitados para rellenos sanitarios, y las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la disposición inapropiada de residuos. No obstante, la introducción de tecnologías WtE a menudo peligran a causa de obstáculos comunes, tales como la falta de sistemas tarifarios para fondar los costos de inversión y de operación, la aplicación insuficiente de la legislación ambiental y el número limitado de personal calificado para la operación eficiente y efectiva de los sistemas instalados. Si estos aspectos no se toman en consideración, los proyectos WtE corren el riesgo de fracasar a expensas de los municipios y del medio ambiente local.

## ¿Por qué esta Guía?

Seguir el debate sobre el aprovechamiento energético de residuos puede ser difícil debido a la alta complejidad de las diferentes tecnologías y, efectivamente, el aprovechamiento energético de residuos a menudo se considera una solución para resolver todos los problemas de residuos y de energía de un municipio. Sin embargo, las condiciones marco en la mayoría de los países en vías de desarrollo y emergentes son, en esencia, diferentes a las que hemos observado durante el nacimiento de proyectos WtE en países industrializados, donde las plantas de aprovechamiento energético de residuos del tamaño de una compañía de servicios son cada vez más comunes. Incluso desde una perspectiva tecnológica, casi todo es posible, pero eso no significa que todas las tecnologías se puedan adaptar a las condiciones locales. Se debe considerar el contexto más amplio para decidir su aplicabilidad e idoneidad dentro de un contexto específico. Las asesorías deben ir más allá de los aspectos meramente técnicos.

*Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos – Una guía para los responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes* presenta las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de residuos (WtE) actualmente aplicadas a nivel municipal, y su papel potencial en un sistema integral para la gestión de residuos. La Guía busca orientar a los responsables de la toma de decisiones y sus asesores en la evaluación de oportunidades, límites y riesgos de las diversas tecnologías WtE para lograr una planeación efectiva y una inversión eficiente en la gestión de residuos. Su objetivo es 1) crear mayor transparencia en esta discusión sobre el aprovechamiento energético de residuos, 2) ofrecer una perspectiva técnica, financiera, institucional, social, ambiental y legal de las tecnologías WtE de uso más frecuente, y 3) resaltar las implicaciones y limitaciones de su aplicación al mismo tiempo de considerar estándares ambientales reconocidos a nivel internacional. En particular, explica la necesidad de evaluar si las condiciones locales para el manejo de residuos son las apropiadas, antes de considerar una opción de aprovechamiento energético de residuos. Ello no reemplaza la necesidad de una evaluación profesional de viabilidad en la planeación de un proyecto WtE.

Esta guía fue desarrollada por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) en representación del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania, en cooperación con la Universidad de Ciencias y Artes Aplicadas del Noroeste de Suiza (FHNW).

## ¿Qué es el aprovechamiento energético de residuos o WtE?

WtE hace referencia a una familia de tecnologías de tratamiento de residuos para recuperar energía en la forma de calor, electricidad o combustibles alternos, tales como el biogás. El alcance del término 'Waste-to-Energy' es sumamente amplio, y abarca un rango de tecnologías de diferente escala y complejidad. Puede incluir la producción de gas para cocina en digestores domésticos a partir de residuos orgánicos, la recolección de gas metano de rellenos sanitarios, el tratamiento térmico de residuos en plantas de incineración del tamaño de una compañía de servicios, el coprocesamiento de Combustible Derivado de Residuos (CDR) en plantas cementeras o la gasificación. Esta guía aplica una definición más amplia de WtE, haciendo referencia a plantas a gran escala a nivel municipal (es decir, del tamaño de una compañía de servicios) usando tecnologías de incineración, coprocesamiento, digestión anaerobia, recolección de gas de relleno sanitario, y pirólisis/gasificación. Estas cinco tecnologías aprovechan diferentes flujos de residuos y tienen funciones y características distintas, por lo que su aplicabilidad debe evaluarse en forma independiente con base en el contexto local y el flujo de residuos en cuestión. El Capítulo 3 ofrece una visión más detallada de estas cinco tecnologías.

## Hallazgos y recomendaciones clave

Al considerar la introducción de tecnologías WtE, los responsables de la toma de decisiones deberán considerar los siguientes aspectos:

- » **El desarrollo de sistemas de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos debe seguir la jerarquía de residuos:** La prioridad debería ser la reducción de residuos mediante la prevención, seguida por la preparación para la re-utilización y el reciclado material de residuos. Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos urbanos se pueden clasificar como una tecnología complementaria para la recuperación de energía a partir fracciones remanentes no reciclables de RSU, y por lo mismo no deberían competir con medidas para la reducción, reutilización y reciclado de residuos. Al ejecutarse en condiciones controladas, el aprovechamiento energético de residuos se prefiere por encima de su disposición final o eliminación, pero ocupa un nivel de prioridad menor en la jerarquía de residuos.

*Evalúe su flujo de residuos e identifique potencial adicional para la reutilización y reciclado de fracciones de residuos específicas.*

- » **El aprovechamiento energético de residuos debe cumplir con altos estándares de emisiones:** Sólo en casos aislados existe un marco legal integral para todos los tipos de aprovechamiento energético de residuos urbanos. Donde no existan leyes o las existentes no se puedan aplicar, no se podrán alcanzar altos estándares de emisiones, y bajos estándares de emisiones no deberán aceptarse debido a su fuerte impacto sobre la salud.

*Busque experiencias internacionales y aplique estándares internacionalmente reconocidos en sus procesos de licitación, asegurando la existencia de mecanismos de monitoreo y ejecución para así garantizar el cumplimiento.*





- » **El aprovechamiento energético de residuos requiere el conocimiento de los volúmenes y características de residuos:** Los volúmenes se duplicarán en los próximos 20 años en muchas ciudades, pero éstas a menudo carecen de planes de gestión de residuos consistentes que consideren cambios demográficos y sociales.

*Prepare un plan de gestión de residuos para la ciudad que considere el aumento de volúmenes de residuos para el mediano y largo plazo, y describa los flujos de residuos más relevantes, sus características y opciones de tratamiento. También deberá considerarse el potencial de cooperación entre municipios para llegar a una economía de escala viable.*

- » **El aprovechamiento energético de residuos se basa en un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos:** Únicamente municipios capaces de gestionar la recolección eficiente de residuos y un sistema de transporte con disposición final segura podrán tener la capacidad de gestionar también un sistema de aprovechamiento energético de residuos en forma exitosa.

*Compruebe y documente que el sistema actual para el manejo de residuos tiene madurez técnica y financiera.*

- » **El aprovechamiento energético de residuos requiere importantes recursos financieros:** Asegurar el financiamiento para la operación y el mantenimiento es clave para la operación sustentable de las plantas de aprovechamiento energético de residuos.

*Si su municipio es incapaz de financiar su actual sistema de recolección y tratamiento de residuos en forma continua, se debería reconsiderar la construcción de una planta de aprovechamiento energético de residuos.*

- » **Los ingresos por la venta de energía no cubren los costos de un sistema de aprovechamiento energético de residuos:** Los costos de capital y de operación de plantas de aprovechamiento energético de residuos son altos y no se puede esperar que sean financiados en su totalidad mediante la venta de energía a precios del mercado únicamente.

*Elabore un pronóstico realista de los ingresos generados mediante la venta de energía y busque esquemas de financiamiento robustos adicionales.*

- » **El aprovechamiento energético de residuos requiere personal calificado:** Las plantas de aprovechamiento energético de residuos no son cajas negras fáciles de manejar para la generación de electricidad, gas, calor o vapor, sino tecnologías sofisticadas que requieren personal capacitado y mantenimiento regular.

*Asegúrese de que se pueda contratar y retener personal calificado, y que los empleados existentes reciban capacitación en forma regular. Para algunas tareas técnicas y gerenciales se deberá considerar la subcontratación.*

- » **El aprovechamiento energético de residuos es sólo una parte potencial de un sistema de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos funcional:** Las plantas de aprovechamiento energético de residuos nunca son elementos técnicos aislados y no resolverán problemas existentes de residuos por sí solas.

*Asegúrese de que una planta potencial de aprovechamiento energético de residuos forme parte integral de su sistema de gestión de residuos desde el proceso de planeación. También considere capacidad de respaldo y de contingencia.*

- » **Se deberá garantizar la seguridad legal de los inversionistas en sistemas de aprovechamiento energético de residuos:** El sector privado desempeña un papel vital en la construcción y operación de plantas de aprovechamiento energético de residuos. No obstante, los inversionistas privados invertirán únicamente si están seguros de generar ganancias con el servicio que ofrecen. En muchos países, el sector privado sigue siendo renuente a invertir a causa de los riesgos financieros asociados.

*Procure una atmósfera que garantice seguridad legal, basada en la transparencia y la confianza, y que se guíe por la visión de conjuntamente ofrecer a los ciudadanos un servicio sustentable para el manejo de residuos.*

- » **Las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos deben ser idóneas para países en vías de desarrollo:** Las experiencias con plantas de aprovechamiento energético de residuos están limitadas en los países en vías de desarrollo, y los pocos casos de éxito a menudo tienen que ver con la recolección de gases de relleno sanitario y con el coprocesamiento únicamente.

*Desconfíe si un agente de ventas le ofrece una tecnología avanzada de aprovechamiento energético de residuos para la cual no se dispone de un historial de operaciones comprobado en contextos similares al suyo.*

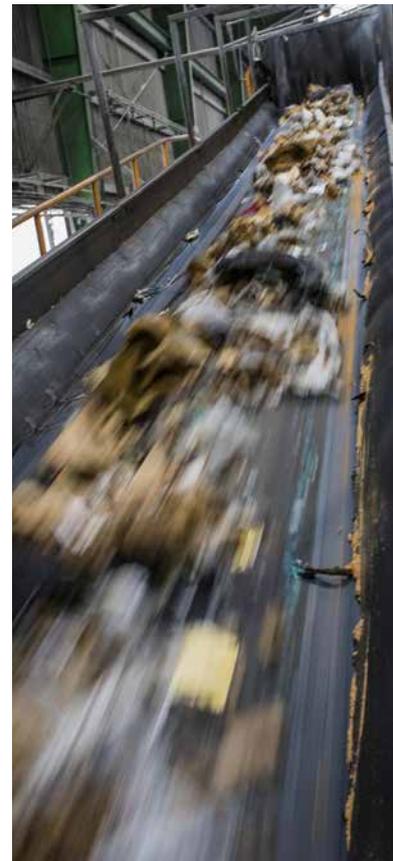
## Enfoque y estructura de la Guía

La presente guía se basa en la experiencia de agencias bilaterales y multilaterales de desarrollo, en la experiencia práctica de operadores de plantas y empresas privadas activas en el sector de la gestión de residuos sólidos municipales, y en información encontrada en la literatura. **Está dirigida a un amplio grupo de lectores:** políticos, responsables de la toma de decisiones y asesores a nivel nacional, regional y local, al igual que expertos en temas ambientales o miembros de Organizaciones No Gubernamentales (ONGs) comprometidos con la promoción del desarrollo urbano sustentable en países en vías de desarrollo y emergentes. Este documento será de interés también para empresas de ingeniería, operadores de planta y el público general.

El Capítulo 1 de introducción inicia con un panorama general sobre la gestión de residuos sólidos urbanos, y sobre el aprovechamiento energético de residuos en específico. El Capítulo 2 abarca las condiciones previas que se deben cumplir para considerar el aprovechamiento energético de residuos como una opción para el tratamiento de RSU. En el capítulo 3 se ofrece una explicación de cinco tecnologías de aprovechamiento energético de residuos: (a) incineración, (b) coprocesamiento, (c) digestión anaerobia, (d) gas de relleno sanitario y (e) tecnologías alternativas (pirólisis/gasificación). Finalmente, en el capítulo 4, una matriz para la toma de decisiones para las diferentes tecnologías indica los requisitos previos para cada tecnología antes de dar cualquier otro paso.

## Reconocimientos

El presente documento es una recopilación de información recolectada de diversas fuentes, en particular la experiencia de profesionales (autoridades de desarrollo, agencias de consultoría, proveedores de equipos, operadores de plantas de aprovechamiento energético de residuos) de países industrializados, en vías de desarrollo y emergentes. Agradecemos y reconocemos todas las contribuciones. Un agradecimiento especial también a los expertos que contribuyeron con sus valiosos comentarios durante la revisión de pares.



# 1. INTRODUCCIÓN

En muchos países, la gestión de residuos sólidos urbanos a menudo se ve como un servicio público de baja prioridad: una molestia y una carga. No obstante, la gestión insuficiente de residuos sólidos urbanos aparece con cada vez mayor frecuencia en la agenda política debido al incremento de problemas de salud y ambientales, y el descontento de un número creciente de ciudadanos cuya calidad de vida se ha visto afectada por la presencia de basura en espacios públicos. La relevancia de la gestión de residuos sólidos urbanos como un servicio público se ha descuidado, y su complejidad ha sido subestimada. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas<sup>1</sup> (ODS) así como la Nueva Agenda Urbana de ONE Hábitata<sup>2</sup> hacen un llamado para mejorar las prácticas de gestión de residuos como un servicio básico para los ciudadanos.

Gestores de residuos y responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes deberán responder ante estos nuevos retos y, en tiempos recientes, el aprovechamiento energético de residuos se ha venido considerando más y más como una solución a los problemas derivados del aumento de los volúmenes de residuos en las ciudades en expansión, así como de la creciente demanda energética. Sin embargo, el aprovechamiento energético de residuos por sí solo nunca podrá resolver los problemas; deberá formar parte de un sistema de gestión integral de residuos sólidos integral hecho a la medida, según las condiciones locales específicas con respecto a la composición de los residuos, su recolección y reciclado, el sector informal, retos ambientales, financiamiento, el precio de recursos y otros aspectos.

Este capítulo explica por qué es imperante mejorar la gestión de residuos urbanos en las ciudades, cómo la gestión de residuos sólidos urbanos embona en el concepto de una economía circular, y las percepciones erróneas y retos más frecuentes al hablar del aprovechamiento energético de residuos.

-----  
1 La Asamblea General de la ONU adoptó 17 ODSs el 25 de septiembre de 2015, ver <https://sustainabledevelopment.un.org/>

2 La Nueva Agenda Urbana fue adoptada en la Conferencia de la ONU sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III) del 17 al 20 de octubre de 2016 en Quito, Ecuador, ver <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda>



La creciente cantidad de residuos es un desafío pero también tiene un potencial para la recuperación de recursos.



Una planta de cemento en construcción.

## 1.1 Urbanización y nuevos retos en la gestión de residuos

### MENSAJE: EL SIGLO 21 SERÁ EL SIGLO DE LAS CIUDADES

El siglo 21 será el siglo de las ciudades. La población urbana del mundo ha crecido rápidamente desde 1950, aumentando de 746 millones a 3.9 mil millones de personas en el 2014 [2]. De acuerdo con datos de la ONU, se espera que esta cifra aumente a 9.7 mil millones para el 2050, con casi un 90 por ciento de incremento en centros urbanos de África y Asia.

Ya en nuestros días, el volumen global de residuos sólidos urbanos se estima en 2 mil millones de toneladas por año. A diferencia de las tendencias mundiales de población y urbanización, la ONU no cuenta con pronósticos sobre la generación de residuos per cápita en el futuro [1]. No obstante, existe un entendimiento común de que los volúmenes de residuos incrementarán en forma sustancial. Los motores detrás de dicho incremento son el consumo de bienes entre la población urbana creciente, cambios en estilos de vida, y la creciente riqueza de la clase media en ascenso. La Figura 1 ilustra el marcado crecimiento de volúmenes de residuos en zonas urbanas hasta el año 2050.

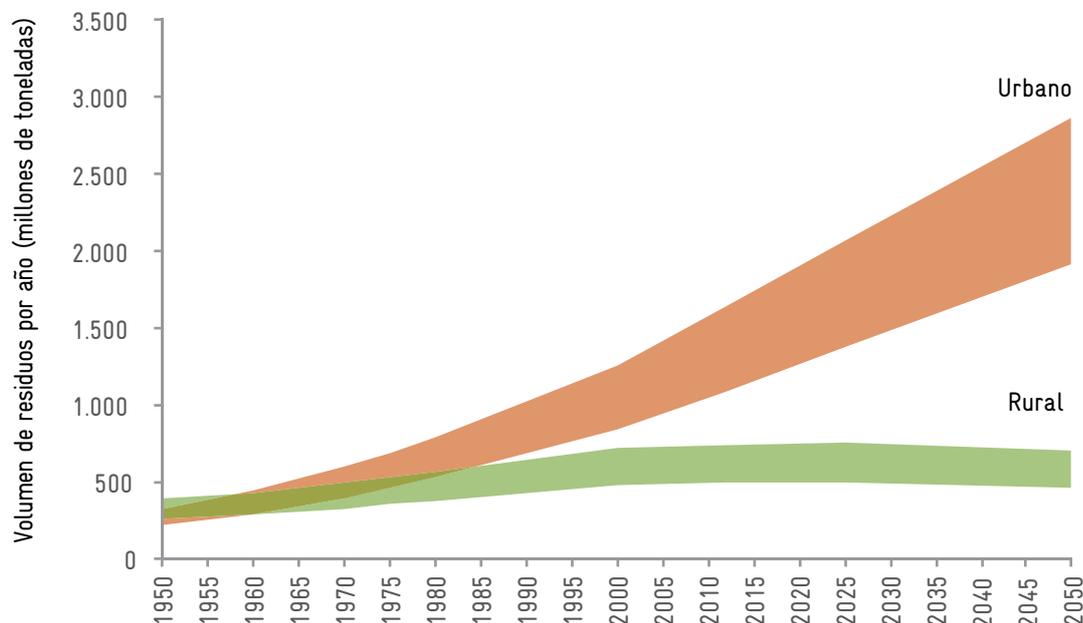


Figura 1: Proyección de la evolución del volumen de residuos urbanos y rurales del mundo 1950–2050. Basada en datos de la ONU [3] [4] [5] [6] y en una producción diaria de residuos por persona de entre 0.8 y 1.2kg en zonas urbanas y entre 0.4 y 0.6kg en zonas rurales.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, las tasas de generación de residuos se duplicarán en los próximos veinte años en países de bajos ingresos [7]. Independientemente de la precisión de estos pronósticos, estos enormes volúmenes de residuos representarán un tremendo reto para la mayoría de las autoridades urbanas locales que desde ahora ya están batallando con el manejo de volúmenes de residuos.

**MENSAJE: Los rellenos sanitarios son una solución intermedia o transicional, aunque necesaria, para el manejo de residuos. Sin embargo, no son el objetivo final de una gestión de residuos sustentable. Los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos deberán seguir priorizando el reciclado de materiales.**

Hasta la fecha, cerca del 70% de los RSU acaba en rellenos sanitarios o en vertederos no controlados, a menudo contaminando aguas superficiales, subterráneas o suelos, y emitiendo gases de efecto invernadero [8]. El desecho de residuos cerca de las zonas costeras y a lo largo de ríos representa un riesgo de contaminación marina con basura originada en la tierra. Los rellenos sanitarios ya no se consideran una tecnología de punta. A pesar de la existencia de excelentes ejemplos de gestión de rellenos sanitarios (RS) con una reducción sustancial de los impactos negativos sobre el medio ambiente, la búsqueda de nuevos sitios para rellenos sanitarios a menudo va de la mano con protestas públicas, y rara vez se dispone de espacio para generar nuevos sitios en la cercanía de áreas metropolitanas o centros urbanos; debido a la escasez de terrenos, de conflictos en el uso de suelo, y del rápido aumento de los precios de los terrenos. El tratamiento apropiado y la disposición de residuos siguen representando un importante reto, a menudo abrumador para numerosos municipios. La necesidad de incentivos para reducir la generación de residuos e incrementar el reciclado es indispensable. La separación de RSU en su punto de origen, su recolección, transporte, tratamiento y disposición apropiados se han convertido en un objetivo legal de muchos países en vías de desarrollo y emergentes. No obstante, y a pesar del buen avance en las últimas décadas en el reciclado de materiales “clásicos” como el papel, metales, vidrio o plástico, los niveles actuales de reciclado aún son insuficientes.

**MENSAJE: Para residuos específicos no reciclables, el aprovechamiento energético de residuos podría ser una alternativa viable para la gestión de los crecientes volúmenes de residuos en los próximos años si se cumple con los estándares ambientales y si se consideran los aspectos sociales con atención.**

## 1.2 Aprovechamiento energético de residuos: una tentación para los municipios

**MENSAJE: Atender el tema del aprovechamiento energético de residuos significa alcanzar un nuevo nivel de complejidad en una situación de gestión de residuos ya de por sí desafiante.**

El aumento de la preocupación con respecto a los recursos naturales limitados, la contribución de la gestión incorrecta de residuos al calentamiento global y la escasez de fuentes de generación eléctrica han desencadenado debates generales sobre los residuos como una fuente de recurso, y específicamente para el aprovechamiento energético de residuos. Los responsables de la toma de decisiones a nivel nacional y local en países de vías de desarrollo y emergentes, podrán verse tentados por proveedores de tecnologías que prometen que las plantas de aprovechamiento energético de residuos resolverán sus problemas de disposición final de desechos, crearán oportunidades de negocios lucrativos y contribuirán en forma positiva al suministro de energía. Como tal, los residuos parecen ser un sustrato ideal para la recuperación energética. Hasta ahora, sin embargo, sólo un número limitado de proyectos implementados en países en vías de desarrollo y emergentes ha sido operado con éxito en el largo plazo.

Algunas experiencias positivas hasta la fecha están relacionadas con el coprocesamiento con tecnología de punta en hornos cementeros y la recolección de gases de relleno sanitario. No obstante, actualmente casi no existen digestores anaeróbicos alimentados con RSU orgánicos separados en operaciones exitosas a gran escala en países en vías de desarrollo, ni tampoco hay más de un número reducido de incineradores de basura operando en forma continua en países en vías de desarrollo en África o Asia. Las tecnologías alternativas como la pirólisis y la gasificación nunca pasaron más allá de la escala piloto (ni siquiera en países industrializados) para fracciones de RSU mixtas.

Las condiciones marco en la mayoría de los países en vías de desarrollo y emergentes son en esencia diferentes de los que han visto el surgimiento y aplicación exitosa de proyectos de aprovechamiento energético de residuos en Europa, Norteamérica, Japón y China, donde las plantas de aprovechamiento energético de residuos del tamaño de compañías de servicios son cada vez más comunes. Una simple transferencia de tecnología a menudo no tiene éxito porque no satisface las condiciones de países en vías de desarrollo y emergentes, en especial en términos de requisitos financieros, la composición de los materiales y las capacidades locales. No obstante, las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos pueden mejorar la gestión de residuos en las ciudades de rápido crecimiento de países en vías de desarrollo y emergentes, pero su aplicación es compleja y debe considerar, entre otras, las siguientes circunstancias específicas:

- » Menor poder calorífico de los RSU que en países industrializados debido al alto contenido de humedad (alto contenido orgánico) y contenido mineral en los residuos (ej. cenizas, residuos de construcción y demolición);
- » Cambios estacionales sustanciales en la composición de los residuos (patrones de consumo cambiantes durante temporadas festivas, cosechas estacionales);
- » Práctica limitada de separación de residuos en el punto de origen, una condición previa para la digestión anaerobia;
- » Modelos de negocios y de operación endebles;
- » Falta de conocimiento sobre cómo operar y dar mantenimiento a plantas de aprovechamiento energético de residuos;
- » Altos costos de inversión y operación que no se pueden recuperar mediante las tarifas existentes y los ingresos adicionales generados de la venta de energía únicamente;
- » Atención a los problemas relacionados con el sustento de las personas marginadas y trabajadores del sector informal dependientes de la disponibilidad de materiales reciclables en los residuos;
- » Falta de monitoreo e insuficiente aplicación de estándares ambientales, que resulta en problemas de salud pública.



La separación de materiales reciclables es importante para lograr la economía circular.

## 1.3 Aprovechamiento energético de residuos y la economía circular

La visión enfocada en transitar hacia una economía circular tiene como propósito reemplazar la economía actualmente lineal de ‘tomar, usar y desechar’, con otra en la que los recursos circulan a valores altos, evitando o reduciendo la necesidad de recursos primarios y minimizando residuos, contaminantes y emisiones. Los motores principales de la economía circular son la creciente volatilidad de precios y las restricciones en el suministro de recursos primarios, las políticas ambientales, tales como la normatividad sobre responsabilidades del productor y, posiblemente una nueva cultura del consumidor. La Figura 2 muestra el principio de la economía circular desarrollado por la Fundación Ellen MacArthur [9]. La economía lineal atraviesa el centro, mientras que los círculos interiores representan las acciones que se pueden tomar para que los flujos de materiales sean más circulares con respecto a los residuos orgánicos e inorgánicos.

**MENSAJE: El objetivo de un sistema moderno para la gestión de residuos no es la disposición o eliminación de productos residuales, sino ofrecer a la economía materias primas secundarias y energía generadas a partir de estos residuos.**

Ya en nuestros días, muchos países tienen la intención de desarrollar su estrategia nacional para la gestión integral de residuos, basadas en el concepto de las 3Rs (como elemento integral de la economía circular), es decir “reducir, reutilizar y reciclar”:

### 1. Reducir:

La principal prioridad en la gestión de residuos debe ser la reducción general del volumen de residuos sólidos, es decir residuos alimentarios, empaques, y el desperdicio innecesario de materias primas y de energía durante procesos de producción. Reducir los residuos también reduce el costo de la recolección y tratamiento de los mismos.

### 2. Reutilizar:

La segunda prioridad debe ser la reutilización de materiales, es decir, la limpieza y reparación de un producto desechado para que se pueda volver a utilizar.

### 3. Reciclar:

La tercera prioridad en el concepto de las 3Rs es el reciclado de materiales, es decir la recolección de residuos y su transformación en materias primas secundarias. El reciclado de plástico o de papel por ejemplo puede ahorrar más energía en la manufactura de productos que la energía que se puede producir en plantas de aprovechamiento energético de residuos a partir de dichos materiales.

Las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de residuos desempeñan diferentes papeles dentro de la economía circular; y se indican en la Figura 2. Incluso con un reciclado intensivo, siempre habrá residuos remanentes que no tienen valor material o de mercado y que, en algunos casos, se clasifican como peligrosos. Estos residuos con cierto poder calorífico se pueden aprovechar para recuperar energía y sustituir el uso de combustibles fósiles. Un tratamiento térmico, como la incineración o el coprocesamiento, que cumpla con los estándares de emisiones ambientales, también puede jugar un papel en la destrucción de sustancias orgánicas tóxicas y su eliminación del flujo circular de materiales. Algunas materias valiosas, como los metales, se pueden recuperar de las escorias o cenizas remanentes del proceso de incineración; sin embargo, el resto debe ser tratado en forma independiente y disponerse en un relleno sanitario seguro. Si la fracción orgánica se pueden separar en forma eficiente de la fracción inorgánica, la digestión anaerobia también puede desempeñar un papel importante en la recuperación de biogás y composta en el ciclo biológico. La recolección de gases de un relleno sanitario permite la mitigación de metano liberado de los residuos orgánicos enviados a dichos rellenos sanitarios.

**MENSAJE: Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos no deben competir con las medidas para su reducción, ni con las medidas de reutilización eficientes en términos de costo y el reciclado de materiales. El aprovechamiento energético de residuos es una tecnología complementaria para el tratamiento de fracciones de RSU remanentes no reciclables.**

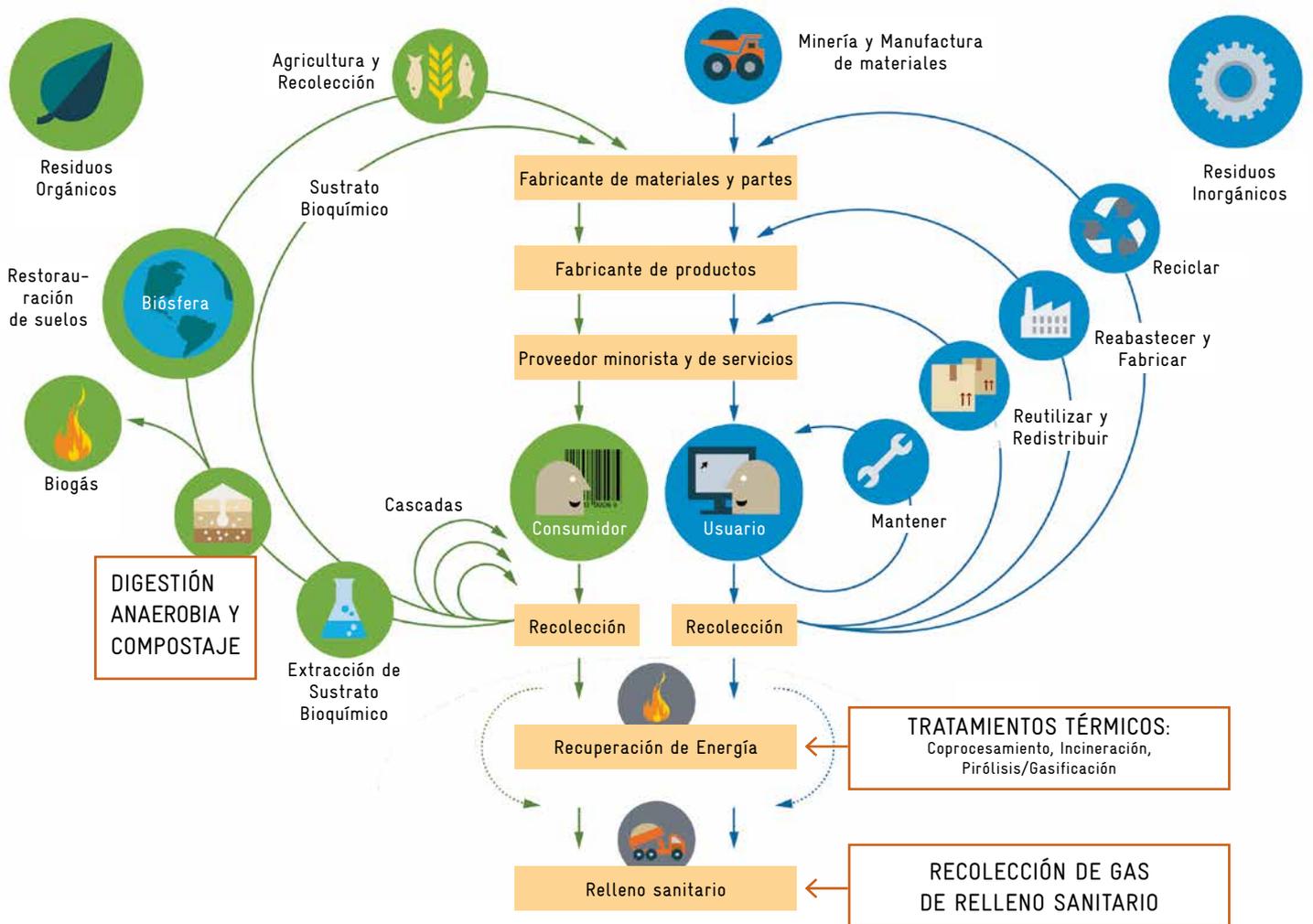


Figura 2: El principio de la Economía Circular. El papel de las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos discutidas en esta guía se indica en los recuadros. Fuente: Fundación Ellen MacArthur [9].

## 1.4 Mitos acerca del aprovechamiento energético de residuos

La recuperación energética de RSU desempeña un papel en la economía circular al utilizarse para fracciones de residuos peligrosos y no reciclables, respetando los estándares ambientales y considerando los aspectos sociales. No obstante, su integración en países en vías de desarrollo y emergentes sigue en las etapas iniciales. Algunas compañías ofrecen opciones responsables, pero muchos debates sobre el tema pueden estar sesgados y ser poco transparentes. Es importante estar conscientes de los mitos más comunes que persisten acerca del aprovechamiento energético de residuos, que las empresas sin experiencia buscando aprovecharse de los municipios pueden usar como recurso:

### *Mito # 1: “El aprovechamiento energético de residuos es una solución fácil para deshacerse de los problemas de los residuos de una ciudad”*

La situación es mucho más compleja, y el aprovechamiento energético de residuos requiere planeación, construcción y operación profesionales. Desafortunadamente, hay varias compañías en el mercado que no cuentan con experiencia en las condiciones de los países en vías de desarrollo y emergentes. Los responsables de la toma de decisiones deben tener conciencia de que su objetivo es, en primer lugar, “vender” su producto y no resolver el problema local.

### *Mito # 2: “Una planta de aprovechamiento energético de residuos se financia sola y únicamente mediante la venta de la energía que recupera”*

En Europa, donde el poder calorífico de los residuos y los precios de energía son más altos, los ingresos de la venta no subsidiada de energía (en la forma de calor y electricidad) pueden llegar a cubrir los costos operativos, pero nunca la inversión total y los costos de capital.

### *Mito # 3: “Una planta de aprovechamiento energético de residuos en operación es capaz de cubrir una gran fracción de la demanda de energía de una ciudad”*

En realidad, la energía de los residuos domésticos sólo podrá contribuir con una pequeña fracción a cubrir la demanda de energía total de una ciudad (~ 5%). El uso del calor generado es la aplicación más eficiente en Europa, pero rara vez se utiliza en países en vías de desarrollo.

### *Mito # 4: “La basura se puede convertir en oro; incluso los residuos mezclados se pueden vender con ganancia para la recuperación de energía y materiales”*

En realidad, el aprovechamiento energético de residuos no es un modelo de negocios que genera ingresos que cubren todos los costos. Los ingresos de la venta de energía ayudan a cubrir parte del costo general del tratamiento térmico, pero se requiere el pago de tarifas adicionales y otras formas de ingresos para cubrir la totalidad de costos. En todos los países, la gestión de residuos como un todo representa costos y no se puede considerar un negocio rentable que pudiera depender exclusivamente de la venta de energía, de Combustibles Derivados de Residuos (CDR) y materiales de reciclado a los precios actuales de dichos productos.

### *Mito # 5: “Compañías internacionales calificadas y con experiencia están haciendo fila para invertir y operar plantas de aprovechamiento energético de residuos en países en vías de desarrollo y emergentes a riesgo propio”*

Esto es correcto sólo en parte ya que las compañías internacionales con experiencia actualmente se muestran renuentes a invertir en proyectos de aprovechamiento energético de residuos en países en vías de desarrollo y emergentes. Los riesgos legales, financieros y reputacionales son altos, y cualquier proyecto del sector privado tiene que ser bancable.

Estos mitos se mantienen vivos y pueden llegar a obstaculizar los debates informados. La presente guía busca ofrecer una orientación integral a los responsables de la toma de decisiones para abordar en forma realista estos mitos. Una herramienta adicional útil para asistir a los planeadores en la evaluación de la calidad de una oferta técnica y financiera para una planta de aprovechamiento energético de residuos fue desarrollada por el Grupo Colaborativo de Trabajo para la Gestión de Residuos Sólidos en Países de Ingreso Bajo y Mediano, y se le conoce como CWG Waste to Energy Rapid Assessment Tool, 2016 [10]. La herramienta está disponible en línea.

## 2. CONDICIONES PREVIAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

Este capítulo aborda el tema de las condiciones básicas para considerar el aprovechamiento energético de residuos como una opción viable para complementar un sistema de gestión de RSU ya existente. El aprovechamiento energético de residuos no se puede considerar una opción aislada de tecnologías, sino que debe embonar en un concepto de gestión de residuos sólidos integral, en donde la opción preferida es evitar la generación de residuos y reciclar los materiales. Los sub-capítulos abordan las diferentes situaciones, describen los requisitos técnicos y operativos mínimos, y ofrecen un panorama de las condiciones del marco ambiental, legal y económico.

### 2.1 Características de los residuos urbanos

Un ciudadano urbano de un país en vías de desarrollo o emergente genera, en promedio, entre 100 y 400 kg de RSU por año (ver la Figura 3). Los motivos de este amplio rango y de la gran incertidumbre se deben a los diferentes niveles de desarrollo económico y consumo, así como a la estimación del volumen de residuos generados. Algunas estadísticas utilizan el total estimado de residuos generados per cápita, incluyendo los materiales reciclados. Otras sólo consideran los residuos gestionados por las autoridades locales en cuestión, y excluyen por ejemplo los materiales valiosos separados y recolectados en los puntos de origen por parte del sector informal. A menudo, la recolección separada de reciclables, como botellas de vidrio, periódicos, PET o latas se hace antes de que éstos lleguen al flujo formal de residuos, responsabilidad del municipio. Como consecuencia, los municipios deben hacerse cargo de una fracción “remanente” de residuos caracterizada por una alta heterogeneidad, alto contenido orgánico y un bajo poder calorífico. Estas incertidumbres en términos de cantidad y calidad deben ser cuidadosamente consideradas al planear soluciones de aprovechamiento energético de residuos, así como su impacto social sobre el sector informal cuando se tiene la intención de aplicar un cambio en un sistema de reciclado y recolección primaria específico.

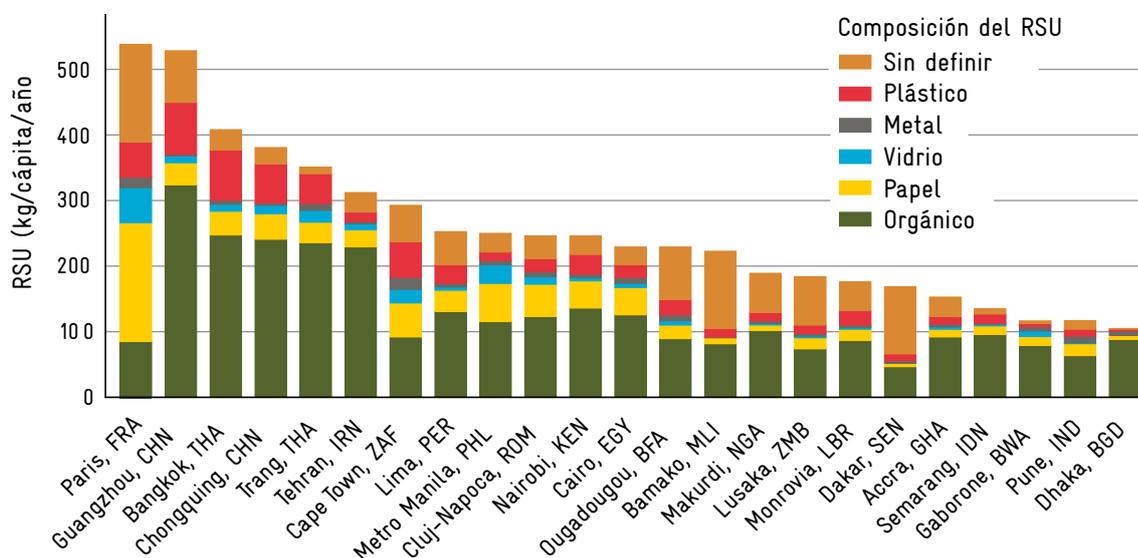


Figura 3: Composición de RSU per cápita (kg/cápita/año) en varias ciudades del mundo [11].

En la mayoría de los países en vías de desarrollo, los residuos orgánicos con alto contenido de humedad son la fracción más relevante que acaba en el flujo formal de residuos y requiere tratamiento. En ciudades con intensa actividad de construcción que no tienen sistemas de separación para residuos de construcción y demolición, los RSU contienen una importante fracción de materiales inertes.

**MENSAJE:** Los residuos sólidos urbanos mezclados en países en vías de desarrollo son por naturaleza diferentes de los RSU de países industrializados y tienen características específicas en cada ciudad. Esta diversidad se debe tomar en cuenta en la evaluación de tecnologías.



Los residuos orgánicos son a menudo la mayor fracción de residuos en la ciudades en desarrollo.

## 2.2 Marco legal e impactos ambientales

La gestión de residuos en general y el aprovechamiento energético de residuos en específico, deben estar cubiertos por un marco regulatorio y legal implementado y aplicado en forma efectiva. Se requiere un marco legal por diversas razones: en primer lugar, la ley garantiza certidumbre legal. Los grupos de interés relevantes – autoridades administrativas, generadores de residuos, compañías de tratamiento y disposición final, ciudadanos etc. – deben conocer exactamente cuáles son sus funciones y obligaciones. Únicamente reglas detalladas legalmente vinculantes pueden ofrecer un marco apropiado para lograr estos objetivos. La legitimidad de las acciones administrativas también depende de las normas legales. Además, los estándares de emisión y otras regulaciones ambientales para el aprovechamiento energético de residuos, requieren fundamentos legales y un control regular por parte de autoridades públicas calificadas y bien equipadas.

La legislación del marco ambiental y las leyes nacionales de residuos deberán determinar los objetivos y las reglas fundamentales de las actividades de aprovechamiento energético de residuos para RSU, incluyendo el principio de control de emisiones. En particular, deberán contener:

- » **Planeación y licitaciones:** En la planeación de nuevas infraestructuras por lo general se consideran estándares nacionales. Sin embargo, al considerar opciones de aprovechamiento energético de residuos, se recomienda la aplicación de estándares de emisión y seguridad internacionalmente reconocidos para el proceso de licitación con el fin de minimizar los riesgos para los responsables de la toma de decisiones.
- » **Obligaciones de operadores:** La legislación debe requerir que las instalaciones para el aprovechamiento energético de residuos estén sujetas a una evaluación de impacto ambiental y permisos bajo las leyes nacionales sobre control de emisiones y/o residuos.
- » **Requisitos previos para los permisos:** En términos generales, la ley debe establecer las obligaciones de los operadores de plantas para garantizar que no habrá efectos dañinos sobre el medio ambiente ni otros peligros, desventajas relevantes y afecciones significativas al público general, comunidades aledañas o las infraestructuras circundantes a causa de dichas instalaciones.
- » **Estándares ambientales y de seguridad:** Los umbrales de emisiones y los requisitos de seguridad deben ser controlados con base en estándares legalmente vinculantes. Los valores de los límites de emisiones impuestos sobre plantas de aprovechamiento energético de residuos deben cumplir con normas de reconocimiento y aplicación internacional. La aplicación de estándares ambientales demasiado bajos e insuficientes resultará en riesgos adicionales para la salud pública y en costos ambientales.

- » **Monitoreo del cumplimiento de estándares ambientales y de seguridad:** El monitoreo es la responsabilidad principal de una autoridad reguladora competente e independiente. Las leyes nacionales deben definir normas sobre la calidad de aire y asegurar su cumplimiento en la cercanía de instalaciones de aprovechamiento energético de residuos.

**MENSAJE:** En muchos países, el marco legal para el aprovechamiento energético de residuos, incluyendo diseño, operación y monitoreo, es débil o incluso inexistente. Se debe asegurar la existencia de un marco legal aplicable, y su aplicación debe formar parte del proceso de desarrollo incluso antes de considerar la construcción y operación de una planta de aprovechamiento energético de residuos.

En la mayoría de los países en vías de desarrollo y emergentes, existe una legislación ambiental. Sin embargo, la regulación de plantas de aprovechamiento energético de residuos es inexistente en muchos casos, o bien es muy general y no ofrece el marco legal necesario para diseño y aprobación, ni para operación y monitoreo. Esto aplica también al proceso de implementación, en donde en la mayoría de los casos no se dispone de personal calificado ni de recursos financieros para esta tarea. Si no existe un marco legal, las experiencias de países industrializados podrían servir como referencia para su desarrollo. Por ejemplo, la Directiva Europea sobre Emisiones Industriales (2010/75/EU) [12]) pudiera servir de ejemplo para la definición de los límites de emisiones de actividades de incineración.

## 2.3 Aspectos financieros e institucionales de las plantas para el aprovechamiento energético de residuos

**MENSAJE:** Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos son costosos y constituyen un riesgo financiero sustancial para los municipios. La evaluación independiente de costos y el profundo entendimiento de las implicaciones financieras son cruciales para la toma de decisiones.

Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos requieren altas inversiones no sólo para el proceso de tratamiento mismo sino también para la mitigación de los riesgos operativos (accidentes, incendios, etc.). Los costos de operación y mantenimiento (OyM) de las plantas de aprovechamiento energético de residuos son considerablemente mayores que los costos de rellenos sanitarios. El financiamiento asegurado y permanente es clave para cualquier sistema de gestión de RSU funcional. El municipio debe asegurar que los requerimientos financieros se podrán satisfacer. Como esto no siempre es posible mediante las tarifas pagadas por los residuos, se deberán considerar otras alternativas de financiamiento adicionales. Las siguientes opciones son ejemplos de fuentes de generación de ingresos:

- » Cobro directo de cuotas por residuos a los ciudadanos;
- » Financiamiento cruzado de servicios de RSU a través de otras cuotas o impuestos locales;
- » Régimen de tarifas cuando los residuos se entregan en una planta;
- » Ingresos de la venta de material reciclado y energía recuperada (electricidad, calor/vapor);
- » Subsidios locales o nacionales;
- » Ingresos de fondos de carbono nacionales o internacionales (ej. Green Climate Fund);
- » Reembolsos fiscales y la aplicación de tarifas de alimentación especiales por la electricidad producida a partir de fuentes no convencionales, como materiales de residuos.

En especial las dos últimas opciones deberían abordarse con sumo cuidado ya que tienen el potencial de ofrecer cierta garantía a largo plazo al municipio o un inversionista privado.

**MENSAJE:** Un concepto financiero, social y técnico sólido que permite la operación de un proyecto de aprovechamiento energético de residuos para cubrir los costos, al igual que un arreglo institucional adecuado son requisitos previos y clave para el manejo sustentable de cualquier sistema de gestión integral de residuos sólidos.

### 3. OPCIONES DE TECNOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

Este capítulo ofrece un panorama de cinco tecnologías de aprovechamiento energético de residuos a escala municipal (ver la Figura 4): incineración, coprocesamiento, digestión anaerobia (DA), gas de relleno sanitario (GRS) y pirólisis/gasificación (de aquí en adelante también llamadas tecnologías alternativas). Aunque los principios generales de los dos capítulos anteriores apliquen también a ellas, estas cinco tecnologías tienen diferentes funciones y aplicaciones en el sistema de gestión de residuos urbanos. El orden de las tecnologías se basa en la demanda de asesoría percibida en dichas tecnologías, y no implica prioridad o aplicabilidad alguna.

Se ofrece información técnica general sobre cada tecnología, seguida por una lista de los tipos de residuos idóneos para cada una, y un resumen de los aspectos operativos, ambientales, legales y financieros relacionados. El lector adquirirá un entendimiento básico de cuál de las tecnologías es más apropiada para el tipo de residuos, y sus implicaciones ecológicas, legales y financieras.

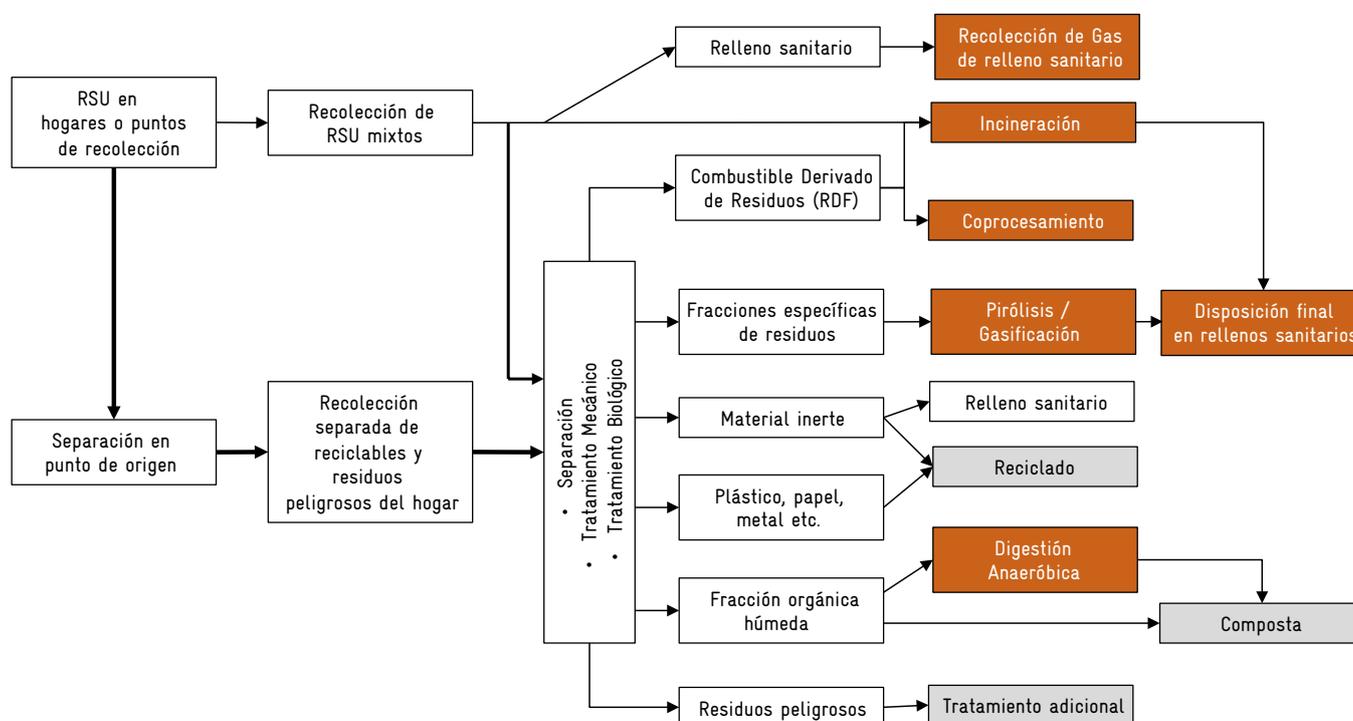


Figura 4: Panorama del flujo de materiales de los RSU y sus diferentes opciones de utilización y tratamiento. La recolección de flujos de residuos separados hace que la utilización de los diferentes tratamientos sea más viable.

Existen artículos publicados por diversos grupos de interés, describiendo en detalle las diferencias básicas y los aspectos específicos de tecnologías de aprovechamiento energético de residuos (ver las referencias y las secciones sobre literatura adicional). Algunos incluyen también un análisis de los requisitos previos, tales como aspectos de mercado, políticas, regulatorios, y de sustentabilidad financiera. Estos documentos son una fuente invaluable de información, en especial para expertos técnicos y agentes de implementación. No obstante, muchos de los documentos suponen que las condiciones previas son fáciles de cumplir (ej. pago obligatorio de cargos por el manejo de residuos, recolección separada cercana al 100% de residuos orgánicos en la puerta de las casas o la existencia del marco legal requerido), y los riesgos de la implementación en contextos locales a menudo no reciben la atención necesaria.

## 3.1 Incineración de residuos sólidos urbanos

La incineración de residuos sólidos urbanos (IRSU) es la quema de residuos en un proceso controlado dentro de instalaciones específicas construidas para tal propósito. El objetivo principal de la IRSU es reducir el volumen y la masa de RSU, y convertirlos químicamente en materiales inertes en un proceso de combustión sin la necesidad de agregar combustible adicional (combustión autotérmica). Como efecto secundario, también permite la recuperación de energía, minerales y metales del flujo de residuos [13]. Siempre existe un 25% de residuos de la incineración en la forma de escoria (ceniza de fondo) y cenizas volantes. La ceniza de fondo consiste de partículas finas que caen al fondo del incinerador durante la combustión, mientras que las cenizas volantes hacen referencia a las partículas finas en los gases de escape que deben ser eliminadas mediante un tratamiento del gas de combustión. Estos residuos requieren atención adicional y, en el caso de cenizas volantes peligrosas, un lugar seguro para su disposición final.

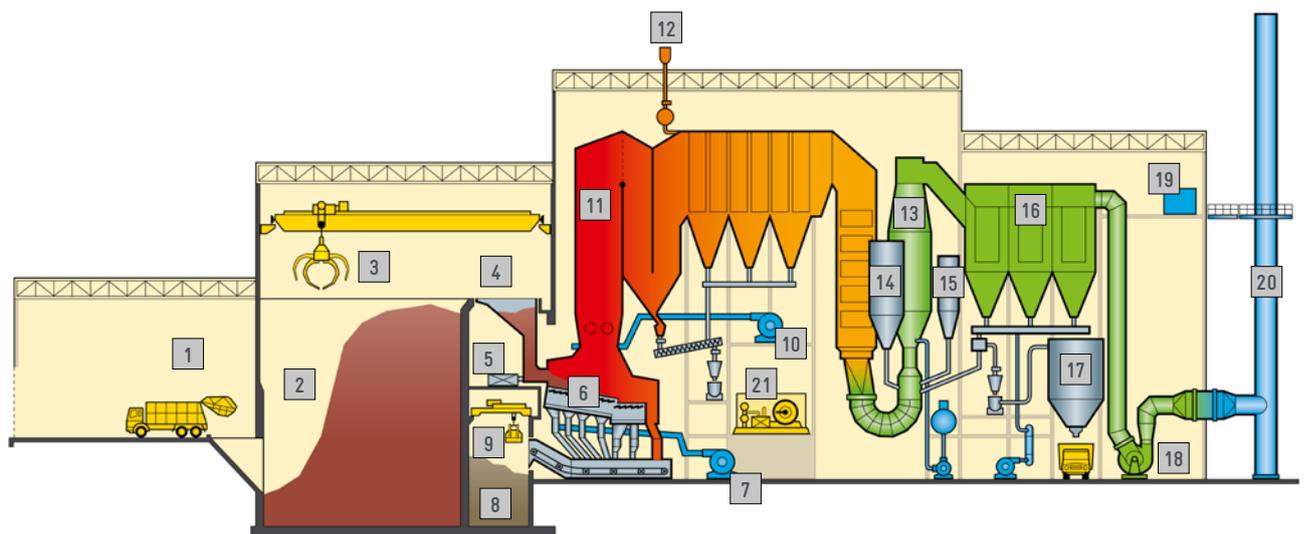
### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Los materiales combustibles en los residuos se queman al alcanzar la temperatura de ignición necesaria y entrar en contacto con oxígeno, sufriendo una reacción de oxidación. La temperatura de la reacción está entre 850°C y 1,450°C, y el proceso de combustión ocurre en la fase gaseosa y sólida, liberando simultáneamente energía térmica. Se requiere un poder calorífico mínimo de los residuos para permitir la reacción térmica en cadena y la combustión auto-sostenible (llamada combustión autotérmica), es decir, no hay necesidad de agregar otros combustibles.

Durante la incineración se generan gases de escape que, después de su limpieza, se liberan a la atmósfera a través de una tubería y canal llamado conducto. Estos gases de combustión contienen la mayor parte de la energía disponible de los combustibles en la forma de calor, al igual que polvos y contaminantes gaseosos del aire que deben eliminarse mediante un proceso de purificación del gas de combustión. El calor excesivo de la combustión se puede usar para generar vapor y producir electricidad, para calentamiento/enfriamiento por redes o para suministrar vapor a procesos industriales cercanos (los componentes de una IRSU están ilustrados en la Figura 5). Plantas que utilizan la cogeneración de energía térmica (calentamiento y enfriamiento) junto con la generación de electricidad pueden alcanzar eficiencias óptimas de un 80%, mientras que la generación de electricidad por sí sola únicamente alcanzará eficiencias máximas de tan solo 20%.



Una planta de incineración de residuos sólidos municipales en Europa.



ENTREGA DE RESIDUOS	INCINERACIÓN	LIMPIEZA DEL GAS DE COMBUSTIÓN	RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
1 Cuarto de vertido	5 Alimentador	13 Reactor-gas de comb.	21 Turbina de vapor / generador
2 Depósito de residuos	6 Parrilla de incineración	14 Cal hidratada	
3 Grúa de residuos	7 Ventilador primario	15 Carbón activado	
4 Tolva de alimentación	8 Depósito ceniza inf.	16 Filtro	
	9 Grúa ceniza inf.	17 Silo (ceniza volante)	
	10 Ventilador secundario	18 Ventilador ID	
	11 Caldera de vapor	19 Sistema de Monitoreo de Emisiones (CEMS)	
	12 Válvula de seguridad de la caldera	20 Chimenea	

Figura 5: Componentes de una planta de incineración de RSU con limpieza de gases de combustión vía húmeda. Las figuras en los camiones están en [14].

### 3.1.2 FRACCIONES IDÓNEAS DE RESIDUOS

La IRSU está diseñada para el tratamiento de volúmenes de residuos domésticos típicamente mezclados y sin tratar, y de algunos tipos de residuos industriales y comerciales. Un parámetro clave es el contenido de energía, conocido como poder calorífico inferior (PCI) en MJ/kg. Para asegurar la combustión autotérmica del residuo, el PCI no debería ser menor a 7 MJ/kg en promedio a lo largo de un año [15] (para fines de comparación: El PCI de 1 kg de combustóleo es acerca de aproximadamente 40 MJ/kg-). En países en vías de desarrollo, el PCI de los RSU no separados a menudo está por debajo de este umbral debido al predominio del contenido orgánico con altos niveles de humedad y un importante nivel de fracciones de residuos inertes, tales como cenizas o arenas.

La separación previa de reciclables ejerce una influencia sobre las características del residuo remanente, tal como se presenta en la Tabla 1 a continuación.

Fracción removida	Impactos principales de la remoción sobre los residuos remanentes
Vidrio, metales, ceniza, minerales de residuos de construcción y demolición	Mayor valor calorífico Menor cantidad de escoria y metales recuperables
Papel, cartón y plástico	Disminución del poder calorífico Disminución de las cargas de cloro (por ej. del PVC) en las emisiones
Residuos orgánicos de cocina y jardín	Menores cargas de humedad Mayor poder calorífico
Residuos voluminosos	Menor esfuerzo para triturar los residuos
Residuos peligrosos (ej. baterías, dispositivos electrónicos)	Menor esfuerzo para remover metales pesados volátiles tóxicos de las emisiones al aire (ej. mercurio) Reducción en la concentración de contaminantes tóxicos en escorias y cenizas volantes (ej. cadmio, plomo, zinc)

Tabla 1: Influencias de la separación previa de reciclables sobre la incineración.

### 3.1.3 ASPECTOS OPERATIVOS

Las operaciones altamente complejas de IRSU requieren habilidades técnicas y gerenciales bien desarrolladas. Es mucho más compleja que la operación de un relleno sanitario. Los requerimientos son: una cadena de suministro de RSU continua, una mezcla de residuos homogenizada que se alimenta en forma continua a la cámara de combustión, parámetros de proceso y de emisiones ajustados y controlados, mantenimiento programado, la compra de material auxiliar y refacciones, suministro de energía garantizado a clientes directos, gestión de la disposición o el uso posterior de los residuos del proceso, etc. La seguridad y salud operativa debe estar bien desarrollada y se debe mantener contacto frecuente con autoridades ambientales, el municipio, comunidades locales, la sociedad civil y otros actores. Ubicar las operaciones de IRSU en lugares donde el uso de energía térmica (calefacción o enfriamiento) o de la electricidad generada se pueda asegurar durante todo el año, es un factor importante que incrementa la probabilidad de ingresos confiables. Por este motivo, las plantas de IRSU deben ubicarse en parques industriales, a poca distancia de las fuentes de residuos.

Únicamente gerentes, ingenieros y técnicos con capacidad y experiencia comprobadas, deberán ser asignados a funciones clave. Si el personal calificado no está disponibles a nivel local, se deberán contactar expertos internacionales a largo plazo y se deberá realizar un programa de desarrollo de capacidades.

### 3.1.4 ASPECTOS AMBIENTALES

Uno de los objetivos de la IRSU es contribuir a la reducción general del impacto ambiental, que de otra forma podría resultar de vertederos no controlados, la quema a cielo abierto o el uso de rellenos sanitarios para los residuos. La reducción del volumen de residuos mediante la incineración ayuda a ahorrar los escasos espacios valiosos en los rellenos sanitarios y a proteger el medio ambiente. Una fracción de la energía recuperada se puede considerar carbono neutral, debido al contenido de biomasa del RSU. Sin embargo, las instalaciones de IRSU también generan grandes cantidades de gases de combustión que deberán ser tratados, incluso cuando la incineración haya ocurrido bajo óptimas condiciones de combustión. Para evitar riesgos irreversibles a la salud de las comunidades locales y al medio ambiente, el cumplimiento con estándares de emisión internacionales es esencial y se debe garantizar el monitoreo y reporte continuo de emisiones. Los contaminantes en gases de combustión toman la forma de polvos y gases, como el ácido clorhídrico (HCl), el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Ciertos compuestos que contienen mercurio, dioxinas o dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), sólo se pueden eliminar mediante procesos químicos avanzados, que aumentan los costos del proyecto en forma sustancial. Los principales aspectos ambientales a atender son [13]:

- » Control y monitoreo de las emisiones del proceso al aire y al agua (incluyendo olores);
- » Calidad y potencial de uso de la escoria generada (ej. niveles de contaminación por metales pesados);
- » Eliminación segura o reciclado de residuos de cenizas volantes peligrosas;
- » Ruido y vibración del proceso;
- » Consumo de agua y otras materias primas (reactivos);
- » Emisiones fugitivas – principalmente del almacenamiento de residuos;
- » Riesgos de almacenamiento/manejo/procesamiento de residuos peligrosos.

### 3.1.5 ASPECTOS LEGALES

Es de suponer que la legislación ambiental en la mayoría de los países en vías de desarrollo y emergentes no aborda el tema de la aplicación de tecnologías de incineración de RSU en forma explícita. Ello complica y demora todo el proceso de la evaluación de impactos y el otorgamiento de licencias de operación. De no disponer de normas integrales y legalmente vinculantes, primero se les deberá desarrollar para aplicarlas y después se deberán seguir las normas reconocidas a nivel internacional. Un ejemplo para la orientación podría ser la Directiva Europea sobre la incineración de residuos (Directiva sobre Emisiones Industriales 2010/75/ EU, [12]). También se requiere una buena capacidad de monitoreo y aplicación al nivel de instituciones públicas.

### 3.1.6 ASPECTOS ECONÓMICOS

La IRSU requiere una importante inversión de capital y debe estar respaldada por una planeación financiera a largo plazo, y suficientes recursos como para garantizar la operación y mantenimiento continuos de la planta. En países en vías de desarrollo, puede haber fondos disponibles para la inversión inicial, sin embargo, los recursos financieros para la fase de operación a menudo no están contemplados en cantidades suficientes. Para comparar y evaluar la viabilidad financiera de la operación de una planta de IRSU, se deben anualizar los costos de inversión y los costos operativos esperados. Para el cálculo del costo neto, los ingresos anuales por la venta de energía de materiales se pueden restar de los costos anualizados de inversión de capital y costos operativos, para obtener un costo general por tonelada de residuo basado en el volumen de residuos tratados al año. Un ejemplo de dicho estimado se muestra en la Tabla 2 para una planta de IRSU con la capacidad de tratar 150,000 toneladas métricas de residuos al año. La tabla muestra que los ingresos de mercado de las ventas de energía y materiales únicamente no cubrirán el costo anual completo de la planta, y los costos netos esperado de 40 a 80 EUR por tonelada métrica de residuo deben ser cubiertos por otros medios de financiamiento. Se requieren ingresos adicionales de tarifas, subsidios públicos u otros fondos para asegurar la cobertura de los costos totales y el financiamiento de las operaciones en forma sostenible en el largo plazo.

Se debe entender que las soluciones de incineración generan costos de tratamiento de residuos mayores que los rellenos sanitarios utilizados con anterioridad, lo cual impulsa a los generadores de residuos a optar por la opción de disposición actual. Mientras que los costos estimados están relativamente bien definidos para países industrializados, resulta difícil ofrecer información representativa sobre costos en el contexto de países en vías de desarrollo. Los costos de inversión y operación en la tabla 2 son cifras aproximadas derivadas de diversas fuentes globales, por lo que deberían tomarse únicamente como una orientación.

**Los riesgos de las plantas de IRSU de bajo costo:** Los altos costos de la inversión inicial tienden a ser una barrera importante para los proyectos de IRSU en países en vías de desarrollo. Se han hecho intentos para lanzar proyectos de IRSU de menor costo en el mercado con un estándar técnico básico para países de bajos ingresos, pero hasta la fecha la experiencia en estas soluciones es muy limitada, y sigue en veremos si estas plantas logran cumplir con los estándares técnicos y de emisiones en forma exitosa en el largo plazo. Los diseños de bajo costo pueden diferir bastante del diseño de plantas en países con altos niveles de ingresos, por ejemplo, al omitir sistemas de respaldo técnico como bombas, tuberías, sistemas de control electrónico, un segundo horno, o sistemas apropiados de filtros para el gas de combustión. Otra oportunidad de ahorro en el costo de inversión puede ser el uso de calidades inferiores de acero para componentes expuestos a esfuerzos mayores en la planta, como el horno o el edificio de la planta. Esto

resulta en el aumento del riesgo de fallas imprevistas y tiempos inactivos más largos debido a la falta de sistemas de respaldo, al mismo tiempo que los componentes críticos pueden sufrir de altos niveles de corrosión acortándose la vida útil operable de la planta. Ello puede aumentar los costos operativos y de mantenimiento en forma significativa, y reducir el índice de utilización y los ingresos de la venta de residuos tratados o de energía. Por lo mismo, no se podrá garantizar un suministro continuo de energía (ej. vapor suministrado a la industria) y, en el peor de los casos, la planta dejará de operar al paso de pocos años. La evaluación cuidadosa de la base de costos y de financiamiento es por consiguiente crucial – al igual que asegurarse de contar con acuerdos contractuales y garantías que establezcan con claridad cuál de las partes interesadas asumirá los riesgos del proyecto. La experiencia muestra también la necesidad de implementación de sistemas de gestión de residuos lo suficientemente avanzados. Si la composición de los residuos a tratar difiere de la composición para la que la planta fue diseñada (ej. menor PCI), los componentes de la planta se degradarán más rápido y habrá problemas para cumplir con los estándares de emisión internacionales.



Vista de una parrilla de incineración desde afuera (izq.) y del interior (der.)

**Costos de capital anuales:** Los costos de capital anuales se calculan con base en las inversiones iniciales, la tasa de interés requerida para dicha inversión (ej. 6% por año) y la vida útil esperada de la instalación (ej. 15-20 años). Las plantas grandes requieren mayores montos de inversión inicial absoluta comparadas con plantas menores, pero tienen costos anuales específicos menores por tonelada de residuo tratado, debido a las economías de escala. Este desarrollo de costos no sigue una relación lineal con el volumen de residuos tratados. Una segunda línea de horno sólo requiere un 35% más de inversión en comparación con un único horno. Si la planta de IRSU proporciona energía y calor, como vapor para uso industrial, un segundo horno puede incrementar la seguridad de suministro y reducir tiempos muertos. Las inversiones también dependen de la tecnología de incineración y tratamiento de gases de combustión aplicada, del número de sistemas de respaldo técnicos, y de la calidad de las instalaciones y edificios, etc. El calentamiento de procesos o el enfriamiento por redes requieren inversiones adicionales, pero también incrementan la eficiencia energética general de la planta de IRSU. En muchos casos, los costos del terreno ni se consideran ya que se supone que los municipios proporcionan el predio sin costo. Ello podría generar problemas legales y cuellos de botella financieros si no se considera desde un principio.

**Costos operativos anuales:** Los costos operativos incluyen principalmente el costo del personal, materiales auxiliares (como productos químicos para el tratamiento de gases de combustión), refacciones y mantenimiento, seguros e impuestos, electricidad, y los costos de eliminación y disposición de residuos como escoria y ceniza volante (en algunos casos, la escoria se puede aprovechar en la construcción de caminos). También se deberán considerar posibles costos adicionales por el manejo extra de residuos (ej. separación de fracciones no deseadas, como materiales inertes). La recolección de residuos no se aborda en esta sección, pero la debida organización y financiamiento son cruciales para alcanzar altos índices de utilización.

Los costos específicos de inversión y operación por tonelada de residuo disminuyen conforme la capacidad de la planta y el índice de utilización aumentan. Por lo tanto, la capacidad de la planta de preferencia debería ser mayor a 100,000 toneladas por año, para así alcanzar una óptima economía de escala y distancias de recolección promedio.

**Ingresos:** Los ingresos derivados de la venta de energía dependen de los precios de electricidad y de la energía térmica generada en el proceso, de la eficiencia de la planta y del PCI del residuo. Los demás ingresos de los materiales recuperados por lo general se pueden ignorar. Ya que estos ingresos de mercado por si solos no serán suficientes, se requieren tarifas adicionales o subsidios para cubrir todos los costos.

Estimación de costos de una IRSU en países industrializados y emergentes – las cifras indicativas						
Capacidad de incineración 150,000 t/a	Inversión inicial	Costo de capital por tonelada de residuo	Costos de O y M por ton	Costo total por tonelada	Ingresos por la venta de energía por tonelada	Costo por cubrirse por tonelada de de residuo
Base de costos en la UE (config. técnica avanzada, 2 líneas de hornos)	135 - 185 millones EUR	80 - 115 EUR/t	180 EUR/t	260 - 295 EUR/t	60 EUR/t (calor y electricidad) 27 EUR/t (electricidad)	200 - 235 EUR/t
Base de costos en países emergente (config. técnica básica, 1 línea de horno)	30 - 75 millones EUR	22 - 55 EUR/t	20 - 35 EUR/t	42 - 90 EUR/t	2 - 10 EUR/t (electricidad)	40 - 80 EUR/t

Tabla 2: Ejemplo de estimaciones de costos individuales de plantas de IRSU para países industrializados y emergentes. Los costos se derivaron de IRSU suizas con altos estándares técnicos y se ajustaron a una IRSU con configuración básica para países emergentes. Ej. Lo costos de inversión se calculan del 20% al 40% de los costos de Suiza, mantenimiento y materiales auxiliares del 20% al 50%, personal y costos de disposición o de escoria del 10% al 20%, y costos del seguro al 50%. Ambos estándares deben cumplir con los estándares de emisiones nacionales e internacionales. Las principales diferencias son el diseño arquitectónico, el número de líneas de hornos, el nivel de automatización y la calidad de los materiales utilizados en la planta. Supuestos de la estimación: índice de utilización del 100% durante una vida útil de 15-20 años, tasa de interés anual del 6%.

### 3.1.7 CONCLUSIONES Y REQUISITOS

Por lo general, la incineración sólo se debería considerar como opción viable si se pueden garantizar los siguientes aspectos:

- » Ha existido un sistema eficiente de gestión de residuos desde hace un par de años y la actual escasez de terrenos requiere una solución alternativa a los rellenos sanitarios para fracciones de residuos que no se pueden reciclar;
- » Existen las bases de un sistema de monitoreo ambiental adecuado;
- » Se cumple con estándares de emisiones y otras normas ambientales;
- » Se deben asegurar los medios financieros para cubrir costos adicionales a los de los rellenos sanitarios;
- » El suministro de RSU combustibles debería sumar al menos 100,000 t/año;
- » El PCI debe ser, en promedio, al menos 7 MJ/kg y nunca debe caer por debajo de 6 MJ/kg;
- » Las escorias se puede aprovechar después del procesamiento en la construcción de caminos. Para la disposición segura y ambiental de la ceniza volante se debe contar con rellenos sanitarios seguros;
- » Se puede contratar y conservar personal capacitado;
- » La comunidad que habita cerca del sitio de una planta de IRSU planeada, está involucrada con el proyecto y sus intereses se toman en cuenta desde un principio. La comunicación transparente y el debido compromiso son condiciones previas.

## 3.2 Coprocesamiento

El coprocesamiento es el uso de materiales derivados de residuos para reemplazar recursos minerales naturales (*reciclado de materiales*) y/o combustibles fósiles tradicionales como carbón, combustóleo y gas natural (*recuperación de energía*) en procesos industriales. El coprocesamiento se aplica a nivel mundial principalmente en la industria cementera y en plantas termoeléctricas; en algunos casos también en la industria de acero y cal. En plantas termoeléctricas donde sólo tiene lugar la recuperación de energía, esto se conoce como *coincineración*. En la industria cementera europea, el índice de sustitución térmica de los combustibles fósiles por residuos puede alcanzar hasta un 80% en ciertas instalaciones (promedio a lo largo de un año), mientras que el índice de sustitución en la UE está alrededor del 39% [16]. El coprocesamiento en plantas cementeras también se ha vuelto una parte común de sistemas de gestión de residuos en numerosos países en vías de desarrollo y emergentes. No obstante, la proporción de RSU utilizados en coprocesamiento sigue siendo bajo comparado con los flujos de residuos especiales como llantas usadas, residuos industriales peligrosos, suelos contaminados, residuos de biomasa o lodos de plantas de tratamiento de agua.



Planta de cemento con función de co-procesamiento (derecha), horno de cemento rotatorio (centro) y clínker de salida (izquierda).

### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

El coprocesamiento requiere flujos de residuos relativamente homogéneos con una característica definida para asegurar una combustión controlada. Mediante diferentes procesos de tratamiento previo (preprocesamiento), los residuos se pueden transformar en llamados Combustibles Derivados de Residuos (CDR); también se emplean los acrónimos AFR (materias primas y combustibles alternos) y CSR (combustibles sólidos recuperados). En la Figura 6, el diagrama de flujo de una planta de Tratamiento Biológico Mecánico (TMB) se presenta como un ejemplo de preprocesamiento de residuos sólidos urbanos para CDR.

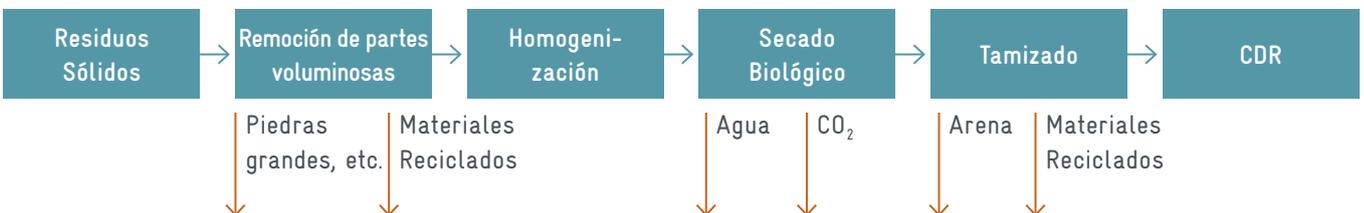


Figura 6: Proceso genérico del flujo del TMB para la generación de CDR

Los CDR típicamente se agregan al proceso de combustión mediante un sistema de dosificación independiente. El coprocesamiento en hornos cementeros ofrece la ventaja de que las reacciones del clínker a 1,450°C permiten la total incorporación de cenizas y en particular la unión química de los metales con el material del clínker. Los compuestos orgánicos tóxicos se destruyen por completo en la flama a temperaturas mayores a >2,000°C. La sustitución directa del combustible primario en el proceso de producción representa una recuperación de energía mucho más eficiente que la de otras tecnologías de aprovechamiento energético de residuos, alcanzando por lo general un 85-95% dependiendo de las propiedades de los residuos.

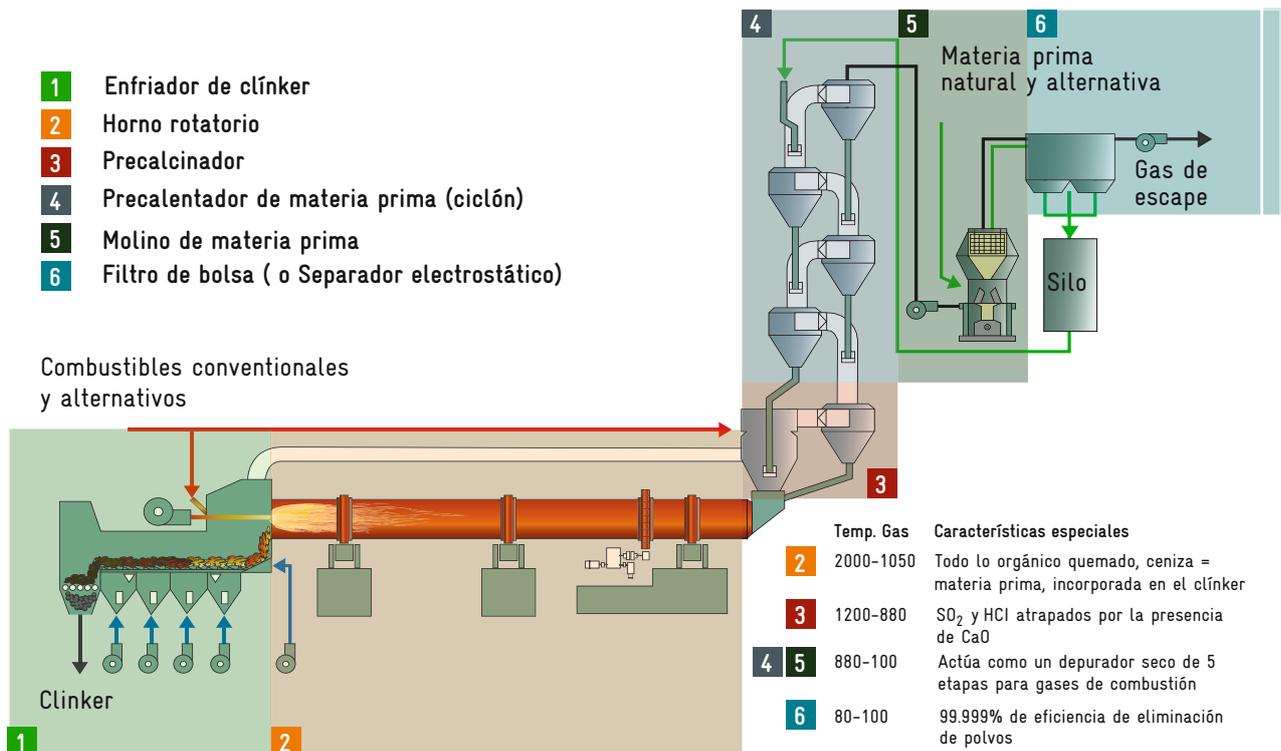


Figura 7: Componentes de un horno cementero y sus características especiales [18].

### 3.2.2 RESIDUOS IDÓNEOS

La idoneidad de los residuos para coprocesamiento depende de sus características y del tipo de industria donde se aplica el proceso. CDR normalmente hace referencia a una fracción separada de alto poder calorífico del RSU, residuos comerciales o de procesos industriales.

Un alto contenido de cloro o mercurio en los residuos puede causar problemas operativos o ambientales. Por lo tanto, residuos de PVC-plástico, por ejemplo, no son aptos para coprocesamiento. Las normas de calidad definen las características de CDR, como el contenido de metales en trazas, cloro y azufre. Un poder calorífico de unos 10 - 15 MJ/kg del CDR es el deseado para una operación económicamente robusta [19].

### 3.2.3 ASPECTOS OPERATIVOS

El uso seguro y responsable de residuos requiere la selección cuidadosa de puntos de alimentación en el sistema del horno así como un control operativo integral de acuerdo con las características específicas del residuo y sus volúmenes. Su aplicación no debería afectar la operación continua e ininterrumpida del horno en forma negativa, ni la calidad del producto, o el desempeño ambiental del sitio. Por lo tanto, se debe asegurar una calidad consistente de los residuos y una velocidad de alimentación. Se deben realizar controles de entrega en las operaciones de rutina con frecuencia para el pre-procesamiento de residuos o la producción de CDR. El personal operativo debe estar debidamente capacitado conforme a las necesidades específicas y acorde con la naturaleza de los residuos o los CDR. La salud y la seguridad operacional deben estar debidamente desarrolladas y se deben mantener interacciones frecuentes con autoridades ambientales, el municipio, comunidades vecinas y otros grupos de interés. Las plantas cementeras a menudo están en manos de grupos internacionales que pueden ofrecer su conocimiento y expertos internos para la operación de la planta. Para co-incineración en plantas termoeléctricas se recomienda el uso de CDR con propiedades y composición bien definidas.

### 3.2.4 ASPECTOS AMBIENTALES

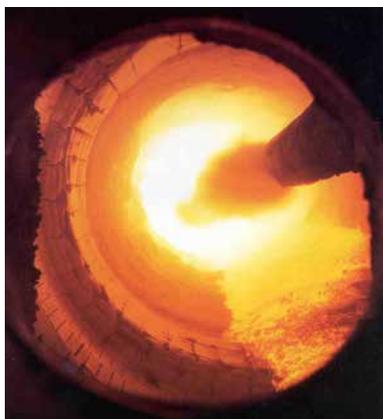
Mediante la recuperación de material y energía, el coprocesamiento contribuye a la reducción de los impactos ambientales generales de la producción de cemento, un proceso intensivo en términos de consumo de recursos y que genera diversas emisiones al aire que deben ser monitoreadas y reducidas más allá de los límites legalmente prescritos mediante técnicas apropiadas. Las emisiones potenciales de los hornos cementeros incluyen polvo, óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) así como dioxinas y furanos, óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>), compuestos orgánicos volátiles, ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF) y metales pesados. Para garantizar el coprocesamiento ambientalmente razonable de CDR en hornos cementeros, los operadores de plantas cementeras deben adherirse a ciertos principios, como los de la Convención de Basilea (2012) [20], el WBCSD (2014) [21], o GTZ/Holcim (2006) [18]. Al utilizar CDR, las emisiones deben ser iguales o menores que sin el uso de CDR. Para este fin, el uso de tecnologías de punta y procedimientos como la alimentación directa del CDR a las zonas de alta temperatura en el horno es obligatorio. El diseño de plantas cementeras modernas a menudo ya cumple con las normas internacionales. Cuando esto ya está asegurado, los requisitos para mejorar el control de emisiones para coprocesamiento son menores. Además, la selección de residuos idóneos, su transporte y almacenamiento apropiados, y su preparación para convertirlos en CDR es crucial para minimizar los impactos ambientales. Los productos finales de cemento deben someterse a pruebas de fugas potenciales de metales pesados antes de su uso en edificios, carreteras u otras construcciones.

### 3.2.5 ASPECTOS LEGALES

Muchos países ya cuentan con un marco legal para coprocesamiento. La existencia de regulación apropiada representa una condición previa para la aplicación exitosa del coprocesamiento en hornos cementeros. Las reglas del coprocesamiento deben formar parte de la legislación ambiental y de residuos. También deberán definirse las normas de emisiones, las especificaciones técnicas del coprocesamiento, así como los procesos de emisión de permisos. Debido a la alta complejidad técnica del coprocesamiento, la implementación efectiva y la inspección regular por parte de autoridades públicas requieren personal debidamente calificado y equipado. Se puede obtener orientación sobre los requisitos legales y el papel de las autoridades públicas en los lineamientos de la Convención de Basilea (2012) [20], el WBCSD (2014) [21] o GTZ/Holcim (2006) [18].

### 3.2.6 ASPECTOS ECONÓMICOS

El objetivo principal del operador de una planta cementera que invierte en coprocesamiento, es la reducción de los costos de combustibles y de materia prima. Ello significa que la decisión de la inversión depende de los volátiles precios del mercado de carbón, coque de petróleo, gas natural y materias primas, o de otros incentivos económicos. Entre mayor sea el costo de los combustibles primarios o de las materias primas, mayor será el atractivo de dicha inversión.



CDR procesados (izquierda), cinta transportadora en la planta de producción de CDR (centro), vista dentro del horno de cemento (derecha).

Los costos de pre-procesamiento, producción de CDR y coprocesamiento se ven afectados por:

- » La planeación del proyecto y los costos de los permisos;
- » La capacidad de las instalaciones para el manejo y la preparación de los residuos, y la dosificación de los residuos al horno cementero;
- » Las medidas de salud y seguridad operativas y el control de emisiones;
- » Costos de capital, impuestos, seguros;
- » Índice de utilización de la planta;
- » Refacciones, mantenimiento y materiales auxiliares;
- » Análisis de laboratorio para determinar la composición del residuo y del CDR;
- » Administración, personal, salarios.

La Tabla 3 presenta los rangos de los principales rubros de costo para coprocesamiento.

Estimación de costos de una planta cementera de coprocesamiento en países en vías de desarrollo – las cifras son únicamente indicativas						
Inversión inicial	Costo de capital por tonelada y año de residuo	Costos de O y M por ton	Costo total por tonelada	Ingresos* por tonelada	Costo** por tonelada de residuo	Observación
5 – 25 mill. de EUR incluyendo pre-procesamiento	10 – 25 EUR/t	10 – 20 EUR/t	20 – 45 EUR/t	1 – 5 EUR/t	19 – 40 EUR/t	PCI 10 MJ/kg, preseleccionado y una capacidad de 50,000 t/a, operación a 20 años, 6% p.a. IR

\* Ingresos en la forma de sustitución de combustibles fósiles. Sin subsidios.

\*\* Costos a cubrirse con primas, subsidios, etc.

Tabla 3: Ejemplo de elementos de costos individuales comparativos del coprocesamiento derivados de experiencias de la asociación de GIZ-Holcim

Los costos indicados dependen de las situaciones locales y es difícil sacar conclusiones generales de la información disponible sobre requisitos financieros, que son sustancialmente diferentes y dependen, en parte, de los casos de negocios específicos de las distintas compañías. Las inversiones iniciales incluyen principalmente el preprocesamiento para generar una mezcla homogénea de CDR, la introducción de bandas y nuevas funciones técnicas para permitir agregar el CDR al proceso de combustión, así como cuartos de almacenamiento y medidas de seguridad para, por ejemplo, reducir el riesgo de incendio. Las plantas cementeras más nuevas pueden requerir menos modificaciones si fueron construidas con el futuro coprocesamiento de residuos en mente. Un ejemplo de un proyecto de coprocesamiento en la industria cementera bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)<sup>3</sup> calcula costos de inversión de 3 millones de EUR si se usan hasta 60,000 toneladas métricas de distintos tipos de residuos por año, y cerca de 25% de la energía primaria utilizada es sustituida. 50,000 toneladas métricas (83%) de los residuos son RSU. El proyecto calcula costos de 45 EUR por tonelada métrica de RSU tratado [22]. Uno de los productores de cemento más grandes del mundo considera que se requiere una “prima” mínima de 20 a 30 EUR por tonelada de RSU para que la inversión en una instalación de preprocesamiento y coprocesamiento final en una planta cementera sea viable.

3 El MDL sigue siendo un instrumento legal de reconocimiento internacional, pero ha perdido su relevancia debido a la sobresaturación de créditos de CO<sub>2</sub> en el mercado global. Sin embargo, están surgiendo nuevos esquemas de créditos de carbono a nivel bi- o multilateral (ej. Green Climate Fund) o en los mercados nacionales e internacionales (ej. NAMA-Facility, Nationally Appropriate Mitigation Actions).

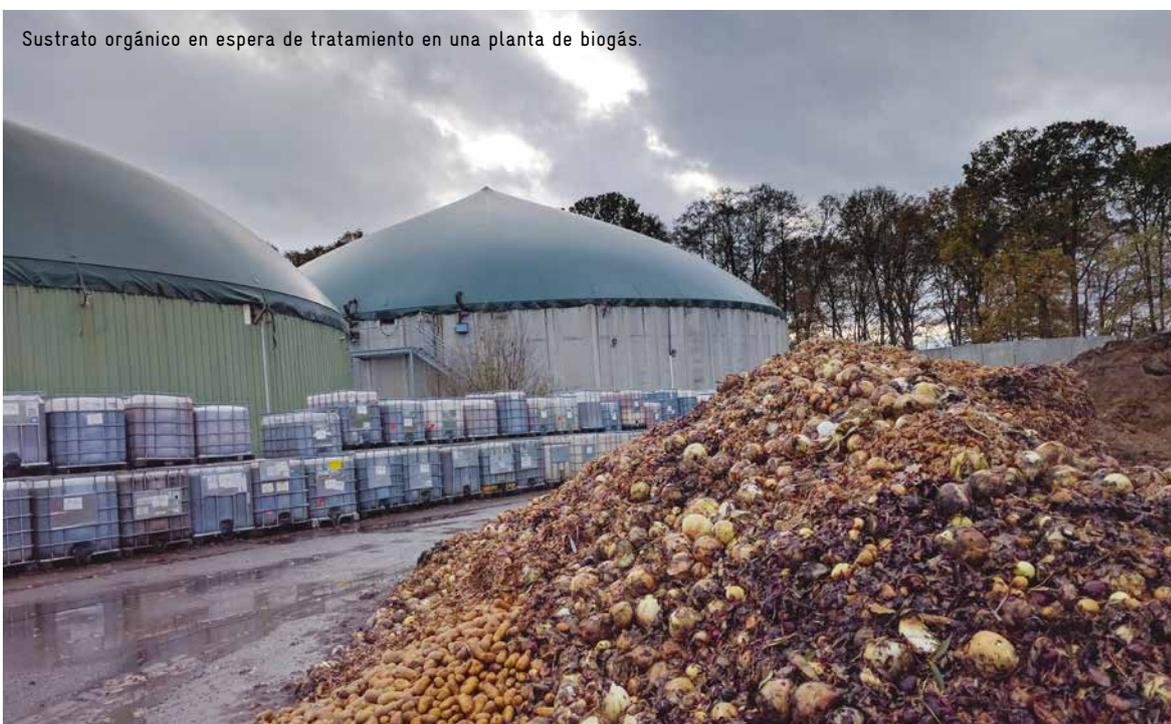
### 3.2.7 CONCLUSIONES

Muchos países en vías de desarrollo y emergentes han reunido experiencias – casi todas positivas – en coprocesamiento con tecnología de punta en los últimos 10 años. Es una tecnología para el aprovechamiento energético de residuos que ya ha ganado una amplia aceptación entre comunidades de negocios y responsables de política pública. Aunque su aplicación actualmente se enfoca en residuos industriales y peligrosos específicos de alto poder calorífico, existen algunos ejemplos de casos de éxito con fracciones no reciclables de RSU. Un factor limitante consiste en el transporte de los residuos desde los municipios hasta la planta cementera. Las distancias mayores a 200 km quitan todo el atractivo de la operación en el sentido financiero y ecológico. Otro factor limitante es el atractivo económico de combustibles alternos debido a la volatilidad de los precios de combustibles fósiles y los bajos ingresos obtenidos de cuotas de disposición de residuos en la mayoría de los municipios de países en vías de desarrollo y emergentes.

## 3.3 Digestión anaerobia para la producción de biogás

La digestión anaerobia (DA) es la descomposición de materia orgánica mediante microorganismos en ausencia de oxígeno libre. La DA ocurre en forma natural en condiciones carentes de oxígeno, como en el sedimento de algunos lagos, y se puede utilizar en condiciones controladas para generar biogás. Para ese propósito se usa un reactor hermético, llamado digestor anaeróbico, para proveer las condiciones favorables para que los microorganismos conviertan la materia orgánica, el sustrato, en biogás y un residuo sólido-líquido llamado digestato. El digestato se puede aprovechar como fertilizante orgánico cuando el sustrato viene separado desde su punto de origen, y es residuo orgánico no contaminado. El biogás es una mezcla de diferentes gases que se pueden convertir en energía térmica y/o eléctrica. El gas metano inflamable ( $\text{CH}_4$ ) es el portador principal de la energía en el biogás y su contenido varía entre 50 y 75% dependiendo del sustrato y de las condiciones de operación [23]. Debido a su bajo contenido de metano, el poder calorífico del biogás es aproximadamente una tercera parte del de gas natural (5.5 a 7.5 kWh/m<sup>3</sup>).

La DA en digestores a menor escala ha tenido una larga tradición en países en vías de desarrollo para aprovechar el contenido energético de residuos orgánicos en contextos rurales. El sustrato primario en estos casos proviene de la agricultura, en especial del estiércol de animales, que es relativamente fácil de manejar y se puede aplicar a menor escala. A escala municipal, la DA está recibiendo mayor atención como posible opción para la recuperación de energía de residuos en el contexto urbano. No obstante, la operación de plantas de biogás de RSU heterogéneos es un gran reto en términos de requisitos operativos, de seguridad y financieros. Por lo mismo, existen pocos ejemplos de éxito de plantas de biogás de RSU en países en vías de desarrollo. Un reto mayor en la operación exitosa de la DA es la capacidad de garantizar fracciones de residuos orgánicos consistentemente bien separadas. En muchos países, los residuos orgánicos a menudo se mezclan con materia inorgánica como plásticos, metales y otros contaminantes que obstaculizan el éxito de la DA a mayor escala. A diferencia de otras plantas de aprovechamiento energético de residuos, las plantas de biogás a menor escala son una opción aplicable en países en vías de desarrollo.

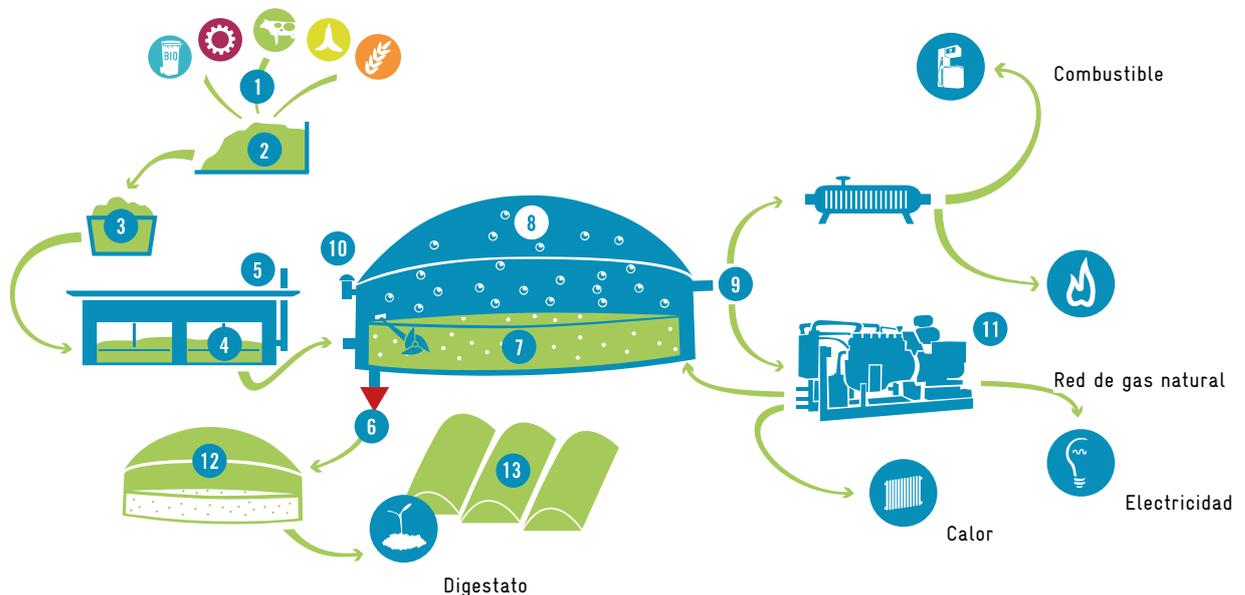


### 3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Existe un gran número de diseños de digestores anaeróbicos en el mundo, con diversos grados de complejidad. De acuerdo con [23], [24] la DA se puede clasificar por:

- » **Modo de alimentación:** Sistemas discontinuos (tipo Batch) o continuos
- » **Rango de temperatura:** Condición psicrófila (< 25°C), mesófila (35-48°C) y termófila (> 50°C); en donde sólo las últimas dos se consideran económicamente viables. Las condiciones termófilas se recomiendan cuando prevalece el riesgo de patógenos. Como alternativa, se puede recurrir a la pasteurización a 70°C durante 1 hora o utilizar composta termófila para desactivar los patógenos de sistemas mesófilos.
- » **Tipo de reactor:** Los reactores con tanques de agitación continua son comunes para sustratos líquidos como residuos de servicios de alimento, aguas residuales o lodos industriales de procesamiento de alimentos, mientras que los digestores de tapón tipo plug-flow y de lote se utilizan para sustratos sólidos. Aunque al sustrato sólido se le puede extraer el agua para su uso en reactores con tanques de agitación continua.
- » **Número de etapas:** Posibilidad de digestión desde una etapa hasta múltiples etapas.

El biogás se puede usar directamente para generar calor o se puede convertir en calor y electricidad utilizando una planta termoeléctrica combinada, eso después de su desulfurización y secado. Otra opción es convertir el biogás en biometano con un contenido de metano de aprox. 98%, para utilizarlo como sustituto de gas natural [23]. La Figura 8 muestra el proceso de producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos y estiércol. El biogás generado se puede utilizar por ejemplo en un generador termoeléctrico combinado (CHP).



- |  |  |
|--|--|
| 1 Materia prima  | 8 Almacenamiento de gas  |
| 2 Recepción y almacenado de residuos                                       | 9 Sistema de limpieza de gas   |
| 3 Preparación, procesamiento, clasificación y limpieza de la materia prima | 10 Equipo de Seguridad (dispositivos de alivio de presión, válvulas de seguridad, quemadores etc.) |
| 4 Edificio cerrado para residuos putrefactos                               | 11 Unidad termoeléctrica   |
| 5 Biofiltro para reducir olores y compuestos orgánicos                     | 12 Almacenamiento del digestato  |
| 6 Unidad de saneamiento  | 13 Mejora del digestato  |
| 7 Digestor   |  |

Figura 8. Componentes y usos finales de una planta de digestión anaerobia. Imagen de la Fachverband Biogas [25].

### 3.3.2 RESIDUOS IDÓNEOS

La DA sólo se presta para el procesamiento de materia orgánica, es decir biomasa. El contenido de materiales fibrosos como hemicelulosa y lignina que se encuentran por ejemplo en la paja y en plantas fibrosas, debería ser más bien bajo, ya que estos materiales se degradan más lento durante la DA. Además de usar biomasa de ‘residuos’ orgánicos, como residuos agrícolas o fracciones orgánicas de RSU, es también posible usar cultivos especiales generadores de energía, como el maíz, para la producción de biogás. Sin embargo, esto puede causar conflictos potenciales con la producción alimentaria, por lo que no será tema de esta guía; en su lugar, sólo se considerará la DA de materia orgánica obtenida de residuos urbanos. La inclusión de materia inorgánica o peligrosa en el proceso no es deseable ya que puede restringir la degradación microbiana, obstruir las operaciones al taponar el material plástico las tuberías y/o limitar la sostenibilidad del digestato como fertilizante orgánico.

Los residuos orgánicos municipales, como residuos separados en su punto de origen provenientes de hogares, mercados y jardines, se pueden considerar una fuente idónea de sustrato para DA. Además, la codigestión con residuos agrícolas, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales o con residuos orgánicos industriales o comerciales, puede incrementar la disponibilidad de sustrato y por lo tanto la viabilidad económica. El uso de residuos orgánicos de los hogares es más complejo que el uso de otros tipos de sustratos, como cultivos generadores de energía, residuos industriales y comerciales, y subproductos animales o vegetales [26]. Ello se debe a la fluctuación de la composición del sustrato utilizado durante el año y por la posibilidad de altas cantidades de impurezas. Los rendimientos de metano y energía de la DA varían fuertemente de sustrato a sustrato (ejemplos indicativos en la Tabla 4).

Sustrato	Rendimiento de metano [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> por t <sub>hum</sub> ]	Rendimiento de energía [MJ per t <sub>hum</sub> ]
<b>Municipios</b>		
Aguas residuales	15	570
Residuos de cocina y jardín	40-100	1,510-3,780
<b>Industrias</b>		
Residuos frutales	60	2,270
Residuos de rastro	50	1,890
<b>Agricultura</b>		
Estiércol de ganado	32	1,210
Pasto	90	3,400

Tabla 4: Ejemplos indicativos de rendimientos de metano y energía de sustratos de residuos orgánicos selectos mediante DA (adaptado de [23] [27]) con rendimientos de metano en m<sup>3</sup> normales (Nm<sup>3</sup>, a 0 °C, 1.01325 bar y humedad relativa del gas de 0%) por tonelada de peso húmedo (t<sub>hum</sub>) de sustrato y 37.8 MJ por Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (mayor poder calorífico).

### 3.3.3 ASPECTOS OPERATIVOS

Los aspectos operativos más importantes incluyen lo siguiente:

- » **Disponibilidad y composición del sustrato de residuos orgánicos:** La composición y cantidad de residuos orgánicos pueden variar significativamente dependiendo de la estación del año, principalmente por la disponibilidad de productos agrícolas y sus residuos. Ello debe tomarse en cuenta al planear los digestores anaerobios y habrá que incluir dimensiones, así como las posibilidades de instalaciones para el almacenamiento de sustrato cuando la disponibilidad es mayor que la capacidad de la planta.
- » **Temperatura:** El crecimiento y la reproducción de microorganismos es mayor a altas temperaturas, siempre y cuando no existan otras condiciones limitantes. En la mayoría de los casos, un rango de temperaturas mesófilas de entre 35-48°C se considera lo más estable. La operación a temperaturas mayores en el rango termófilo de >50°C puede eliminar patógenos y ayudar a reducir los volúmenes en el reactor, pero por lo general requiere calentamiento y aislamiento. En climas más fríos, la DA psicrófila se ha aplicado con éxito en digestores a menor escala (ej. [24]); sin embargo, no sería una solución económicamente viable para digestores a mayor escala debido a la necesidad de calentamiento y aislamiento.

- » **Velocidad de carga orgánica (VCO):** VCO cuantifica el volumen de sustrato que un reactor específico es capaz de degradar por unidad de tiempo.
- » **Relación Carbono:Nitrógeno (C:N):** La abundancia relativa de carbono y nitrógeno es un parámetro esencial de crecimiento microbiano y debería estar en un rango de 16-25 para digestores anaeróbicos.

### 3.3.4 ASPECTOS AMBIENTALES

La conversión de residuos orgánicos en biogás se puede asociar con varios beneficios ambientales. El biogás por lo general reemplaza alguna otra forma de energía, en muchos casos un combustible fósil o leña. Si es para reemplazar un combustible fósil, el biogás de residuos orgánicos reduce la emisión de gases de efecto invernadero adicionales a la atmósfera, porque el carbono contenido en la biomasa se origina del CO<sub>2</sub> atmosférico. Si es para reemplazar leña, como es el caso de muchos hogares rurales, la sustitución con biogás puede reducir el índice de deforestación por la recolección de leña. El digestato de la DA utilizado como fertilizante orgánico, puede reemplazar los fertilizantes minerales de alto consumo de energía. No obstante, el uso del digestato como fertilizante también depende de poder garantizar que sea de alta calidad y que no esté contaminado con metales o patógenos.

Un posible riesgo ambiental es la fuga de biogás de digestores operados en forma incorrecta. Ya que el potencial de calentamiento global del metano es aprox. 21 veces mayor que el del CO<sub>2</sub>, dichas fugas deben evitarse y se debe asegurar una correcta operación. También se debe evitar la fuga del digestato hacia cuerpos de agua, ya que puede afectar los ecosistemas locales.

### 3.3.5 ASPECTOS LEGALES

La DA ya se está aplicando en muchos países en vías de desarrollo a pequeña escala, y por lo general se puede integrar en los marcos legales y políticos nacionales sin contratiempos. No obstante, para la implementación de DA a gran escala, en contextos urbanos, se deben aplicar regulaciones adicionales, incluyendo normas de seguridad, y atender problemas relacionados con los olores. Desafortunadamente, dichas regulaciones rara vez existen y/o se aplican en países en vías de desarrollo, lo cual puede afectar la implementación inmediata de esta tecnología de aprovechamiento energético de residuos en forma negativa. También es relevante contar con un marco legal para la definición de estándares mínimos de calidad del digestato, para evitar potenciales riesgos en el uso agrícola. Para consultar los lineamientos sobre los aspectos de seguridad del biogás consulte la publicación: Biogas Safety First! disponible en [www.biogas-safety.com](http://www.biogas-safety.com)



Los quemadores de gas liberan presión excesiva en forma segura.



Los residuos orgánicos deben separarse en su punto de origen.

### 3.3.6 ASPECTOS ECONÓMICOS

Los ingresos de la DA dependen mayormente de la calidad del sustrato. La contaminación con sustancias inorgánicas incrementa los costos de separación y disminuye los beneficios potenciales derivados de los residuos del proceso que podrían usarse como fertilizantes en la agricultura. El uso directo del biogás requiere inversiones adicionales mínimas. Con inversiones adicionales, el biogás se puede convertir en biometano, o en calor y electricidad. La Tabla 5 muestra un ejemplo de elementos de costo individuales comparativos de la DA de RSU previamente seleccionados con una capacidad de entre 50,000 y 150,000 toneladas métricas de residuos orgánicos por año. Los datos fueron derivados de [28], [29] y adaptados a las condiciones en países en vías de desarrollo (menores costos de salarios). Los costos netos estimados de 14 a 18 EUR por tonelada métrica de residuos orgánicos indican que con únicamente la venta de la energía es imposible cubrir los costos totales.

Estimación de costos de una planta de digestión anaerobia en países en vías de desarrollo – las cifras son únicamente indicativas						
Inversión inicial	Costo de capital por tonelada de residuo	Costos de O y M por ton	Costo total por tonelada	Ingresos* por tonelada	Costo** por tonelada de residuo	Observación
12 – 20 millones EUR	12 – 19 EUR/t	10 – 15 EUR/t	22 – 34 EUR/t	8 – 16 EUR/t	14 – 18 EUR/t	capacidad 50,000 – 150,000 t/a, 20 años de operación, 6% p.a. IR

\* Ingresos en la forma de sustitución de combustibles fósiles. Sin subsidios.

\*\* Costos a cubrirse con sistema de tarifas, subsidios, etc.

Tabla 5: Ejemplo de elementos de costo individuales comparativos de la digestión anaerobia derivados de [28], [29] y ajustados a las condiciones en países en vías de desarrollo.

Los beneficios de la digestión anaerobia de residuos orgánicos se derivan tanto del biogás como de la fuente de energía, así como del digestato como fertilizante. Los beneficios de la producción de biogás dependen principalmente del precio de la energía que este reemplaza. La posibilidad de usar el digestato como fertilizante orgánico, y su valor monetario depende, entre otras cosas, de la calidad del digestato, de las necesidades locales o regionales, y de su aceptación por parte de los agricultores [24]. Los beneficios indirectos se derivan de la importante reducción de masas de residuos orgánicos depositados en vertederos o rellenos sanitarios, en especial en países en vías de desarrollo.

### 3.3.7 CONCLUSIÓN

La fracción de residuos orgánicos de RSU en países en vías de desarrollo es por lo general mucho mayor que en países industrializados, y los residuos agrícolas también están disponibles para uso como co-sustratos. Además, muchos de los países en vías de desarrollo gozan de climas cálidos. Estas condiciones hacen de la DA una opción especialmente interesante.

Las prácticas actuales de gestión de residuos, en particular la falta de separación en el punto de generación, obstaculizan la operación estable de la tecnología de DA. Especialmente en el contexto urbano, el marco legal en términos de regulación de seguridad requiere atención especial. Considerada una solución de bajo grado tecnológico, los requisitos para operación y mano de obra a menudo están subestimados, generando fallas en la operación, menores rendimientos de biogás de lo esperado, y menor calidad de digestato para aplicaciones agrícolas. Finalmente, no se puede esperar que los ingresos financieros del biogás (electricidad, calor/frío o biometano), y de la producción de digestato a partir de residuos orgánicos y su venta, superen los costos de producción cuando los costos de la inversión han sido contabilizados en su totalidad, en especial sin la existencia de una tarifa de alimentación especial por la electricidad/biometano vendidos a la red eléctrica o de gas natural. Integrando una buena planeación de la gestión de RSU, incluyendo la separación de los residuos desde los hogares, la DA puede llegar a complementar otras tecnologías y prácticas de gestión de RSU.

### 3.4 Captura de gas de relleno sanitario

La Captura de Gas de Relleno Sanitario (GRS) representa un tipo de tecnología de aprovechamiento energético de residuos diferente en comparación con las otras presentadas en esta guía. Se debe considerar como un componente esencial para parcialmente mitigar los impactos climáticos negativos de la operación de rellenos sanitarios (RS). Los rellenos sanitarios son una práctica internacionalmente adoptada y aceptada en países en vías de desarrollo y, en muchos casos, la única opción para tratar y almacenar residuos recolectados en forma controlada. Aunque los RS son una mejora si se comparan con los vertederos a cielo abiertos y sin control, también tienen impactos ambientales negativos en el largo plazo, como la emisión de gas metano de relleno sanitario con alto potencial de calentamiento global. Otros incluyen la pérdida de valiosos recursos en los residuos de los rellenos sanitarios, así como la presencia de compuestos olorosos y tóxicos. El metano en el gas de relleno sanitario se forma por la digestión anaerobia de materia orgánica en el cuerpo del relleno sanitario, que es como un tipo de reactor biológico sobredimensionado. Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los rellenos sanitarios a la atmósfera, el gas metano debe ser capturado. Ello se hace a través de la captura de los gases del relleno sanitario, a pesar de las importantes pérdidas que ocurren en la fase de arranque del relleno sanitario, antes de la instalación y operación del sistema para capturar el metano. Incluso estando ya en operación es imposible capturar todo el gas emitido por el relleno sanitario. Se han llevado a cabo más de 200 proyectos de recolección de GRS bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio del protocolo de Kioto, para la mitigación de emisiones de gases con efecto sobre el clima [30].



Vista de relleno sanitario desde arriba (izquierda) y en construcción (derecha).

#### 3.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

El gas de relleno sanitario consiste en un 45% - 55% de gas metano y por lo tanto es idóneo como combustible para la generación de calor y electricidad, la generación termoeléctrica o bien como combustible de transporte. El resto es principalmente CO<sub>2</sub>. El rendimiento del gas de relleno sanitario depende de varios factores:

- » Composición del residuo;
- » La manera en que los residuos frescos se colocan y se compactan;
- » Nivel de compactación y altura de los estratos individuales;
- » Contenido de agua del relleno sanitario;
- » Clima;
- » Características técnicas de la captura del gas metano en el relleno sanitario.

Un análisis de generación de GRS en Tailandia muestra que en diferentes RS se generó de 1.9 a 5.5 veces más GRS en la temporada de lluvias que en la de secas [31].

Se dispone de varias tecnologías para la captura de GRS que se pueden agregar a RS en operación o ya cerrados. Todas recolectan el GRS de los residuos y al mismo tiempo evitan la intrusión de agua y aire en el sistema. Para recolectar el GRS, se insertan tuberías perforadas en el sitio de disposición de residuos para capturar el gas. Estas tuberías se pueden instalar en posición vertical u horizontal. El gas entra en los tubos perforados y se transfiere a un sistema de purificación de gas para eliminar en particular el ácido sulfhídrico. Después de la limpieza, el gas se puede usar (ver la Figura 9).

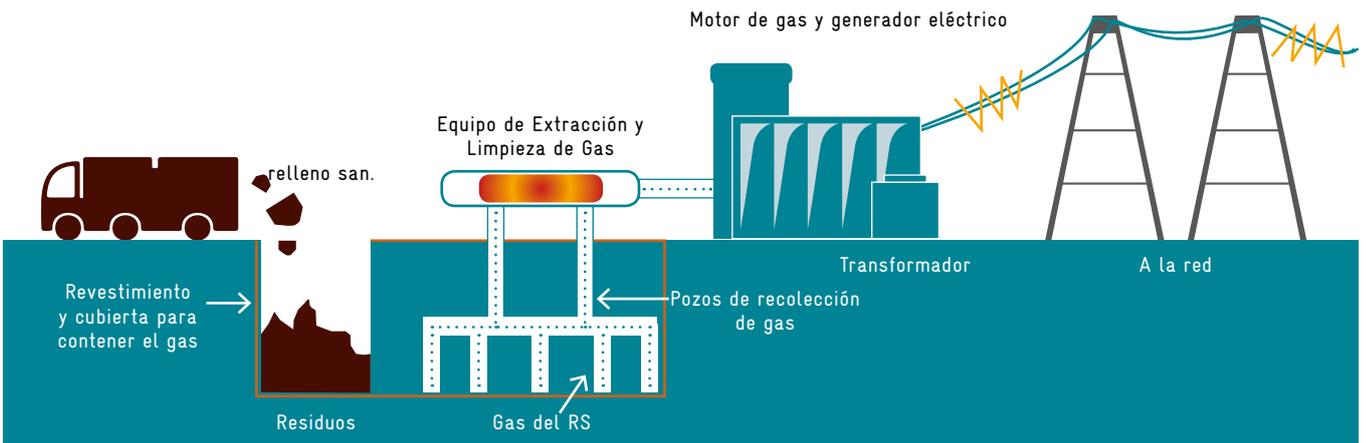


Figura 9: Componentes del sistema de captura de gas de relleno sanitario con producción de electricidad [32].

### 3.4.2 RESIDUOS IDÓNEOS

Los proyectos de captura de gas de relleno sanitario (GRS) requieren un alto contenido de residuos orgánicos reactivos en el cuerpo del relleno sanitario. Un alto contenido de residuos minerales u orgánicos de digestión lenta (como la madera) reduce el rendimiento.

### 3.4.3 ASPECTOS OPERATIVOS

Los operadores de rellenos sanitarios deben asegurarse de que no existan riesgos importantes causados por la migración del gas del relleno sanitario hacia el exterior, a través del subsuelo o acumulándose fuera del relleno sanitario en una mezcla que podría ser explosiva o causar asfixia. Se debe asegurar que durante la recolección, tratamiento y uso del gas de relleno sanitario se minimice la liberación de gases. Se deberán realizar auditorías anuales del sistema de recolección de gas para evaluar la eficiencia del sistema.

### 3.4.4 ASPECTOS AMBIENTALES

La recolección y combustión de metano de rellenos sanitarios contribuye a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y otras emisiones tóxicas. Si el GRS se usa para sustituir combustibles fósiles como el carbón o combustóleo en procesos de combustión, o como combustible para sustituir el diésel en el transporte, también contribuye a la mejora de la calidad del aire. Pero la experiencia internacional ha demostrado desventajas adicionales del gas de relleno sanitario, además de los riesgos ya conocidos de los rellenos sanitarios:

- » La producción teórica de gas y la captura real de gas no concuerdan. En muchos casos, el rendimiento real de gas está muy por debajo de las expectativas, lo que significa que parte del metano escapa al ambiente. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos estima un rango de eficiencia de recolección de 60% a 85% [33]. No obstante, muchos rellenos sanitarios en países en vías de desarrollo apenas alcanzan un índice de captura del 50% debido a los estándares técnicos reducidos y a las limitaciones de costos. Si se compara el volumen de gas efectivamente capturado y recolectado con el total de gas emitido de un relleno sanitario durante su ciclo de vida, el índice de eficiencia baja aún más, a menos de 20-30%.

- » El gas de relleno sanitario se genera durante un período de 30-50 años, un horizonte de tiempo que va más allá de la operación de un relleno sanitario. La pregunta de quién opera y mantiene el sistema de gas sigue sin una respuesta.
- » Las fugas en el sistema de GRS representan un riesgo de seguridad, ya que el gas que se está escapando podría acumularse en edificios cercanos y causar explosiones.

### 3.4.5 ASPECTOS LEGALES

En la mayoría de los casos, no existen leyes específicas sobre la recolección de gas de relleno sanitario; condiciones legales apropiadas apoyan su desarrollo a través de la legislación local sobre cómo planear y operar sitios de rellenos sanitarios.

### 3.4.6 ASPECTOS ECONÓMICOS

Bajo el esquema del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), se ejecutaron numerosos proyectos de captura de GRS con generación de electricidad en países en vías de desarrollo. Sin ingresos adicionales por la reducción certificada de emisiones de CO<sub>2</sub> muchos proyectos de GRS probablemente no se hubieran implementado por razones económicas. La Tabla 6 ofrece una orientación sobre los costos de captura de GRS basados en información de proyectos de MDL en Brasil [34] y China [35]. Los costos dependen fuertemente del diseño y la topografía del RS. Los costos de la construcción y operación del RS no están incluidos.

Estimación de costos de recolección de gas de relleno sanitario aplicados a proyectos de MDL de rellenos sanitarios en Brasil y China						
Inversión inicial	Costo de capital por tonelada de año de residuo	Costos de O y M por ton	Costo total por tonelada	Ingresos* por tonelada	Costo** por tonelada de residuo	Observación
6 millones EUR (MDL-Brasil)	0.8 EUR/t	0.8 EUR/t	1.6 EUR/t	2.4 EUR/t	- 0.8 EUR/t	Capacidad de unos 390,000 – 850,000 t/a, operación a 21 años, 8% y 12% p.a. IR
5.3 millones EUR (MDL-China)	1.4 EUR/t	0.3 EUR/t	1.7 EUR/t	3.4 EUR/t	- 1.7 EUR/t	

\* De la venta de gas/electricidad, incluyendo los ingresos de créditos MDL en los proyectos en cuestión.

Tabla 6: Ejemplo de elementos de costos individuales comparativos de un proyecto de captura de GRS con generación de electricidad derivada de proyectos MDL en Brasil [34] y China [35]. En cada caso, los costos de inversión son para los generadores completos de la planta. Los costos de construcción y operación de un RS no están incluidos.

### 3.4.7 CONCLUSIONES

La recolección de gas de relleno sanitario no es la principal razón detrás de un relleno sanitario, pero el GRS debería considerarse un subproducto de la operación de un RS. Es bien sabido que los RS tienen numerosas desventajas, como la contaminación de aguas del subsuelo y del aire, la generación de lixiviados que se deben tratar, y malos olores. Por lo mismo, el gas de relleno sanitario no se debe considerar una tecnología de aprovechamiento energético de residuos primaria, sino una tarea obligatoria de las ciudades que tienen que manejar rellenos sanitarios porque no tienen otra opción. La recolección de GRS se considera una oportunidad para rellenos sanitarios existentes más que para nuevos proyectos de aprovechamiento energético de residuos. La captura de GRS puede mitigar algunos de los impactos de un relleno sanitario, sin embargo, el bajo índice de eficiencia de la captura de gas durante el ciclo de vida del RS es prueba de la dificultad de mitigar los impactos de contaminantes climáticos de los rellenos sanitarios.

## 3.5 Tecnologías alternativas: pirólisis y gasificación

Durante los últimos 40 años, el desarrollo de las llamadas “Tecnologías Alternativas” (TA) para el tratamiento térmico de residuos se llevó a cabo en dos pasos relevantes. El primer paso en los años 70 y 80 se caracterizó por una alta motivación y potencial de innovación para desarrollar una tecnología integral y eficiente para el tratamiento de residuos con una máxima generación de productos en el proceso y un mínimo impacto ambiental negativo. El segundo paso a mediados de los 90 estuvo dominado por estrategias de mercadotecnia. La gasificación y la pirólisis, más adelante también llamada “pirólisis de plasma”, se consideraban alternativas técnica y financieramente viables a la incineración de residuos y fueron etiquetadas con la calidad de tecnologías no contaminantes, a diferencia de la incineración. Al día de hoy, no existen plantas en operación para el tratamiento de RSU a mayor escala en Europa, África o América Latina, y las pocas plantas en Asia (principalmente en Japón) y EUA están operando como un elemento integrado en un sistema de gestión de RSU más complejo, o únicamente para flujos de residuos específicos. Los avanzados requisitos tecnológicos y operativos, las necesidades altamente específicas de sustratos de residuos y los altos costos iniciales de capital, hacen que esta tecnología sea difícil de aplicar a escala.

Al igual que la incineración de residuos, el objetivo de las TA es el tratamiento de los residuos para reducir su volumen y peligrosidad, al mismo tiempo de capturar (y concentrar) o destruir sustancias potencialmente dañinas. El proceso ofrece también un medio para recuperar energía, contenido mineral y/o químico de los residuos en la forma de productos de “reciclaje” útiles como gas de síntesis, combustóleo, carboncillo o coque (ver la Figura 10).

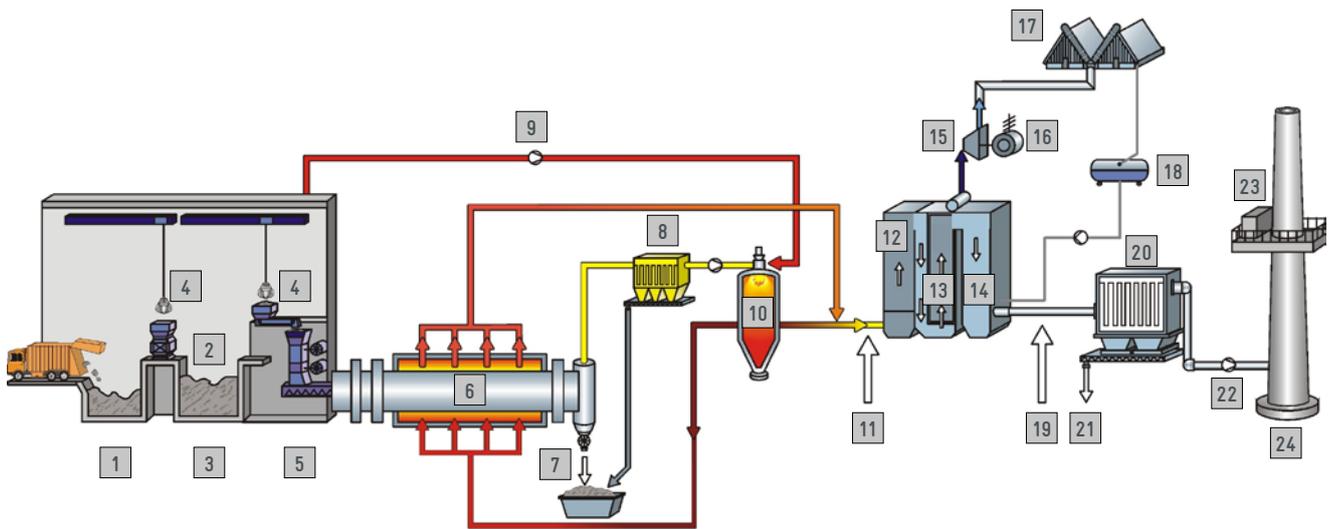
### 3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

La pirólisis/gasificación es la desgasificación de residuos en condiciones controladas con oxígeno, durante la cual se forma gas de pirólisis y un coque sólido. El poder calorífico del gas de pirólisis se encuentra típicamente entre 5 y 15 MJ/m<sup>3</sup> considerando residuos urbanos. En un sentido más amplio, la “pirólisis” es un término genérico que incluye un número de combinaciones de diferentes tecnologías que constituyen, en general, los siguientes pasos tecnológicos:

- » **Proceso de fuego latente:** Formación de gas a partir de partículas volátiles de residuos a temperaturas de entre 400°C y 600°C.
- » **Pirólisis:** Descomposición térmica de las moléculas orgánicas del residuo entre 500°C y 800°C que resulta en la formación de gas y una fracción sólida
- » **Gasificación:** Conversión del contenido de carbono remanente en el coque resultante de la pirólisis a 800°C -1000°C con la ayuda de una sustancia de gasificación (aire o vapor)
- » **Incineración:** Dependiendo de la combinación de tecnología, el gas y el coque pasan por un proceso de combustión en una cámara de incineración.

La pirólisis y la gasificación requieren flujos de residuos específicos.





- |                                |                                      |                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 Depósito de residuos gruesos | 10 Cámara de combustión              | 18 Tanque de agua de alimentación    |
| 2 Cuchillas rotatorias         | 11 Reducción selectiva no catalítica | 19 Tolva de medición de aditivos     |
| 3 Depósito de residuos finos   | 12 Evaporador                        | 20 Filtro fibroso                    |
| 4 Grúa superior                | 13 Supercalentador                   | 21 Descarga de polvo del filtro      |
| 5 Sistema de alimentación      | 14 Economizador                      | 22 Ventilador de tiro inducido       |
| 6 Horno de pirólisis           | 15 Turbina                           | 23 Sistema de Monitoreo de Emisiones |
| 7 Sistema de descarga          | 16 Generador                         | 24 Chimenea                          |
| 8 Filtro de gas caliente       | 17 Condensador                       |                                      |
| 9 Ventilador de aire de comb.  |                                      |                                      |

Figura 10: Componentes de una planta de pirólisis para el tratamiento de residuos sólidos específicos [36]

Se han desarrollado otros procesos que se basan en el desacoplamiento de fases que también ocurre en un incinerador: secado, volatilización, pirólisis, carbonización y oxidación de residuos. Algunos de estos desarrollos se toparon con problemas técnicos y económicos cuando se escalaron a tamaños comerciales, por lo que ya no se aplican. Algunos otros se utilizan a nivel comercial (ej. en Japón), y otros más se están sometiendo a pruebas en plantas demostrativas en toda Europa, pero aún representan una proporción menor de toda la capacidad de tratamiento al compararse con la incineración, y sólo se aplican a residuos específicos.

### 3.5.2 RESIDUOS IDÓNEOS

No se registran experiencias exitosas en el tratamiento de volúmenes mayores de RSU mixtos debido a su composición tan heterogénea. Por ello, la pirólisis puede ser una opción para el tratamiento final de flujos de residuos específicos, como suelos contaminados, residuos clínicos o residuos peligrosos industriales/comerciales de un solo tipo. No se recomienda ni para residuos urbanos mezclados, ni para entornos donde se necesitan tecnologías robustas y probadas.

### 3.5.3 ASPECTOS OPERATIVOS

La pirólisis o gasificación no se pueden considerar tecnologías independientes fáciles de manejar, sino que deben ser un componente en un sistema integral de gestión de residuos. Su operación requiere un buen entendimiento de la composición de los residuos entrantes y del proceso. La experiencia ha mostrado que la operación libre de problemas de una planta de pirólisis requiere técnicos altamente especializados.

### 3.5.4 ASPECTOS AMBIENTALES

Las ventajas potenciales de los procesos de pirólisis pueden incluir:

- » La recuperación del valor material de la fracción orgánica, como el metanol;
- » Mayor generación eléctrica usando motores o turbinas de gas;
- » Menores volúmenes de gas de combustión después de la combustión;
- » Producción de carboncillo o coque que se puede utilizar como combustible en plantas eléctricas o cementeras.

### 3.5.5 ASPECTOS LEGALES

Es de suponer que la legislación ambiental en la mayoría de los países en vías de desarrollo no aborda el tema de la aplicación de la pirólisis y la gasificación como tecnologías de combustión (o de aprovechamiento energético de residuos). Ello complica, si no es que imposibilita, el proceso de evaluación de sus impactos y la emisión de permisos.

### 3.5.6 ASPECTOS ECONÓMICOS

Debido a los altos costos de operación y mantenimiento, el costo económico de las TA sólo se puede considerar aceptable si los productos del proceso (gas, coque) tienen un buen valor en el mercado. Esto depende, en gran medida, de las condiciones del mercado y de la necesidad de un consumidor final (como una planta cementera) cercano a la planta de TA. Las experiencias de los últimos 40 años muestran que además de los retos técnicos, las compañías dedicadas a la pirólisis y a la gasificación a menudo deben afrontar retos económicos que en muchos casos ha conducido al paro de operaciones, ya que no se lograba obtener ingresos suficientes para cubrir los costos adicionales de la preparación del producto. Comparada con las otras tecnologías de aprovechamiento energético de residuos presentadas en esta Guía, la pirólisis y la gasificación son las más costosas. La Tabla 7 a continuación ofrece una orientación sobre los costos de una planta de TA con un volumen anual de 150,000 – 200,000 toneladas.

Estimación de costos de una planta de pirólisis/gasificación en países en vías de desarrollo – las cifras son únicamente indicativas						
Inversión inicial	Costo de capital por tonelada de año de residuo	Costos de O y M por ton	Costo total por tonelada	Ingresos* por tonelada	Costo** por tonelada de residuo	Observación
80 – 120 mill. de EUR	35 – 45 EUR/t	30 – 40 EUR/t	65 – 85 EUR/t	2 – 5 EUR/t	63 – 80 EUR/t	Capacidad 250,000 t/a, operación de 20 años, 6% p.a. IR

\* De la venta de productos finales

\*\* Costos a cubrirse con primas, subsidios, etc.

Tabla 7: Ejemplo de elementos de costos individuales comparativos de una planta de pirólisis en Alemania [37].

### 3.5.7 CONCLUSIÓN

Los conceptos de gestión de residuos orientados al futuro deberían satisfacer necesidades económicas y ecológicas. Dentro de este contexto, la pirólisis o la gasificación de fracciones de residuos de alto poder calorífico ofrece, en combinación con plantas generadoras y hornos industriales, una solución técnica alternativa, siempre y cuando se utilicen principalmente para residuos selectos y residuos de combustibles de alto poder calorífico. El enfoque técnico representa una posible opción dentro de un sistema de gestión de residuos ya completamente organizado.

Sin embargo, en la mayoría, si no es que en todos los países en vías de desarrollo, no existen las condiciones en un entorno municipal que justifiquen la aplicación de pirólisis o gasificación. Además, los costos operativos y de inversión relativamente altos no justifican el experimentar con una tecnología exclusiva para fracciones altamente selectivas que rara vez se encuentran en los residuos urbanos.

# 4 MATRIZ DE APOYO PARA LA TOMA DE DECISIONES

## 4.1 Objetivo

Todo proyecto de aprovechamiento energético de residuos es una labor compleja y debe ir acompañado de una evaluación profesional y minuciosa de viabilidad. La matriz de decisiones que se presenta en este capítulo tiene el propósito de brindar asistencia para tener una primera idea de la conveniencia de tecnologías potenciales para contextos específicos, y los varios aspectos que los responsables de la toma de decisiones deben considerar en las pláticas con proveedores de tecnologías. Resume las condiciones marco generales aplicables a cada una de las cinco tecnologías discutidas en esta guía. La matriz tiene tres objetivos:

- Ofrecer un panorama de las condiciones previas para la construcción y operación de tecnologías de aprovechamiento energético de residuos urbanos
- Comparar la conveniencia de las cinco tecnologías de aprovechamiento energético de residuos presentadas para diferentes condiciones marco
- Ofrecer una primera orientación sobre la aplicabilidad de una tecnología de aprovechamiento energético de residuos en específico, si se requieren mejoras al sistema de gestión de residuos en general o si dicha tecnología no es la adecuada.

La matriz consiste de 12 parámetros esenciales que habrá que considerar en el contexto local al arrancar un proyecto de aprovechamiento energético de residuos, mismos que son:

1. Nivel general de gestión de residuos
2. Composición de los residuos
3. Poder calorífico del RSU para procesos térmicos, contenido orgánico
4. Cantidad idónea de residuos para el aprovechamiento energético
5. Operación eficiente de instalaciones de gestión de residuos
6. Tiempos y distancias adicionales de transporte de RSU a las plantas de aprovechamiento energético de residuos
7. Comercialización, disposición y/o eliminación final de los residuos del proceso
8. Marco legal y requisitos ambientales para el aprovechamiento energético de residuos
9. Financiamiento de la gestión de RSU
10. Acceso a divisas extranjeras
11. Acceso de los usuarios finales a la energía obtenida del aprovechamiento de residuos o CDR
12. Incentivos para una generación de energía baja en emisiones de carbono

Los parámetros fueron tomados en parte de la guía del Banco Mundial para los responsables de la toma de decisiones [15] y modificados para satisfacer las necesidades de la presente guía. Cada parámetro se describe en mayor detalle en el Anexo A.

## CÓMO USAR LA MATRIZ DE DECISIONES

Para cada uno de los 12 parámetros arriba enumerados, los lectores deberán evaluar sus condiciones locales de acuerdo con las opciones ofrecidas en forma horizontal de lado izquierdo (altamente avanzado) de lado derecho (fuertemente subdesarrollado) en la matriz. La tecnología más conveniente de las 5 tecnologías de aprovechamiento energético se identifica mediante diferentes colores para cada una de las condiciones locales en la lista horizontal:

VERDE	AMARILLO	ROJO
La tecnología de aprovechamiento energético es muy probablemente la adecuada.	Se requiere mayor información y/o mejoras a las condiciones locales para una planeación específica, y la implementación exitosa de un proyecto de aprovechamiento energético.	La tecnología de aprov. energético no es la adecuada. Se recomienda mejorar o modificar las condiciones locales o seleccionar otra tecnología diferente.

Después de la evaluación de los **doce parámetros**, el lector tendrá una percepción apropiada de cada una de las tecnologías para sus condiciones locales. Como orientación, el número de campos en verde, amarillo y rojo para cada tecnología de aprovechamiento energético de residuos se puede interpretar de la siguiente forma:

Totales de la matriz	¿Es la tecnología adecuada para mi contexto?
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nueve o más campos en verde</li> <li>El resto en amarillo</li> </ul>	<p><b>En principio, la tecnología parece ser aplicable.</b> No obstante, los parámetros en amarillo deberán ser investigados en mayor detalle y se deberán implementar mejoras</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Menos de nueve campos en verde</li> <li>El resto en amarillo</li> </ul>	<p><b>La tecnología podría ser adecuada pero las condiciones actuales aún no favorecen su aplicación.</b> Los responsables de la toma de decisiones deberán evaluar las condiciones existentes en mayor detalle antes de iniciar un proyecto de aprovechamiento, o bien enfocarse en una tecnología que tenga más campos en verde.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Uno o más campos en rojo</li> </ul>	<p><b>CRITERIO DE ELIMINACIÓN: existen varias deficiencias para la aplicación de esta tecnología.</b> Todas las condiciones en rojo deberán mejorarse antes de iniciar un proyecto con esta tecnología, o bien seleccionar una tecnología que sólo tenga campos en amarillo o verde.</p>

La aplicación de la matriz permite a los usuarios construir una primera evaluación transparente, de las opciones realistas para el aprovechamiento energético de residuos en el futuro cercano. Ofrece un panorama de las condiciones previas que deben cumplirse en la región objetivo del proyecto y de las brechas de información, para una evaluación más integral. Para conocer más detalles sobre cada parámetro y sus diferentes valores, consulte el Anexo A.

## 4.2 Matriz para los responsables de la toma de decisiones

### 1. Nivel general de gestión de residuos

1	Existe un sistema avanzado de gestión de residuos basado en el flujo de los residuos (ej. biomasa, residuos peligrosos, reciclables).	Recolección sistemática organizada de residuos. Algunas fracciones de residuos (como llantas, reciclables, biomasa) se envían para reciclado y composta.	Existe recolección sistemática y disposición final en rellenos sanitarios. El reciclado no está organizado en forma sistemática.	Ausencia de recolección sistemática, reciclado y disposición final o eliminación de residuos.
	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	

### 2. Composición de los residuos

2	Fraciones orgánicas y no orgánicas se recolectan por separado. Los residuos peligrosos y los residuos voluminosos minerales reciben tratamiento por separado	Los RSU o fracciones de residuos recolectados por separado a veces se mezclan con pequeñas fracciones de residuos minerales y peligrosos	Los RSU se mezclan en forma regular con fracciones de residuos minerales o peligrosos	Los RSU se mezclan con grandes cantidades de residuos minerales y peligrosos
	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	

### 3. Poder calorífico del RSU para procesos térmicos, contenido orgánico

3	El poder calorífico del RSU es en promedio > 8 MJ/kg.	El poder calorífico del RSU está entre 7 y 8 MJ/kg en promedio.	El poder calorífico del RSU es < 7 MJ/kg. Alto contenido de biomasa con alto contenido promedio de humedad.	El poder calorífico del RSU es < 7 MJ/kg. El contenido de fracciones inorgánicas (como ceniza, polvo, arena, vidrio, metales) es alto.
	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	

#### 4. Cantidades apropiadas de residuos para el aprovechamiento energético

	> 150,000 toneladas métricas de fracciones de residuos aptos disponibles al año	50,000 a 150,000 toneladas métricas de fracciones de residuos aptos al año	10,000 a 50,000 toneladas métricas de fracciones de residuos aptos al año	< 10,000 toneladas métricas de fracciones de residuos aptos al año
4	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación

#### 5. Operación eficiente de instalaciones de gestión de residuos

	Los actores públicos y privados tienen experiencia en la gestión eficiente de instalaciones para el manejo de residuos, y en temas de cooperación	Los actores públicos y privados tienen experiencia, pero requieren el desarrollo de capacidades para poder gestionar instalaciones de aprovechamiento energético de residuos en forma eficiente	Los actores públicos tienen experiencia limitada en el aprovechamiento energético de residuos y el personal nacional calificado es difícil tanto para el sector público como para el privado	Ni los actores públicos ni los privados tienen experiencia en la operación de sistemas de aprovechamiento energético de residuos.
5	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación

#### 6. Tiempos y distancias de transporte adicionales de los RSU a plantas de aprovechamiento energético de residuos

	La distancia o tiempo de transporte casi no cambiará con respecto a la situación actual.	El tiempo de transporte incrementará < 1 hora, y la distancia adicional será < 50 km.	El tiempo de transporte incrementará >1 hora. La distancia de transporte adicionales será > 100 km.	La distancia de transporte adicional será > 200 km y no se dispone de transporte por ferrocarril.
6	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación

## 7. Comercialización y/o disposición final de los residuos del proceso

7	Existe un mercado para los residuos del proceso. Los residuos peligrosos se pueden disponer en forma segura en un relleno sanitario o confinamiento controlado cercano a la planta de aprovechamiento energético.	No hay mercado para los residuos del proceso. Todos los residuos del proceso se pueden disponer en forma segura en un relleno sanitario controlado cercano a la planta.	No hay mercado para los residuos del proceso. La disposición o eliminación segura requiere transporte a grandes distancias.	No hay mercado para los residuos del proceso y no se cuenta con disposición o eliminación segura para los residuos del proceso.
	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	

## 8. Marco legal y requisitos ambientales para el aprovechamiento energético de residuos

8	Existe un marco legal integral que considera todo tipo de aprovechamiento energético de residuos. Las leyes se aplican y la estrategia nacional para la gestión de residuos también cubre el aprovechamiento energético de residuos.	Existe un marco legal nacional para el aprovechamiento energético de residuos. Todas las deficiencias a nivel cumplimiento, ordenanzas y estatutos son atendidos.	El marco legal nacional para el aprovechamiento energético de residuos es parcialmente existente o inexistente. El cumplimiento de normas internacionales se puede asegurar en proyectos específicos.	El marco legal existente prohíbe el aprovechamiento térmico de residuos, o bien existen indicios de que no se pueden hacer cumplir debidamente los estándares de emisiones.
	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	

## 9. Financiamiento de la gestión de RSU

9	Los costos de recolección y eliminación de RSU siempre están cubiertos en su totalidad. Existen medios financieros accesibles para cubrir los costos adicionales del aprovechamiento energético de residuos.	Los costos de recolección y eliminación de RSU siempre están cubiertos en su totalidad. Puede haber dificultades para cubrir los costos adicionales del aprovechamiento energético de residuos.	Los costos de recolección y eliminación de RSU no se pueden cubrir en forma regular.	A menudo existe una falta de medios financieros para cubrir los costos operativos de los servicios de RSU.
	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	

## 10. Acceso a refacciones y divisas extranjeras

	Las refacciones se pueden adquirir en forma local. No existe restricción sobre la compra de refacciones en divisas extranjeras.	La mayoría de las refacciones se pueden comprar en forma local. Existen oficinas locales para la venta de refacciones de importación.	La tecnología clave de la planta de aprovechamiento energético de residuos debe ser importada. Demoras en el acceso a compras en divisas extranjeras.	No hay acceso a divisas extranjeras
10	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación

## 11. Acceso de los usuarios finales a la energía obtenida del aprovechamiento de residuos o combustible derivado de residuos (CDR)

	Las instalaciones de aprovechamiento energético o CDR se ubican en la cercanía de un área industrial con demanda eléctrica y de calor/gas. Existe una buena infraestructura de transporte y energía.	Las instalaciones de aprovechamiento energético o CDR se ubican en un área con demanda térmica moderada. Existe una buena infraestructura de transporte y energía.	Las instalaciones de aprovechamiento energético o CDR se ubican cerca de una importante red de transmisión. No hay demanda térmica en el área.	Las instalaciones de aprovechamiento energético o CDR se ubican en un área mal conectada a los consumidores de energía.
11	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación

## 12. Incentivos para una generación de energía baja en emisiones de carbono

	Ya se están aplicando incentivos económicos con éxito a la generación termoeléctrica baja en emisiones de carbono.	Los incentivos económicos para la generación de electricidad baja en emisiones de carbono a partir de residuos están regulados, pero no se han aplicado.	Los incentivos económicos probablemente se introducirán en menos de un año.	No existen incentivos económicos.
12	Incineración	Incineración	Incineración	Incineración
	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento	Coprocesamiento
	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia
	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario	Recolección de gas de relleno sanitario
	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación	Pirólisis y gasificación

### 4.3 Recomendaciones

Después haber leído los capítulos 1-3 y usado la matriz del capítulo 4.2, probablemente hayan surgido algunas preguntas. Esperamos que las siguientes recomendaciones ofrezcan mayor orientación.

Para los responsables de la toma de decisiones a nivel nacional y local:

- » **Evalúe si el aprovechamiento energético de residuos es la mejor solución en términos de la jerarquía de residuos y la economía circular.** La reducción de residuos mediante la prevención debería tener prioridad, seguida por la preparación para la reutilización y reciclado de materiales. Evalúe el flujo de sus residuos e identifique potencial adicional para la reutilización y reciclado de fracciones específicas de los residuos.
- » **Tome decisiones con base en un plan de gestión de aprovechamiento energético de residuos:** Sólo deberán tomarse decisiones con base en un plan integral de aprovechamiento energético de residuos basado en el análisis de flujo de materiales, que respete el concepto de la jerarquía de residuos. El aprovechamiento energético de residuos no es una solución independiente sino un elemento potencialmente interesante del sistema de tratamiento de residuos.
- » **Obtenga una respuesta para todos los campos marcados en amarillo en la matriz de decisiones:** Aunque su evaluación interna con la ayuda de la matriz favorezca un tipo de aprovechamiento energético de residuos, puede haber debilidades que requieren mayor aclaración. Pida ayuda de un asesor o experto independiente para encontrar respuestas a sus preguntas.
- » **Asegúrese de que el proyecto cumpla con los estándares internacionales de emisiones:** Debe haber sistemas para el monitoreo de emisiones antes de embarcarse en un proyecto (en particular para los casos de la incineración, coprocesamiento, y tecnologías alternativas). Asegúrese de que autoridades independientes puedan hacer cumplir los estándares de emisión. Ello podrá requerir cambios al marco legal.
- » **Establezca un sistema de financiamiento que permita la operación de plantas de aprovechamiento energético de residuos de modo que se cubran todos los costos:** Ya que las plantas de aprovechamiento energético de residuos requieren fuentes de financiamiento adicionales para recuperar todos los costos, se deben aplicar mecanismos de financiamiento adicionales. Además de los ingresos directos de los hogares en la forma de impuestos y tarifas sobre los residuos, existen tres fuentes adicionales de ingresos: subsidios, cobro por tonelada de residuos, o tarifas reguladas por venta de electricidad.
- » **Asegure una cooperación interinstitucional fluida:** En muchos países en vías de desarrollo, el aprovechamiento energético de residuos a menudo se asocia con secretarías o agencias del sector energía. No obstante, su interés no debe ser la maximización de la producción de energía a partir de residuos, sino la optimización de la recuperación de energía de las fracciones de residuos que— desde una perspectiva técnica o comercial — no se pueden reciclar. La cooperación cercana con las autoridades responsables de la gestión de residuos y/o la protección climática es por lo tanto esencial.
- » **Promueva y ofrezca el desarrollo de capacidades:** La escasez de expertos para la planeación, operación y monitoreo de plantas de aprovechamiento energético de residuos tiene un fuerte impacto sobre la gestión de RSU. Brinde al personal municipal del departamento de residuos la oportunidad de incrementar su conocimiento, y apoye iniciativas académicas y científicas que fomentan la educación en el sector.

- » **Evalúe las oportunidades de recolección de gases de rellenos sanitarios existentes:** Es importante reducir las emisiones de gases efecto invernadero de los rellenos sanitarios y que no repercutan en el cambio climático. Las instalaciones de recolección de gases de rellenos sanitarios requieren una proyección realista de los futuros volúmenes de producción de gas en rellenos sanitarios, considerando el aumento de los índices de desvío de residuos de los rellenos sanitarios.
- » **En el caso de experiencias limitadas en el tratamiento térmico de residuos, empiece por el coprocesamiento:** Como el coprocesamiento de residuos en hornos cementeros ya tiene una aplicación general en muchos países en vías de desarrollo, esta opción de aprovechamiento se puede implementar en el corto plazo. Existen plantas cementeras en casi todos los países del mundo y se pueden convertir al uso de CDR (combustible derivado de residuos) con una inversión limitada. Empezar por el coprocesamiento también ayuda a fomentar la cooperación entre municipios y el sector industrial, y aprovechar la vasta experiencia internacional de los países en vías de desarrollo en el coprocesamiento. Los factores potencialmente limitantes son las bajas tarifas por disposición final de residuos, la distancia entre el lugar de generación de los residuos y el sitio de la planta cementera, y los bajos precios de combustibles fósiles (carbón, coque de petróleo, etc.).
- » **Promueva la separación de residuos en su punto de generación y las plantas de digestión anaerobia descentralizadas para biomasa recolectada en forma separada:** No empiece a gran escala. Dé la oportunidad a su municipio y a sus ciudadanos para adquirir experiencia en la separación de residuos, y en la planeación y operación de plantas de biogás.
- » **Incremente la cooperación con el sector privado:** Los municipios no podrán enfrentar los retos del futuro de la gestión de RSU solos. Por lo tanto, las autoridades locales tendrán que crear un entorno de confianza y condiciones de marco legal y financiero confiables para que el sector de residuos se vuelva atractivo para inversionistas y operadores.

**Para compañías nacionales e internacionales:**

- » **Desarrolle técnicas de incineración adecuadas para las condiciones locales:** Las plantas de incineración instaladas en países industrializados son demasiado costosas para la mayoría de las ciudades en los países en vías de desarrollo. Existe la necesidad global de desarrollar nuevas y apropiadas tecnologías que consideren la composición de los residuos en las ciudades de países en vías de desarrollo, para que se pueda financiar la inversión y los costos operativos.
- » **Evite la generación de mala reputación para el sector:** El éxito de los proyectos de aprovechamiento energético de residuos en el mediano y largo plazo depende de la reputación de las plantas debidamente operadas. Las asociaciones industriales y las compañías individuales deben minimizar el riesgo de que las plantas de aprovechamiento energético de residuos se conviertan en costosos ‘elefantes blancos’.

## Anexo A: Descripción de los parámetros de la matriz de decisiones

### 1. NIVEL GENERAL DE GESTIÓN DE RESIDUOS

- » Un requerimiento básico para la implementación exitosa de proyectos de aprovechamiento energético de residuos es la existencia de sistemas de gestión de residuos avanzados basados en la recolección y tratamiento separados de los flujos de residuos provenientes de diferentes fuentes. La biomasa, como los residuos de cocina y jardín, se someten a un proceso de digestión/composta. Los reciclables como el papel, cartón, PET, vidrio, metales etc. se clasifican y se canalizan a la industria de reciclado. La gestión de residuos peligrosos está controlada. Las fracciones de RSU remanentes que no se pueden reciclar, se disponen en rellenos sanitarios controlados.
- » La experiencia internacional indica que la implementación de proyectos de coprocesamiento y recolección de gases de rellenos sanitarios con tecnología de punta, pueden ser exitosos si existe un mecanismo sistemático de recolección de residuos y si son seleccionados algunos residuos específicos, como llantas o biomasa, se pueden canalizar hacia las instalaciones. La digestión anaerobia requiere la recolección separada de biomasa porque cualquier contaminación con otras fracciones de RSU, puede causar problemas en el proceso y con el uso del digestato en la agricultura. A este nivel de gestión de residuos, se deberá evaluar la conveniencia de la incineración como proceso antes de iniciar un proyecto – pudiéndose requerir algunas mejoras al sistema de gestión de residuos.
- » Si no se dispone de métodos de reciclado sistemático, la captura de gas de relleno sanitario podría ser la opción viable, ya que no requiere una mejora sustancial del nivel general de gestión de RSU.
- » Debido a la poca experiencia y a los altos costos de capital y operativos, se deberá considerar la aplicabilidad y la planeación de proyectos de pirólisis y gasificación con sumo cuidado en todos los niveles de la gestión de RSU.

### 2. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS

- » La separación de RSU en el punto de generación, es decir en los hogares, es la mejor condición previa para el reciclado y también para su aprovechamiento energético. Los residuos peligrosos y los residuos minerales voluminosos deberán ser recolectados y tratados por separado.
- » Como ya se había mencionado, la recolección de residuos orgánicos en forma separada es indispensable para la digestión anaerobia. La digestión anaerobia no es opción si los residuos recolectados en forma separada se mezclan con residuos minerales o peligrosos, ni siquiera aún en pequeñas cantidades.
- » Si los RSU se mezclan en forma regular con fracciones minerales o peligrosas, la conveniencia de cada tecnología de aprovechamiento energético debe evaluarse en forma regular. Se deberán implementar medidas para mejorar la separación de residuos en el punto de origen (por ejemplo, recolección y tratamiento separados de residuos de construcción y demolición, y de baterías).
- » La recolección de gas de relleno sanitario sigue siendo una opción relevante en casos donde los rellenos sanitarios contienen importantes niveles de residuos orgánicos.

### 3. PODER CALORÍFICO DEL RSU PARA PROCESOS TÉRMICOS, CONTENIDO ORGÁNICO

- » Se debe asegurar la disponibilidad de combustión autotérmica (combustión autosostenida sin la necesidad de agregar combustibles adicionales) de RSU a lo largo del año para incineración y coprocesamiento. La co-combustión de combustóleo, gas u otros combustibles es costosa y sólo se debe recurrir a ella para el arranque del proceso de combustión o en casos de emergencia. Para la incineración y el coprocesamiento, el poder calorífico es uno de los indicadores para decidir si el RSU es idóneo para el proceso. Un alto contenido de minerales en los residuos de construcción y demolición, en vidrio y ceniza, un alto contenido de metales o de humedad en residuos de cocina o jardín reducen el poder calorífico. Poderes caloríficos > 8 MJ/kg indican que todas las tecnologías de combustión son opciones idóneas para proyectos de aprovechamiento energético de residuos.

- » Las tecnologías de incineración con una etapa de secado integral avanzado son capaces de quemar RSU húmedos con un poder calorífico de alrededor de 7 MJ/kg. Para el coprocesamiento, se debe definir el contenido de humedad mínimo aceptable y se deberán evaluar las tecnologías de secado antes de arrancar el proyecto de aprovechamiento energético.
- » Si el poder calorífico es < 7 MJ/kg debido a la humedad, se debe aclarar el contenido de humedad mínimo aceptable para todas las tecnologías de combustión, y se deberán evaluar las tecnologías de secado. Cuando los residuos minerales son la razón principal de un bajo poder calorífico, la gestión de residuos debe mejorar primero antes de aplicar las opciones de aprovechamiento energético de residuos.
- » El PCI de los procesos térmicos no se puede comparar directamente con la recolección del gas de relleno sanitario y la digestión anaerobia. No obstante, el contenido energético del sustrato para un digestor anaeróbico tiene un impacto sobre el contenido de energía del rendimiento del biogás. Los sustratos con mayor contenido energético pueden aumentar la calidad del biogás. La eficiencia de la recolección de gas de relleno sanitario depende de las condiciones que prevalezcan en el relleno sanitario, incluyendo la proporción de residuos orgánicos depositados y la forma en la que los residuos se colocan en estratos.

#### 4. CANTIDADES ADECUADAS DE RESIDUOS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

- » La elección de una tecnología de aprovechamiento energético de residuos también depende de los volúmenes de residuos disponibles, y del requisito mínimo de operación económicamente robusto. En este contexto, “disponibles” hace referencia a fracciones de residuos adecuados que se pueden suministrar a costos aceptables a la instalación, y que no se pueden reciclar en forma rentable. Una planta de aprovechamiento energético de residuos no deberá generar un efecto de bloqueo en la infraestructura, que desincentive la construcción de infraestructura de reciclado para los flujos de residuos afectados.
- » Si se dispone de más de 150,000 toneladas métricas de residuos al año, todas las tecnologías son aptas. Sin embargo, debido a la limitada experiencia internacional en pirólisis y gasificación, las otras tecnologías resultan más favorables.
- » Para volúmenes de residuos entre 50,000 y 150,000 toneladas métricas por año, deberá evaluarse con atención la efectividad de la incineración en términos de costo. El coprocesamiento, la recolección de gas de relleno sanitario y la digestión anaerobia resultan más favorables.
- » Para volúmenes menores a 50,000 toneladas métricas, la incineración es demasiado costosa. La efectividad del coprocesamiento en términos de costo puede verse afectada por los bajos precios del carbón y del coque de petróleo. Si los volúmenes están por debajo de 10,000 toneladas métricas por año, la digestión anaerobia podría ser la única tecnología favorable si la calidad de la biomasa es aceptable.
- » La recolección de gas del relleno sanitario depende de la cantidad de contenido orgánico en el relleno sanitario y puede ser una opción adecuada como medida retroactiva después del cierre del relleno sanitario, – restando relevancia a este parámetro – siempre y cuando se pueda recolectar suficiente metano para que la tecnología resulte eficiente en términos de costo.

## 5. OPERACIÓN EFICIENTE DE INSTALACIONES DE GESTIÓN DE RESIDUOS

- » Las instalaciones para la gestión de residuos pueden ser operadas por el sector público, el sector privado o en cooperación. La experiencia nacional con rellenos sanitarios debidamente gestionados, plantas de tratamiento de aguas residuales de gran dimensión (sector público) y grandes plantas de procesos químicos y plantas cementeras (sector privado) indica que los sistemas complejos se pueden manejar a nivel local. No obstante, para tecnologías extranjeras de aprovechamiento energético de residuos, se debe asegurar mediante contratos el apoyo a largo plazo del proveedor de la tecnología en cuestión. Aprendiendo de proyectos fallidos para la gestión de residuos del pasado, queda claro que el aprovechamiento energético de residuos requiere una gestión experimentada y personal técnico debidamente capacitado. La buena comunicación entre actores públicos y privados es una condición previa esencial. Bajo tales condiciones, todas las tecnologías pueden ser candidatos exitosos para un proyecto de aprovechamiento energético de residuos, con la excepción de la pirólisis y la gasificación debido a la limitada experiencia internacional con RSU heterogéneos.
- » La mayoría de los actores requieren el desarrollo de capacidades para proyectos de aprovechamiento energético de residuos, incluso si tienen experiencia en la gestión de infraestructuras de tratamiento de residuos. Las plantas cementeras a menudo están en manos de compañías internacionales con conocimiento interno del tipo de coprocesamiento que pueden ofrecer. La recolección de gas de relleno sanitario es, en términos técnicos, el enfoque más simple. Estas dos tecnologías son las más favorables mientras se reúne mayor conocimiento local en las demás tecnologías.
- » Si los actores públicos tienen experiencia limitada en el aprovechamiento energético de residuos, y el reclutamiento de personal calificado nacional se dificulta, la recolección de gas de relleno sanitario sería la tecnología más favorable. La necesidad de desarrollo de capacidades para el coprocesamiento y la digestión anaerobia se deberá evaluar con atención; es más fácil de cubrir que las necesidades de la incineración y de la pirólisis y la gasificación.
- » Si ni los actores públicos ni los privados tienen experiencia en la operación de sistemas de aprovechamiento energético de residuos, la recolección de gas de relleno sanitario sería la única oportunidad después de cierto nivel de desarrollo de capacidades básicas.

## 6. TIEMPOS Y DISTANCIAS DE TRANSPORTE ADICIONALES DE RSU A PLANTAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

- » Además del acceso de los usuarios finales a la energía generada, también se debe considerar el impacto económico y ambiental de los esfuerzos adicionales de transporte a las instalaciones de aprovechamiento energético. Cada kilómetro adicional de transporte por carretera de los residuos incrementa el costo de la recolección, al igual que la congestión y la emisión de gases de efecto invernadero en áreas metropolitanas. En forma ideal, la distancia o el tiempo de transporte por carretera de los residuos deberían ser los mismos que para el sistema de gestión de residuos existente, o incluso menores.
- » Un aumento en los tiempos de transporte de menos de 1 hora o una distancia adicional de menos de 50 km se considera tolerable para proyectos de aprovechamiento energético de residuos. En caso de un aumento de tiempo de transporte adicional >1 hora o una distancia de transporte adicional > 100 km, el contenido energético de los residuos transportados debería ser lo suficientemente alto como para que resulte económica y ambientalmente conveniente. Para distancias de transporte adicionales > 200 km, el ferrocarril sería el único medio de transporte legítimo, pero es difícil de gestionar y posiblemente sea poco realista para el caso de RSU.
- » La recolección de gas de rellenos sanitarios existentes implica que los residuos se transportarán a la misma distancia. Los nuevos sitios de rellenos sanitarios deben tomar en cuenta las distancias para maximizar la eficiencia de la recolección.

## 7. COMERCIALIZACIÓN Y/O DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS DEL PROCESO

- » Excepto el coprocesamiento en plantas cementeras y la recolección de gas de relleno sanitario, todas las demás tecnologías de aprovechamiento energético de residuos generan residuos del proceso. Si, en la situación actual, existe un mercado para residuos de proceso similares, y los residuos peligrosos se pueden disponer o confinar en forma segura en un relleno sanitario o sitio controlado cercano a la planta de aprovechamiento energético de residuos, todas las tecnologías se pueden considerar candidatas para un proyecto de aprovechamiento.
- » Si no existe un mercado para los residuos del proceso pero todos los residuos del proceso se pueden disponer en forma segura en un relleno sanitario controlado cercano a la planta, entonces la viabilidad económica de la incineración, la digestión anaerobia y la pirólisis y gasificación debe evaluarse con atención. El coprocesamiento y la recolección de gas de relleno sanitario serían opciones más favorables en esta situación.
- » La digestión anaerobia no es una opción viable si las distancias de transporte para la venta de la composta son grandes, y si no existen prospectos de mercados a largo plazo. Un factor determinante en ello es la composta de alta calidad que resulta de los flujos de residuos orgánicos debidamente separados y controlados.

## 8. MARCO LEGAL Y REQUISITOS AMBIENTALES PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

- » La existencia de un marco legal integral para la gestión de residuos es una condición previa para el éxito de un proyecto de aprovechamiento energético de residuos. La legislación debe incluir altos estándares ambientales para emisiones al aire, agua y suelos, olores y ruido, al igual que requisitos de salud y seguridad. También debe definir el papel del aprovechamiento energético de residuos dentro de un sistema integral para la gestión de residuos. La legislación debe adaptarse a las circunstancias nacionales, no sólo copiarse de un país industrializado.
- » Los mecanismos para el cumplimiento efectivo de la legislación, deberán minimizar prácticas ilegales de manejo de residuos para asegurar una cadena de suministro funcional hacia las instalaciones de aprovechamiento energético de residuos. No obstante, la legislación debe buscar la cooperación con el sector informal para fines de logística de recolección en lugar de marginalizarlo todavía más. Se debe garantizar el cumplimiento de estándares internacionales sobre límites de emisión, monitoreo e implementación. Las autoridades públicas deben estar lo suficientemente bien capacitadas y equipadas como para poder garantizar la observación de estándares ambientales.
- » Mientras que el coprocesamiento y la recolección del gas de rellenos sanitarios aprovechan principalmente instalaciones existentes a menudo ya reguladas; los procesos de digestión anaerobia, pirólisis e incineración de residuos requieren legislación más específica, como la definición de las opciones de reutilización de los residuos del proceso. Aun así, el marco legal actual puede contener algunas deficiencias. Los cambios para permitir la aplicación de tecnología de punta para coprocesamiento y recolección de gas de relleno sanitario con frecuencia sólo requieren la modificación de ordenanzas y estatutos, que tiende a ser más sencillo que el proceso político para crear nuevas leyes. Bajo dichas condiciones, el coprocesamiento y la recolección de gas de relleno sanitario con tecnologías de punta deben considerarse tecnologías más fáciles de implementar, mientras que otras tecnologías para el aprovechamiento energético de residuos requieren el desarrollo de marcos legales más extensos antes de su implementación.
- » En algunos países existe un conceso político para adaptar los marcos legales al aprovechamiento energético de residuos. Dependiendo del avance en la elaboración de un marco legal integral, podría tener sentido iniciar el proceso para la formulación o enmienda de leyes y estatutos para coprocesamiento, recolección de gas de relleno sanitario y digestión anaerobia como tecnologías favorables.
- » En algunos países se prohíbe el tratamiento térmico de residuos, excluyendo al coprocesamiento, la incineración, la pirólisis y la gasificación. Una tecnología de aprovechamiento energético de residuos sólo se puede considerar apropiada si no está en contradicción con la jerarquía de residuos o con la estrategia de gestión de residuos general de un país o estado.

## 9. FINANCIAMIENTO DE LA GESTIÓN DE RSU

- » La disponibilidad consistente de medios financieros es crucial para la aplicación de tecnologías de aprovechamiento energético de residuos en el largo plazo. Se debe asumir que los proyectos de aprovechamiento energético de residuos resultarán en mayores costos de tratamiento, que en el caso de los rellenos sanitarios. Las tablas 2-6 muestran la proyección de los costos netos por tonelada de residuo para proyectos típicos de aprovechamiento energético de residuos considerando las cinco tecnologías.
- » Antes de considerar el aprovechamiento energético de residuos como una posibilidad, los municipios deben ser capaces de cubrir la totalidad de los costos de recolección y disposición final de RSU en un relleno sanitario controlado; debe existir disponibilidad a otros medios financieros para cubrir costos adicionales fácilmente. En el largo plazo, sería deseable el cobro de una cuota a los generadores de residuos basada en el principio de “el que contamina, paga”, mientras que los costos de gestión actuales se pueden cubrir principalmente con el presupuesto del municipio. En particular, el aumento de la cuota por el uso de rellenos sanitarios puede hacer que otras opciones de gestión de residuos resulten más viables.
- » Si el aumento de la cuota por residuos no es factible, o si los municipios no quieren o no pueden incrementar su presupuesto, se requerirá una evaluación detallada de costos por parte de expertos independientes y/o la búsqueda de financiamiento alternativo a largo plazo mediante instrumentos de financiamiento variados antes de iniciar un proyecto de aprovechamiento energético de residuos. En casos donde no se establezcan opciones de financiamiento a largo plazo, los municipios probablemente se quedarán con la cuenta en la mano – lo que resulta en el paro de operaciones o en costos adicionales indeseados para el municipio.

## 10. ACCESO A REFACCIONES Y A DIVISAS EXTRANJERAS

- » El acceso a divisas extranjeras es esencial para la compra de refacciones que no están disponibles a nivel local, ya que de otra forma la falla de componentes conducirá al paro de operaciones o a la falta de cumplimiento de estándares operativos.
- » Si las refacciones se pueden adquirir localmente y no existen restricciones sobre la compra de refacciones con divisas extranjeras, se pueden considerar todas las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos.
- » Cuando la mayoría de las refacciones se pueden adquirir localmente y existen oficinas de venta para la importación de refacciones, se deberán evaluar los costos esperados y el acceso a divisas extranjeras antes de iniciar un proyecto de aprovechamiento energético de residuos. La recolección de gas de relleno sanitario se considera menos crítico.
- » Si la tecnología clave de la planta de aprovechamiento energético de residuos se tiene que importar, o si se esperan retrasos por las adquisiciones en monedas extranjeras, entonces las opciones de incineración, pirólisis y gasificación no se deben contemplar. Si no se tiene acceso a divisas extranjeras, la recolección de gas de relleno sanitario podría ser la única opción, pero también requerirá de una evaluación de costos.

## 11. ACCESO DE LOS USUARIOS FINALES A LA ENERGÍA OBTENIDA DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

- » La elección de una ubicación para una instalación de aprovechamiento energético de residuos depende, entre otras cosas, del acceso de los usuarios finales a la energía. La elección de la ubicación y los ingresos deberán revisarse antes del arranque del proyecto. Las zonas industriales se pueden beneficiar de la electricidad, del calor o del biogás generados. Las inversiones en redes térmicas para el suministro del vapor generado en el proceso son altas, pero pueden generar ingresos valiosos. El gas de relleno sanitario y el biogás de las instalaciones de digestión anaerobia se pueden alimentar a las redes de gas cuando existen ductos cercanos. La sustitución de diésel con biogás o gas de relleno sanitario (GRS) como combustible para la transportación también es una opción de alto valor. La ubicación de sitios para recolección de gas de relleno sanitario y coprocesamiento por lo general viene previamente definida por los rellenos sanitarios, cementeras o plantas eléctricas ya existentes.
- » Si el proyecto se ubica en áreas con cero o moderada demanda térmica o de gas, los ingresos de las ventas de energía serán menores. La transformación de todo el calor en electricidad es una opción, pero no es la más económica, ya que el índice de eficiencia es mucho menor que el uso directo de gas o de vapor. Las ubicaciones con mala conexión a los usuarios finales de la energía están en sustancial desventaja para el aprovechamiento energético de residuos, porque dicha deficiencia de conectividad implica el uso limitado de la energía recuperada y mayores costos operativos netos.

## 12. INCENTIVOS PARA UNA GENERACIÓN DE ENERGÍA DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO

- » La venta de la energía generada por residuos, es decir la electricidad, el gas y el calor, está sujeta a ser excluida del mercado energético por las fluctuaciones en el precio de combustibles fósiles convencionales, como el combustóleo, el carbón y el gas. Ello pone en peligro la viabilidad económica de la planta, requiriendo ingresos seguros de la venta de energía de las plantas de aprovechamiento energético de residuos, para garantizar ingresos estables a largo plazo para la gestión de residuos. Los incentivos regulatorios (como tarifas de alimentación) para la generación de energía de baja emisión de carbono no sólo serán un apoyo para los proyectos de aprovechamiento energético de residuos, sino que también contribuirán a las metas de mitigación nacionales definidas en las CND (Contribuciones Nacionalmente Determinadas) del Acuerdo de París sobre el Cambio Climático.
- » Una aplicación ya exitosa de incentivos para producción de energía con bajas emisiones de carbono, indica un buen potencial para tecnologías de aprovechamiento energético de residuos. Si existen incentivos, pero aún no se aplican, entonces primero se deberá evaluar la efectividad de los incentivos para proyectos de incineración, digestión anaerobia, pirólisis y gasificación.
- » Sin una perspectiva realista de incentivos, todas las plantas para aprovechamiento energético de residuos deberán clasificarse como riesgosas.

## Anexo B: Literatura adicional

### EU WASTE TREATMENT & THERMAL TREATMENT REFERENCE DOCUMENTS

European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Brussel, 2006.

European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Treatment, Brussel, Draft December 2015.

<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

### EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

CWG Waste to Energy Rapid Assessment Tool, 2016

[https://www.giz.de/de/downloads/giz2016-en-cwg\\_Rapid-Assessment-Tool\\_Waste-to-Energy.pdf](https://www.giz.de/de/downloads/giz2016-en-cwg_Rapid-Assessment-Tool_Waste-to-Energy.pdf)

### INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Kamuk B, ISWA Guidelines: Waste to Energy in Low and Middle Income Countries, ISWA – the International Solid Waste Association, August, 2013. [www.iswa.org](http://www.iswa.org)

World Bank Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration, 1999.

<http://web.mit.edu/urbanupgrading/urbanenvironment/resources/references/pdfs/MunicipalSWIncin.pdf>

### PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DERIVADOS DE RESIDUOS Y COPROCESAMIENTO

GTZ-Holcim Public Private Partnership, Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production, 2006. <http://coprocem.com/>

UNEP, Basel Convention, Technical guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous wastes in cement kilns. Geneva, 2012

<http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx>

### DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Vögel Y, Riu C, Gallardo A, et al., 2014, Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries.

<https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A10842/datastream/PDF/view>

Wellinger A, Murphy J, Baxter D, 2013, The Biogas Handbook. Science, production and applications. Woodhead Publishing

Biogas Safety First! Guidelines for the safe use of Biogas Technology, Fachverband Biogas e. V. and GIZ, November 2016. <http://www.biogas-safety.com>

### CAPTURA DE GAS DE RELLENO SANITARIO

U.S. Environmental Protection Agency, Landfill gas cost energy model, landfill methane outreach program (LMOP), Version 3.0, August 2014

[https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/lfgcost-webv3\\_manual.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/lfgcost-webv3_manual.pdf)

## Referencias

- [1] D. C. Wilson, L. Rodic, P. Modak, R. Soos, A. Carpintero, C. Velis, M. Iyer and O. Simonett, “Global Waste Management Outlook,” United Nations, Environment Program and International Solid Waste Association, Osaka and Wien, 2015.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights,” United Nations, New York, 2014.
- [3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, “Sustainable Development Challenges,” United Nations, New York, 2013.
- [4] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “World Population Prospects: The 2015 Revision,” United Nations, New York, 2015.
- [5] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Studies, “Patterns of Urban and Rural Population Growth,” Department of Economic and Social Affairs, New York, 1980.
- [6] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “Probabilistic Population Projections based on the World Population Prospects: The 2015 Revision,” United Nations, New York, 2015.
- [7] D. Hoornweg and P. Bhada-Tata, “What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series; Knowledge Papers no. 15,” World Bank, Washington, D.C., 2012.
- [8] A. Mavropoulos, D. Wilson, C. Velis, J. Cooper and B. Appelqvist, “Globalization and Waste Management. Phase 1: Concepts and Facts,” International Solid Waste Association, Wien, 2012.
- [9] Ellen MacArthur Foundation , “Towards the Circular Economy, Opportunities for the Consumer Goods Sector,” 2013.
- [10] CWG, Collaborative Working Group on Solid Waste Management in Low and Middle Income Countries, “CWG Rapid Technology Assessment Tool,” 2016.
- [11] EAWAG; Sandec, “Global Waste Challenge, Situation in Developing Countries,” Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology and Sandec, Dübendorf, 2008.
- [12] EU, “Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control),” EUR-Lex, Brussel, 2010.
- [13] EU, “Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration,” European Commission, Brussel, 2006.
- [14] Diagram supplied by Doosan Lentjes GmbH and adapted for this guide.
- [15] The World Bank, “Municipal Solid Waste Incineration,” The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C., 1999.
- [16] CEMBUREAU, “Activity Report 2015,” The European Cement Association, Brussel, 2015.
- [17] GIZ, “Guideline, Application of Waste-to-Energy in Vietnam,” 2015.
- [18] D. Mutz and V. Nandan, “Co-processing Waste Materials in Cement Production. The GTZ-Holcim Public Private Partnership,” International Journal of Environmental Technology and Management, pp. 300-309, 2006.

- [19] EU, "Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3) WRc Ref: CO5087-4," European Commission, Brussel, 2003.
- [20] Secretariat of the Basel Convention, "Technical Guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous waste in cement kilns," 2012.
- [21] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), "Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing," 2014.
- [22] CDM -Executive Board, "Project Design Document CEMEX Mexico: Biomass project at Huichapan cement plant, Version 3," 2012.
- [23] A. Wellinger, J. D. Murphy and D. Baxter, *The Biogas Handbook. Science, Production and Applications*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- [24] Y. Vögeli, C. R. Lohri, A. Gallardo, S. Diener and C. Zurbrügg, "Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries," EAWAG, Dübendorf, 2014.
- [25] Image adapted from p. 8 of "Biowaste to Biogas", Fachverband Biogas, Freising, 2016. [Online] Available: <http://www.biowaste-to-biogas.com/>.
- [26] Fachverband Biogas, "Biowaste to Biogas," Freising, 2016.
- [27] U. Baserga, "Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, FAT Bericht Nr. 5," Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, 2000.
- [28] R. Whyte and G. Pery, "A rough Guide to Anerorbic Digestion Costs and MSW Diversion," Renewable Energy, 2001.
- [29] J. Rapport, R. Zhang, B. M. Jenkins and R. B. Williams, "Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste," California Environmental Protection Agency, 2008.
- [30] UNFCCC, "United Nation Framework Convention on Climate Change," [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>. [Accessed May 2016].
- [31] K. Wang-Yao, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, S. h. Gheewala and A. Nopharatana, "Seasonal Variation of Landfill Methane Emissions from Seven Solid Waste Disposal Sites in Central Thailand," in *The 2nd Joint Internation Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)*, Bangkok, 2006.
- [32] Image based on "[http://www.advanceddisposal.com/media/10751/landfill\\_gas\\_to\\_energy\\_diagram\\_946x333.jpg](http://www.advanceddisposal.com/media/10751/landfill_gas_to_energy_diagram_946x333.jpg)," [Online].
- [33] EPA, "LFG Energy Projects, frequently askeed questions. [www3.epa.gov/lmop/faq/lfg.html](http://www3.epa.gov/lmop/faq/lfg.html) visited August 2016".
- [34] CDM - Executive Board, "Project Design Document, Salvador da Bahia Landfill Gas Management Project, Version 8.2," 2016. [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects>.
- [35] C. -. E. Board, "Project Design Document, Tianjin Shuangkou Landfill Gas Recovery and Electricity Generation, Version 9, 2014. Available: <https://cdm.unfccc.int/Projects>."
- [36] "www.dgengineering.de," [Online]. Available: <http://www.dgengineering.de/images/Fliessbild-Pyrolyse-D-1.jpg>.
- [37] F. H. W, "Case Study Thermo Select Facility Karlsruhe," TNO Environment, Energy and Process Innovation, Netherlands, 2002.



Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Oficinas registradas  
Bonn y Eschborn

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40  
53113 Bonn, Alemania  
T +49 228 4460-0  
F +49 228 4460-1766

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5  
65760 Eschborn, Alemania  
T +49 6196 79-0  
F +49 6196 79-1115

E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)

Por encargo de



Ministerio Federal de  
Cooperación Económica  
y Desarrollo