

COMPETENCIA SOBRE AGUA, ENERGÍA Y AMBIENTE

5° ciclo - año 2011

Bibliografía 15° programa:

Temas:

1) Gestión integral de Residuos Sólidos Urbanos

2) Energía de hidrógeno

1 - Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU)

INTRODUCCIÓN

Todas las actividades humanas generan residuos y estos deben ser gestionados y dispuestos en forma ambientalmente correcta, minimizando los posibles impactos sobre la salud y el medio ambiente.

En el último siglo las actividades humanas han producido una enorme degradación del medio ambiente. El crecimiento exponencial de la población combinada con un incremento del consumo, ha llevado a una explosión en la cantidad de residuos producida. Al mismo tiempo resulta difícil encontrar sitios para la instalación de rellenos sanitarios.

Encontrar una solución a la crisis de la gestión de los residuos no es sencillo. El problema es grande, vital en términos de impacto al medio ambiente y complejo en alcance, involucrando no solamente a los aspectos técnicos sino también a los sociales, políticos y regulatorios.



RESIDUOS SÓLIDOS: UNA CONSECUENCIA DE LA VIDA

Todas actividades humanas generan residuos desde el comienzo de la humanidad, por lo tanto la generación de residuos sólidos son una consecuencia de la vida.

Antes de la revolución industrial, los residuos estaban compuestos principalmente de cenizas, maderas, huesos y restos de materiales orgánicos. Estos eran dispuestos en la tierra, donde actuaría como estiércol vegetal y ayudaría a mejorar el suelo.

Los antiguos sitios de disposición excavados por arqueólogos revelan solamente pequeñas cantidades de cenizas, herramientas rotas y de restos de cerámica, en esa época se reparaba y reutilizaba todo lo posible. A medida que fueron creciendo las poblaciones resultó necesario el desarrollo de sistemas de disposición final de los residuos, tal cual fue observado en Creta, Atenas y Roma, que debieron organizar primitivos “rellenos sanitarios”, en las afueras de las Ciudades. Los pobladores no entendían que los residuos eran un problema para la Salud, se limitaban a quemar sus residuos, enterrarlos o arrojarlos a las calles. Este arrojado indiscriminado de residuos, generó condiciones insalubres en la población, debido a los olores nauseabundos y la proliferación de ratas y vectores en las Ciudades. Documentos históricos atenienses, 500 años AC, indican la prohibición de la descarga de residuos en las calles de la ciudad y normas que establecían que debería ser dispuesta a una distancia mayor a 1,5 kilómetros de las puertas de la Ciudad.

A partir del año 1300, debido a la gran cantidad de residuos depositados en las ciudades en Gran Bretaña, se reglamentó una ley que establecía que se debía realizar una limpieza de los frentes de las casas, pero no fue acatada por la población. Los residuos eran quemados a cielo abierto en los hogares o en la parte externa. Debido a las deficientes condiciones sanitarias, durante el siglo XIII, se

expandió la terrible epidemia de peste negra por Europa Occidental y África del Norte, que provocó la muerte de alrededor de 75 millones de personas (estimándose el 50% del total de la población de Europa en ese momento).

La Revolución Industrial, en el siglo XVII, produjo una necesidad de disponibilidad de materias primas y un considerable aumento en las poblaciones urbanas (en busca de trabajo), estimulando el desarrollo de nuevas invenciones y maquinarias. Estas poblaciones en crecimiento, así como la producción industrial creciente contribuyeron a la mayor generación de residuos sólidos.

Los gobiernos comenzaron a tomar cartas en el asunto debido a los potenciales problemas de una mala gestión de efluentes y los residuos, comenzando así con la era del Saneamiento. A partir de ese momento se comenzaron a desarrollar sistemas organizados de recolección y disposición de los residuos, que se van optimizando continuamente.

GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN UNA SOCIEDAD TECNOLÓGICA

Antes de la Revolución Industrial, los residuos generados eran en su gran mayoría del tipo orgánicos –fácilmente biodegradables-, (desechos de alimentos, restos de poda, huesos, etc.), y materiales inertes (cenizas, restos de cerámica, etc.). A partir de la Revolución industrial, los residuos sólidos generados comenzaron aumentar en cantidad y en peligrosidad (debido al comienzo de la fabricación de productos químicos de alta toxicidad). Los beneficios de las nuevas tecnologías, vinieron asociados con los problemas de la gestión de residuos resultantes.

A partir de los años 1960 a 1970, comenzó a generalizarse la utilización de envases y embalajes (E&e) para distintos productos que anteriormente se comercializaban en forma suelta o al peso. Esto generó un aumento gradual de la cantidad de residuos, ya que los envases y embalajes son descartados luego del consumo del contenido. En la actualidad alrededor del 25-30% del total de los RSU generados corresponden a E&e, compuestos por cartones, diferentes tipos de plásticos, vidrios, etc.

Por otra parte, la calidad de los residuos sólidos ha variado en los últimos años debido a los cambios en los hábitos y costumbres de la población asociados a la nueva comercialización de los productos alimenticios (congelados, pre-elaborados, etc.), así como la proliferación de los alimentos procesados (delibery). Esto conlleva a un aumento del contenido de plásticos y cartones y una disminución de la presencia de desechos alimenticios (restos de la preparación y consumo de alimentos).

SISTEMA DE GESTION INTEGRAL DE LOS RSU

Los residuos sólidos comprenden todos aquellos que provienen de las actividades humanas, que normalmente son sólidos (semisólidos), y desechados como inútiles o superfluos por los propios generadores. Son una consecuencia de la vida; todas las actividades los generan.

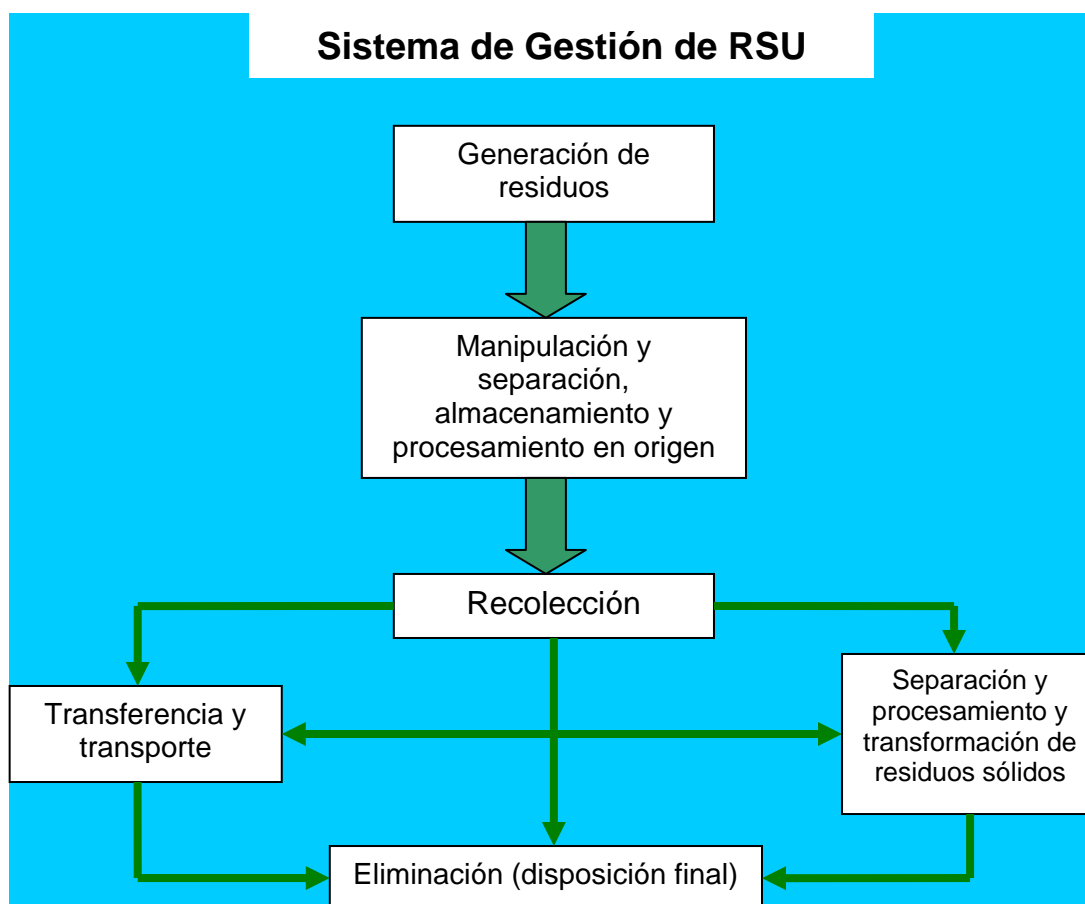
“La Gestión de Residuos Sólidos (GRSU) es la disciplina asociada al control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y disposición final de los residuos, en forma armónica con los mejores principios de la salud pública, de la economía, de la ingeniería, de la conservación, de la estética y de los principios ambientales, respondiendo a las expectativas del público”.¹

¹ Tchobanoglous, G. et al. (1994), *Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues*, Mc Graw-Hill.

Los elementos funcionales de un Sistema de GRSU son:

- Generación
- Manipulación y separación, almacenamiento y procesamiento en origen
- Recolección
- Separación y procesamiento, transformación de residuos sólidos
- Transferencia y transporte
- Disposición final

Los distintos elementos se encuentran interrelacionados, observándose que cualquier modificación tiene un efecto directo sobre los siguientes, tal cual se presenta en la siguiente figura.



JERARQUIA DE LA GESTION DE LOS RESIDUOS

Tal cual lo establecido en la Jerarquía de la Gestión de Residuos (Agenda 21 – Río 1992), la tendencia en la GRSU, es maximizar la reducción en origen (rango más alto de la jerarquía), que implica reducir la cantidad de residuos y/o toxicidad de estos, mediante la implementación de nuevas legislaciones, tales como leyes de envases y embalajes.

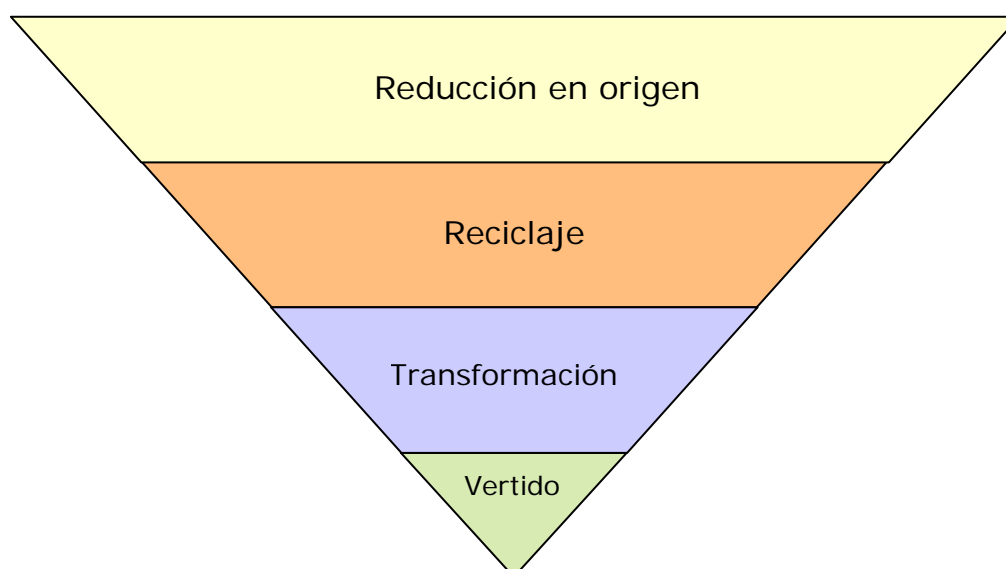
La reducción en origen involucra no solamente el compromiso de la comunidad, sino también de las autoridades nacionales y provinciales que propicien leyes, incentivos industriales e impositivos para la industria, con continuidad en el tiempo. Por otra parte, la industria debe realizar cambios tecnológicos, tales como suplantar materias primas tóxicas, fabricar productos con mayor vida útil, o la producción de envases más livianos, biodegradables, utilizando mayor cantidad de materiales reciclados.

Luego en la Jerarquía se propicia el desarrollo de programas de reciclaje de los residuos, así como los tratamientos de transformación en productos de conversión y energía.

En el segundo lugar en la jerarquía GIRS está el reciclaje, que implica la separación y la recuperación de materiales, para su reutilización o reuso, así como la fabricación de nuevos productos. El reciclaje es un eslabón fundamental para minimizar la demanda de recursos naturales y energía, como también para reducir la cantidad de residuos enviados a la disposición final.

Cabe destacar que todos los tratamientos, sean estos físicos, químicos o biológicos, generan residuos que deben ser ambientalmente dispuestos y controlados, ya que no existe “*tecnología de producción nula de residuos*”. Por lo tanto, se puede afirmar que cualquier sistema de Gestión Integral de RSU tendrá que contar como eslabón final en la cadena con un Centro de Disposición Final, tal cual se observa en la Figura que sigue:

Jerarquía de la Gestión Integral de RSU²



MARCO LEGAL APLICABLE A LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RSU

En nuestro país el **artículo 41 de la Constitución Nacional** establece que todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer, según lo establezca la ley. Asimismo, se determina que las autoridades proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales.

² Agenda 21 – Río 1992 - Jerarquía de la Gestión de Residuos - Capítulo 21, el “Manejo Ecológicamente Racional de los Residuos Sólidos”, cuyos postulados fueron retomados y enfatizados en la Cumbre de Johannesburgo 2002. Las conclusiones de ambas cumbres, orientadas a la promoción de acciones, pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- Minimización de la generación,
- Maximización de la reutilización, el reciclado y su comerciabilidad,
- Ampliación del alcance de los servicios relacionados con los residuos.

Por otro lado la **Ley 25916 y Decreto 1158/04**, establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral de los residuos domiciliarios, sean éstos de origen residencial, urbano, comercial, asistencial, sanitario, industrial o institucional, con excepción de aquellos que se encuentren regulados por normas específicas.

Allí se define como gestión integral de residuos domiciliarios al conjunto de actividades interdependientes y complementarias entre sí, que conforman un proceso de acciones para el manejo de residuos domiciliarios, con el objeto de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población.

Establece como objetivos lograr un adecuado y racional manejo de los residuos domiciliarios mediante su gestión integral, a fin de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población; promover la valorización de los residuos domiciliarios, a través de la implementación de métodos y procesos adecuados; minimizar los impactos negativos que estos residuos puedan producir sobre el ambiente; y lograr la minimización de los residuos con destino a disposición final.

Establece la necesidad de aprobación de una Evaluación de Impacto Ambiental para la habilitación de estos centros de tratamiento y disposición final, así como la ejecución de un Plan de Monitoreo de las principales variables ambientales durante las fases de operación, clausura y postclausura.

Determina que los centros de disposición final deberán ubicarse en sitios suficientemente alejados de áreas urbanas y su emplazamiento deberá determinarse considerando la planificación territorial, el uso del suelo y la expansión urbana durante un lapso que incluya el período de postclausura. Asimismo, no podrán establecerse dentro de áreas protegidas o sitios que contengan elementos significativos del patrimonio natural y cultural. Los centros de disposición final deberán ubicarse en sitios que no sean inundables. De no ser ello posible, deberán diseñarse de modo tal de evitar su inundación.

GENERACIÓN DE COMPONENTES POTENCIALMENTE RECICLABLES

De acuerdo a datos del Estudio de Calidad en la Ciudad de Buenos Aires (2008), se consideran los siguientes materiales potencialmente reciclables:

- Papeles y Cartones (entre ellos: diarios y revistas, papel de oficina, papel mezclado y cartones)
- Plásticos (PET, PEAD y PEBD)
- Vidrios (blanco, ámbar y verde de envases y botellas)
- Metales Ferrosos
- Metales no Ferrosos

Se estableció la presencia porcentual de estos componentes y subcomponentes encontrados en los residuos sólidos domésticos (RSD), así como la presencia de contaminantes presentes en el flujo de los residuos, con su grado de afectación particular a cada uno de ellos (50 al 90%, dependiendo de cada material).

Del total de residuos generados y recolectados por los servicios de Higiene Urbana, se estima que el 15,8 % sería material potencialmente reciclable, (aproximadamente más de 415 Toneladas por día).

Cabe destacar que los programas más exitosos en otras ciudades con más de 20 de años de implementación tienen un porcentaje de participación de la comunidad no mayor al 70% del total de la población.

Teniendo en cuenta la predisposición de los vecinos de la CABA a participar en programas de reciclaje, que no necesariamente implican la efectiva participación de estos, se estima que un volumen de **material a ser potencialmente reciclado máximo** de aproximadamente el **11%** en la CABA (aproximadamente **280 a 300** tn/día de RSD)

CONTENIDO DE MATERIALES PARA COMPOSTING Y LOMBRICOMPUESTO

Se llevó a cabo el cálculo del contenido de materiales para composting, teniendo en cuenta el contenido de desechos alimenticios y restos de poda y jardinería, tomando como base los datos del Estudio de Calidad. Del total de residuos generados y recolectados, se estima que el valor promedio de materiales para composting y sería del 30%, que representa aproximadamente más de 800 Toneladas por día para procesar (valor máximo esperado). Dado que el contenido de humedad promedio es de aproximadamente 50%, y el rendimiento estimado del proceso es de 50% - suponiendo un contenido de rechazos e inertes dentro del material biodegrado del 20%-, se estima una generación máxima de 160 tn/día de composting.

Debe tenerse especial cuidado, en el proceso de compostaje respecto de la presencia de materiales tóxicos o peligrosos, que pueden aumentar las concentraciones de salinidad del producto o la presencia de metales pesados, que eventualmente podrían contaminar los suelos donde es aplicado.

RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

La recolección de los residuos sólidos domiciliarios se define como las actividades de la toma de los residuos en el punto de generación, su transporte y descarga en los sitios de transferencia, de procesamiento o disposición final. La recolección de los RSU es una de las partes más críticas de los sistemas de gestión, debido a su alto costo. Cabe destacar que, la recolección de los RSU representa aproximadamente entre el 50 al 70% del total del costo del sistema de gestión.

La recolección se diseña teniendo en cuenta las características de los residuos, las actividades y localización de los generadores (domésticos, comerciales e institucionales), así como las características de las instalaciones domiciliarias y la metodología para el almacenamiento en origen.

La gestión de los servicios de recolección es dificultosa y compleja debido a que la generación, tanto residencial como comercial e industrial, tiene lugar en cada casa, departamento, comercio o instalación industrial, así como en las calles, parques y espacios abiertos. Los patrones de generación son difusos, sumado al aumento continuado de la generación, tornan la logística de este servicio cada vez más compleja.

SERVICIOS DE RECOLECCIÓN

Los servicios de recolección incluyen no solamente la recolección de los residuos sólidos de fuentes diversas, sino también su transporte a las instalaciones donde se descargan. Por otra parte, mientras que las actividades de transporte y descarga son similares para la mayoría de los sistemas, la metodología de recolección en el punto de generación varía según las características de las instalaciones, el tipo de actividades, y la ubicación donde estos se generan, así como el modo y los medios de almacenamiento en origen previo a su recolección.

Recolección de residuos no seleccionados: Se refiere a los residuos sin ningún tipo de selección previa. Esta recolección no es recomendable cuando los residuos

son enviados a una planta de separación y reciclaje, dado que se produce una alta contaminación de los materiales potencialmente reciclables, disminuyendo los porcentajes de recuperación, así como los precios de los materiales recuperados.

Recolección diferenciada: Los materiales potencialmente reciclables separados en origen pueden ser recolectados mediante la recolección en acera, utilizando tanto vehículos convencionales como especiales -con caja compartimentada- o dispuestos en contenedores específicos ubicados en puntos fijos, (por ejemplo: esquinas o áreas verdes). Por otra parte, se ha observado en otros países, que los ciudadanos envían estos materiales a centros de recolección selectiva, ubicados especialmente en supermercados. Cabe destacar que los programas de reciclaje más exitosos, a nivel mundial, son los que realizan la recolección diferencial puerta a puerta, observándose en ellos una tasa de participación más alta de la comunidad.

TRANSFERENCIA Y TRANSPORTE DE RSU

La recolección de los RSU en ciudades y áreas metropolitanas, se realiza mediante camiones compactadores. Estos vehículos al completar su carga, se dirigen a las plantas de tratamiento y/o sitios de disposición final para efectuar la descarga.

Debido al aumento de la población, con el consiguiente crecimiento de las áreas urbanizadas, los centros de tratamiento y disposición final se encuentran cada vez más alejados provocando mayores costos de transporte. Solucionan esta situación las “estaciones de transferencia”. En estas instalaciones, los residuos de los camiones recolectores son transferidos a equipos de transporte de mayor capacidad de carga, con el objetivo principal de abaratar costos de transporte y mantenimiento en los camiones recolectores, que de otra forma estarían siendo usados en una forma y condiciones que no son las especificadas por su diseño.



SISTEMAS DE TRANSFERENCIA

El propósito de los sistemas de transferencia es recibir los residuos sólidos de los vehículos recolectores para transferirlos a un vehículo de mayor capacidad y así ser transportados a la planta de tratamiento o al sitio de disposición final. Estos grandes vehículos suelen ser trailers, vagones de ferrocarril y/o barcos.

En la actualidad, el sistema de transferencia para residuos sólidos municipales es indispensable como solución para las grandes ciudades, debido al progresivo alejamiento de los sitios de tratamiento y de disposición final.

Los trailers de transferencia generalmente transportan una carga útil aproximada de 20-25 toneladas de residuos, y reciben un



promedio de dos a tres vehículos recolectores de gran capacidad (20 a 24 m³). También se pueden utilizar cajas tipo roll-off de menor tamaño según necesidad.

Los tipos de estaciones de transferencia utilizados son:

- Estaciones de carga directa con o sin compactación.
- Estaciones de almacenamiento y carga o indirecta.
- Estaciones combinadas (carga directa e indirecta).

TRATAMIENTO Y DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los métodos utilizados para la recuperación de materiales separados en origen, comienzan con la recolección diferencial y finalizan en una planta de separación y procesamiento adicional de estos materiales previamente segregados en origen.

Las instalaciones para la separación de materiales son más eficientes si se diseñan en forma integral, es decir que no sólo cuenten con una instalación para separación, sino que deben incluir plantas de compostaje, así como de procesamiento de los materiales recuperados para convertirlos en insumos para la industria. Además, deben tener en cuenta normas de seguridad e higiene para garantizar correctas condiciones de trabajo para los operadores.

Por otra parte, dentro de las alternativas de tratamiento se han considerado los procesos de transformaciones químicas y biológicas que se emplean para reducir el volumen y el peso de los residuos, así como para recuperar productos de conversión y energía.

El proceso de transformación química más frecuentemente utilizado es el de incineración, que actualmente se diseña para la recuperación de energía, en forma de calor. El proceso de transformación biológica más comúnmente utilizado es el compostaje aeróbico.

A continuación se resumen las operaciones y procesos de transformación utilizados para el tratamiento de los RSU, así como los principales productos resultantes

Operaciones y procesos de transformación de los RSU			
Procesos de transformación		Medio o método de transformación	Principales productos recuperados y de conversión o transformación
FÍSICOS	Separación de componentes	Separación manual y/o mecánica	Materiales recuperados de los RSU seleccionados y acondicionados
	Reducción de volumen	Operación mecánica	Materiales compactados con la consiguiente reducción de volumen respecto de los componentes originales
	Reducción de tamaño	Operación mecánica	Material triturado de menor tamaño y reducción de volumen respecto de los componentes originales
QUÍMICOS	Combustión	Proceso de oxidación térmica	Dióxido de carbono (CO ₂), dióxido de azufre (SO ₂), agua (H ₂ O) y otros productos de combustión. Material particulado liviano y cenizas
BIOLÓGICOS	Compostaje	Proceso de tratamiento biológico aeróbico	Compost (material húmico utilizado como acondicionados de suelos)
	Lombricultura	Proceso de tratamiento biológico aeróbico	Lombricompuesto (material de la digestión utilizado como mejorador de suelos) + Lombrices (como fuente de proteínas)
	Digestión anaeróbica	Proceso de tratamiento biológico aneróbico	Metano (CH ₄), dióxido de Carbono (CO ₂), trazas de otros gases, humus o fangos digeridos
Fuente: Tchobanoglous, G.(1994), <i>Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues</i> , Mc Graw-Hill			

La eficiencia de los procesos de transformación y procesamiento de los RSU depende directamente de la forma de recolección de los mismos (diferencial o no seleccionados). En el primer caso, ésta es más alta y se producen menores cantidades de rechazos. Las transformaciones químicas y biológicas, tienen como objetivo reducir el volumen y el peso de los residuos, que deben ser dispuestos.

Cabe destacar que de estos procesos se pueden recuperar productos de conversión (composting y lombricomposteo) y energía (calor o vapor).

Separación de Materiales Recuperables

La separación de RSU se realiza para recuperar materiales potencialmente reciclables del flujo de RSU. El reciclaje disminuye el volumen de residuos a ser dispuestos en los rellenos permitiendo, así una mayor conservación de recursos naturales y de energía para la fabricación de nuevos productos, minimizando los impactos para la Salud Pública y el medioambiente. Brinda entonces un beneficio económico y ambiental para la comunidad.

Las transformaciones necesarias para introducir los materiales recuperados al mercado tienen un costo, que en la mayoría de los casos es elevado, porque para que un programa de reciclaje sea exitoso se debe llevar a cabo la segregación en origen (recolección diferenciada) para minimizar la contaminación de los materiales. Se debe además concientizar en forma permanente a la comunidad participante para que tenga en claro los objetivos del mismo y realizar grandes inversiones para que los residuos sean considerados insumos por los consumidores, alcanzando las especificaciones técnicas necesarias, mediante su correcto procesamiento y en condiciones sanitarias y de seguridad, así como desarrollar los mercados para los materiales, evaluándose meticulosamente en que condiciones estos dejan de ser residuos para convertirse en recursos codiciados por los potenciales consumidores.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos (combustión) se utilizan para reducir el volumen y el peso de los residuos que requieren disposición y para recuperar productos de energía. Es un proceso de oxidación química de la fracción orgánica presente en los RSU.

La incineración reduce del 85 a 95% el volumen de la fracción combustible y además se puede realizar la recuperación de energía en forma de calor, pero estos sistemas requieren controles ambientales exhaustivos de las emisiones gaseosas generadas durante el proceso de quemado.

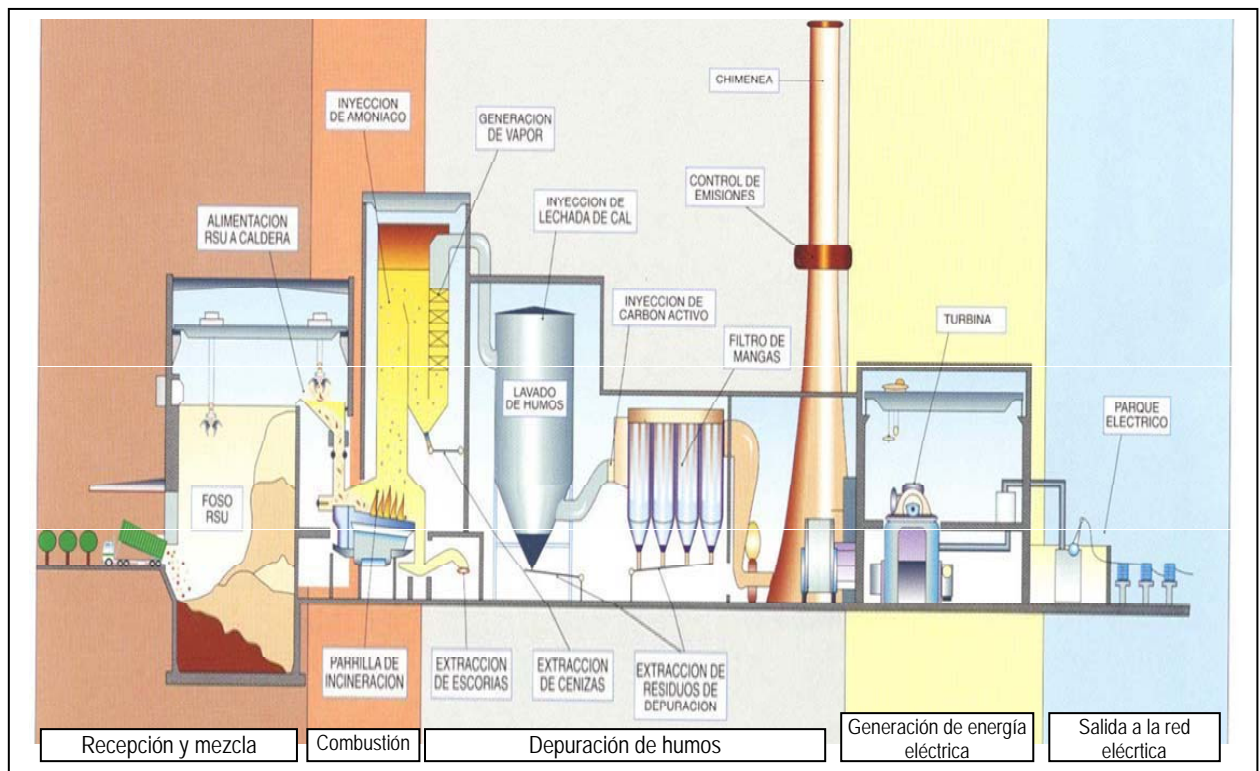
Los elementos principales de los residuos sólidos son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Bajo condiciones ideales, los productos gaseosos derivados de la incineración de RSU (con cantidades estequiométricas de aire) son agua, dióxido de azufre y dióxido de carbono.

Los incineradores actuales poseen un sistema de recuperación de energía para reducir los costos de operación. Esta energía puede recuperarse de los gases calientes de chimenea generados por la incineración de RSU, mediante dos métodos:

- ✓ Uso de una cámara de incineración de pantalla de agua
- ✓ Uso de calderas de calor procedente de residuos

Los sistemas pueden generar:

- Agua caliente: Se puede utilizar para calefacción
- Vapor: Se puede utilizar para calefacción o para generar energía eléctrica



Detalle de Sistema de Incineración

(Tchbanoglous G. et al (1994), Gestión Integral de los Residuos Sólidos. Mc Graw Hill)

Aspectos críticos de la utilización de sistema de incineración

Los aspectos críticos asociados al uso de incineradores para el tratamiento de RSU son:

- Problemas en la localización de las plantas, debido al rechazo de la población a la radicación de incineradores (Efecto Nimby: "Not in back yard", que significa no en mi patio trasero.).
- Necesidad de sistemas de control de emisiones gaseosas de alto costo para alcanzar los estándares de calidad de aire en el entorno tal cual lo establecido en la legislación nacional sobre residuos peligrosos.
- Problemas para la disposición de los rechazos de incineración y de las cenizas generadas durante el tratamiento, así como del material particulado fino, retenido en los filtros de manga o electrostáticos.
- Necesidad de contar con un sistema de tratamiento de los efluentes líquidos generados del lavado de gases mediante scrubbers o lavadores de gases.
- Altos costos de inversión y operación, que hacen que este sistema no sea económico frente a otros tipos de tratamiento.
- Necesidad de contar con un relleno de características específicas para la disposición final de las cenizas, materiales finos y rechazos.
- Necesidad de personal calificado para la operación y mantenimiento de los incineradores.
- Altos de costos de mantenimiento, necesidad de reparaciones periódicas preventivas de las instalaciones del incinerador (refractarios, partes mecánicas).
- Escasa flexibilidad para adaptarse a incrementos en la cantidad de residuos a tratar.

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos son procesos de degradación biológica de la fracción orgánica presente en los RSU. Se utilizan para reducir el volumen y el peso de los residuos que requieren disposición y para recuperar productos de conversión.

La fracción orgánica de los RSU (con excepción de los plásticos, goma y cuero) se puede considerar compuesta por proteínas, aminoácidos, lípidos, hidratos de carbono, celulosa, lignina, etc. Estos componentes orgánicos, tratados mediante un proceso de descomposición aeróbica microbiana, producen un material denominado **humus** (conocido comúnmente como compost).

Los objetivos de estos tratamientos son:

- Transformar materiales orgánicos biodegradables en un material biológicamente estable y reducir el volumen original de los residuos.
- Destruir organismos patógenos, huevos de insectos y otros tipos de organismos no deseables que puedan estar presentes en los RSU.
- Retener al máximo el contenido nutricional (nitrógeno, potasio y fósforo).
- Elaborar un producto que pueda ser utilizado como soporte para el crecimiento de plantas y como mejorador de suelos.

EL RELLENO SANITARIO

La evacuación segura a largo plazo de los residuos sólidos es una componente importante de la gestión integral. La planificación, el diseño y la operación de rellenos implica la aplicación de principios científicos, ingenieriles y económicos. El método más común es el *vertido en tierra*.

El relleno sanitario es actualmente el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación o disposición final de los residuos sólidos. Incluso con la implantación de programas de reducción, de reciclaje o de tecnologías de transformación, es necesaria la disposición de los rechazos en los rellenos.

Se denomina Relleno a la instalación física utilizada para la evacuación en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos.

Se define *Relleno Sanitario* a la instalación de ingeniería para la disposición de RSU, diseñada y operada para minimizar los impactos sobre el medio y la salud pública.

La American Society of Civil Engineers (ASCE) define: “*Relleno Sanitario es la técnica para la disposición de los residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin ocasionar molestias o peligros para la salud y la seguridad pública. Este método utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable. Los residuos así dispuestos se cubren con tierra con la frecuencia necesaria, por lo menos al final de cada jornada*”.

El *vertido* o disposición de los residuos sólidos es el proceso mediante el cual se depositan los residuos sólidos en un relleno. Este incluye el control del flujo de entrada de residuos al relleno, la colocación y compactación de los residuos y la implantación de instalaciones para control ambiental.

Descripción de los componentes de un relleno sanitario

A continuación se realiza una breve descripción de los distintos componentes de un relleno sanitario.

Celda: Es el volumen de material depositado en el relleno durante la operación diaria. La celda incluye los residuos depositados y el material de cobertura.

Nivel: Se denomina a una capa completa de celdas sobre una zona activa del relleno. Los rellenos se conforman con una serie de niveles.

Bermas: Se las utiliza para mantener la estabilidad de la pendiente del relleno, para la localización de las cañerías para recuperación del gas y de los canales para drenaje de agua superficial, y también para controlar la entrada de agua dentro del relleno durante la operación.

Cobertura diaria, que consiste en una capa de suelo natural (o materiales alternativos) de 15 a 30 cm, que se aplica al frente de trabajo del relleno al final de cada período de operación. Los objetivos de la cobertura son controlar el vuelo de materiales residuales, prevenir la entrada o salida de vectores sanitarios (tales como ratas, moscas, etc.) y controlar la entrada de agua dentro del relleno durante la operación.

Cobertura final: Se aplica a toda la superficie del relleno, después de concluir con las operaciones de vertido. Consiste en múltiples capas de tierra y/o materiales como geomembranas, para facilitar el drenaje superficial, interceptar aguas filtrantes y soportar vegetación superficial.

Sistema de impermeabilización: Conjunto de materiales naturales o sintéticos que se utilizan para la cobertura del fondo y las superficies laterales del relleno. Los recubrimientos suelen ser de arcilla compactada, y/o geomembranas sintéticas. El objetivo de la impermeabilización es prevenir la migración de lixiviado y del gas del relleno.

Gas del relleno: Es la mezcla de los gases que se encuentran dentro de un relleno. La mayor parte del gas está formada por metano y dióxido de carbono (productos principales de la descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos) y otros componentes tales como: nitrógeno, amoníaco y trazas de compuestos orgánicos.

Gestión de gases del relleno: Comprende el control del movimiento de los gases del relleno de modo tal de reducir las emisiones atmosféricas, minimizar la salida de emisiones olorosas, minimizar la migración subsuperficial del gas y permitir la recuperación de energía a partir del metano. La gestión incluye los sistemas de captación, extracción, transporte y tratamiento de los gases. Las metodologías de tratamiento utilizadas son quemado o incineración de los gases o su utilización para la producción de energía en forma de electricidad o calor (MDL – Proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio)

Lixiviado: Es el líquido que se acumula en el fondo del relleno. Se genera lixiviado debido a la precipitación que entra dentro del relleno, al agua contenida en los residuos y a la infiltración de agua subterránea.

Gestión de Lixiviados: Es la clave para la eliminación del potencial que tiene el relleno para contaminar los acuíferos subterráneos. La gestión comprende los sistemas de impermeabilización, los sistemas de extracción y recolección de los líquidos lixiviados y el tratamiento de éstos. Las alternativas que se utilizan para el tratamiento del lixiviado, incluyen: 1) Reciclaje o Recirculación del lixiviado dentro de las celdas; 2) Evaporación del lixiviado; y 3) Tratamiento.

Gestión de aguas pluviales: Comprende el control del movimiento del lixiviado, la gestión de las aguas superficiales, que incluyen la lluvia, escorrentía, arroyos intermitentes y manantiales artesianos. Se utiliza una capa de cobertura con pendiente (3 al 5%) y de drenaje adecuado para las aguas pluviales, para el *control de la infiltración superficial*. El objetivo de eliminar o reducir la cantidad de agua

superficial que entra en el relleno es de gran importancia para su diseño, dado el agua superficial es la mayor contribución al volumen total de lixiviado.

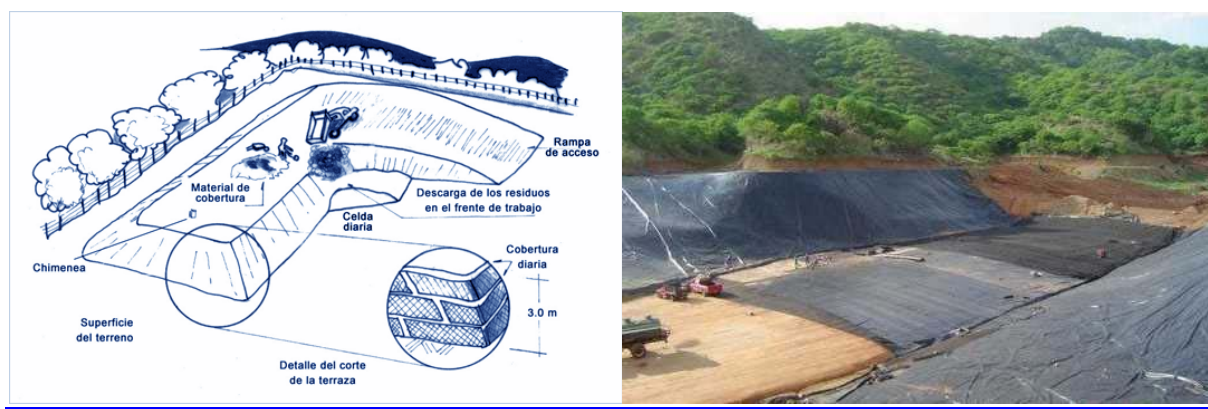
Instalaciones para el control: Incluyen sistemas de cobertura de fondo, sistemas de recolección y extracción del lixiviado, sistema de extracción y recolección del lixiviado y las coberturas, diaria y final.

Supervisión ambiental: Implica las actividades asociadas con la recolección y análisis de muestras de agua y aire, que se utilizan para supervisar el movimiento de gases y del lixiviado del relleno en la zona de operación.

Cierre del relleno: Es el término utilizado para describir los pasos que se deben seguir para cerrar y asegurar la zona del relleno una vez finalizado su período de operación.

Mantenimiento post-cierre: Se refiere a las actividades asociadas con la supervisión y mantenimiento a largo plazo del relleno cerrado (normalmente es de 30 a 50 años). Las actividades a realizarse son mantener las pendientes para asegurar la escorrentía superficial, mantener y operar los sistemas para el control de gases y lixiviado, y supervisar el sistema de detección de posible contaminación.

Control de entrada de residuos: El relleno sanitario debe contar con un sistema de inspección y control de los camiones que ingresan al predio a descargar, tanto particulares como municipales.



2 - ENERGÍA DE HIDRÓGENO

Introducción

"Sí, amigos míos, yo creo que el agua será empleada algún día como combustible. El hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada o simultáneamente, suministrarán una fuente de luz y de calor inagotables, dotadas de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...] El agua será el carbón del futuro"

Julio Verne, "La isla misteriosa" (1874)



De esta manera respondía el ingeniero Cyrus, personaje de la novela de Julio Verne La isla misteriosa, a la pregunta sobre lo que ocurriría si se agotara el carbón. De esto hace ya más de un siglo, pero parece que, como en otras ocasiones, el tiempo acabará dando la razón al escritor, tan amigo de imaginar el futuro.

En los últimos años el hidrógeno ha cobrado notoria relevancia como "combustible del futuro", ya sea a través de su combustión directa o mediante su utilización en celdas o pilas de combustible.

En los tradicionales motores de combustión interna, las celdas de combustible presentan la ventaja de convertir eficientemente la energía química de combustibles ricos en H_2 en energía eléctrica sin etapas intermedias de combustión y prácticamente con emisión cero de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x).

Propiedades del hidrógeno

Incoloro, inodoro y no tóxico, el gas hidrógeno es el más sencillo de todos los elementos. Es un gas biatómico, inquieto y escurridizo, que condensa a $-253^\circ C$ (doscientos cincuenta y tres grados bajo cero). Es difícil de transportar, licuar y manipular con seguridad.

El átomo de hidrógeno común está formado sólo por un protón y un electrón. Como no tiene neutrones –las partículas sin carga pero con masa que mantienen unidos los protones en el núcleo– es también el elemento más ligero de todos, casi 15 veces más que el aire.

Responsable del brillo de las estrellas y fuente de la energía que recibimos del Sol, el hidrógeno es, además, el elemento más abundante del Universo: las tres cuartas partes de la materia cósmica son hidrógeno, que podríamos utilizar como combustible si estuviera a nuestro alcance. En Júpiter, se encuentra la acumulación de hidrógeno que tenemos más cerca, a millones de kilómetros de la Tierra.

En la Tierra prácticamente no existe hidrógeno en estado libre. Y es que es tan ligero que casi podríamos decir que no pesa: la fuerza de gravedad de nuestro planeta no puede retener un elemento con una masa tan insignificante y el poco hidrógeno que se produce de manera natural –por ejemplo, el que contienen los gases volcánicos– se escapa rápidamente hacia la atmósfera. Si se encuentra unido a otros átomos, en particular al carbono en los hidrocarburos y al oxígeno en el agua, por consiguiente se debe consumir energía para separarlo.

Además de en el agua –de la que forma parte en una proporción del 11,19 % en peso– y de otros muchos compuestos químicos, como los ácidos o los alcoholes, el hidrógeno, esencial para la vida, forma parte de toda la materia orgánica, incluidas las personas, que somos un 10% hidrógeno. Hay hidrógeno, por tanto, en la biomasa y el biogás; pero, sobre todo, en la biomasa. Rompiendo los enlaces de las moléculas que lo contienen mediante diferentes tecnologías, se consigue producir hidrógeno y, una vez almacenado y transportado, utilizarlo como combustible o en otras aplicaciones.

El hidrógeno tiene una elevada densidad energética en base másica en comparación con el gas natural y la nafta, con lo cual el peso del combustible será menor en los tanques de almacenamiento, pero por otra parte el H_2 tiene una baja densidad energética en base volumétrica en relación por ejemplo con el gas natural, con lo cual se requerirán tanques de almacenamiento grandes y pesados o bien almacenarlo en otro estado (líquido o en forma de hidruros metálicos) lo que implica una tecnología muy sofisticada y costosa.

Debido a su alto contenido energético (en base másica) ha sido considerado como un vector energético alternativo con importantes ventajas medioambientales y de disponibilidad por sobre los combustibles fósiles tradicionales.

Sin embargo el carácter limpio y no contaminante del hidrógeno como combustible dependerá del proceso y la materia prima que se emplee para su obtención, como así también del origen de la energía requerida por dicho proceso.

Si se lo obtiene a partir de hidrocarburos, e independientemente de la tecnología empleada, se generan óxidos de carbono; por lo tanto la calificación de combustible "limpio" se pone en duda, a menos que se utilicen materias primas provenientes de la biomasa, la cual en su desarrollo consume dióxido de carbono.

Si se lo obtiene del agua, se debe recurrir a la electrólisis, tecnología que si bien no genera óxidos de carbono, consume importantes cantidades de energía en forma de electricidad. Y si esa electricidad se la obtuvo empleando combustibles fósiles, nuevamente las bondades del hidrógeno como combustible no contaminante se ven relativizadas.

Sin embargo si la electricidad que requiere la electrólisis proviene de represas hidroeléctricas, centrales nucleares, energía eólica, solar o biomasa, se puede decir que el H_2 es un combustible que no genera óxidos de carbono.

No obstante debe mencionarse que la combustión de con aire en determinadas proporciones genera altas temperaturas de llama que pueden producir óxidos de nitrógeno.

Usos tradicionales y nuevos del hidrógeno

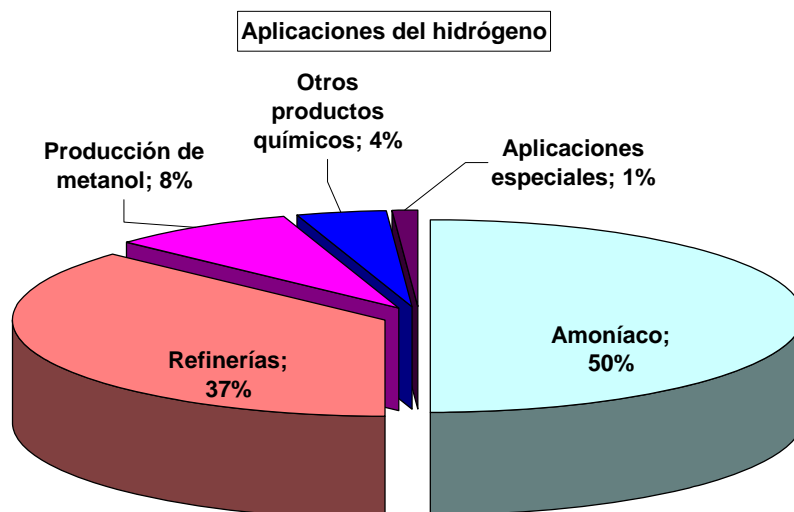
En el mundo se producen cada año alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno.

Sin embargo, sólo una mínima parte de ese hidrógeno se utiliza para producir energía, principalmente en aplicaciones espaciales.

Casi la mitad se emplea para elaborar fertilizantes basados en amoníaco. También se utiliza hidrógeno en la fabricación de metanol y el agua oxigenada, así como para "hidrogenar" los aceites orgánicos comestibles derivados de la soja, los cacahuetes, los cereales y el pescado, además de para refrigerar motores y generadores.

Pero quien conoce bien al hidrógeno es la industria petroquímica, que lleva años utilizándolo como materia prima de una amplia gama de productos derivados del petróleo, principalmente en la síntesis de amoníaco y en la fabricación de peróxido de hidrógeno.

La utilización del hidrógeno como combustible abre a la industria del petróleo las puertas de un nuevo mercado, en el que, junto a las empresas especializadas en la producción y el suministro de gases, ocuparán un lugar privilegiado, por lo menos al principio.



¿Cómo se produce?

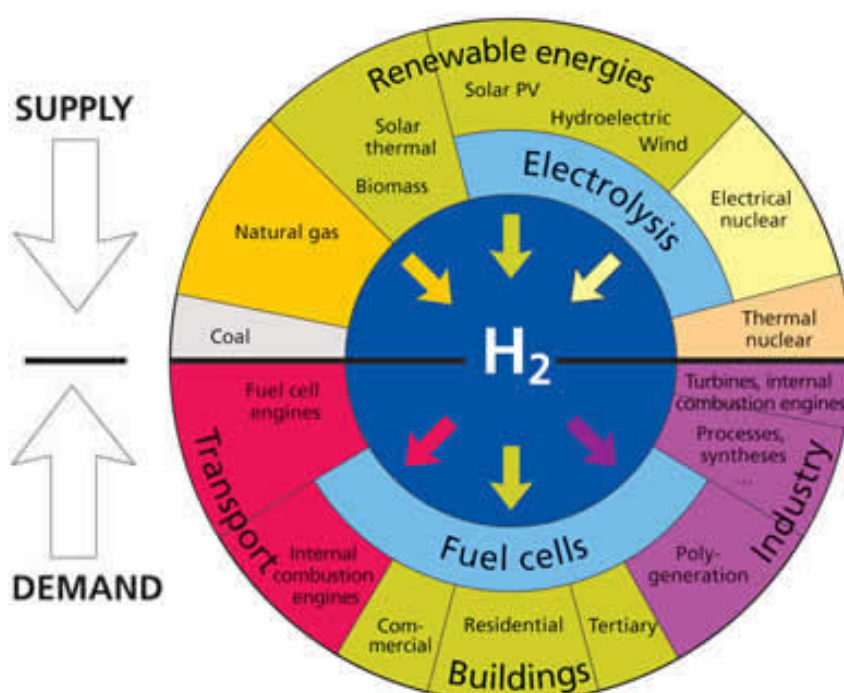
Desde el siglo XIX el hombre sabe cómo separar el hidrógeno y el oxígeno que forman el agua aplicando una corriente eléctrica. El proceso se llama, hidrólisis y se trata de una tecnología conocida y tan sencilla que forma parte de los experimentos que se realizan en los colegios. La electrólisis, además, es limpia y produce un hidrógeno de gran pureza.

El 95% de la producción de H_2 es “cautiva” es decir, se consume en el mismo sitio de su producción. Casi el 50% del H_2 producido mundialmente se obtiene a partir de gas natural y sólo un 4% por electrólisis. El proceso más usado en el mundo para producir hidrógeno a gran escala es el reformado de hidrocarburos (principalmente gas natural) con vapor.

La electrólisis del agua permite obtener hidrógeno de alta pureza libre de óxidos de carbono, pero a un costo actualmente mucho más elevado que el del reformado con vapor de hidrocarburos.

La opción más barata a día de hoy es producir hidrógeno a partir de gas natural mediante la igualmente bien conocida tecnología del reformado con vapor, que consiste en romper las moléculas de gas con vapor de agua en presencia de un catalizador. Además, es también la opción menos contaminante a partir de combustibles fósiles con la tecnología actual, el gas natural parece el candidato en mejor posición para liderar la producción de hidrógeno en un futuro próximo. Convertir el carbón en gas calentándolo hasta $900^{\circ}C$ es la forma más antigua de producir hidrógeno: así es como se obtenía el gas ciudad, que contenía hasta un 60% de hidrógeno.

La gasificación de carbón representa hoy el 18% de la producción mundial; y, como el carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo, podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias. Y, en general, el reformado de todos los hidrocarburos y alcoholes: el 30% del hidrógeno que se consume en el mundo procede de la gasolina. Pero el hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles será siempre poco limpio –en su elaboración se emitirá CO_2 – y nada renovable, por lo que todos los sistemas basados en ellas serán, como mucho, tecnologías de transición.



¿Cómo se producirá?

Con agua y electricidad de origen renovable, coinciden los expertos. Pero también se investigan otras alternativas. Una posibilidad es la fotoelectrólisis, que básicamente consiste en sumergir en el agua una célula fotovoltaica fabricada con un material semiconductor que hace las veces de electrolizador. Combinando en uno los dos pasos de la electrólisis tradicional, se eliminan costos y se consiguen eficiencias un poco mayores.

Existen, sin embargo, dos tecnologías de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables que no incluyen electricidad, cuyo coste y, por tanto, viabilidad podrían ser interesantes a medio plazo. La primera incluye la gasificación de biomasa, un poco más cara que el reformado de gas, pero rentable donde la biomasa sea abundante y barata; y diferentes tratamientos de los análogos "bio" de los hidrocarburos y alcoholes: biodiesel, biogás y bioetanol.

La segunda opción es utilizar energía térmica de alta temperatura. Por eso también tiene muchas esperanzas puestas en el hidrógeno la industria nuclear, que trabaja en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura con los que realizar lo que se conoce como hidrólisis térmica. Porque para separar el agua en hidrógeno y oxígeno sólo con calor hacen falta temperaturas de al menos 2.000 °C, difíciles de alcanzar con energía solar y casi imposibles de manejar. Sin embargo, insertando una cadena de reacciones intermedias, la temperatura se rebajaría a unos 850 °C. Puede que en futuro no tan lejano ésta sea la forma de obtener hidrógeno "bueno, verde y barato" a partir de la energía solar.

Se han propuesto otras formas de obtener hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.

Un poco de historia

En 1766 el científico británico Henry Cavendish identifica el hidrógeno como algo diferente del oxígeno y describe el agua como un compuesto de estos dos gases.

En 1785, Antoine Lavoisier repite el experimento y da al "aire inflamable" de Cavendish el nombre por el que le conocemos hoy: hidrógeno, que significa en griego "generador de agua".

Menos de 10 años después los militares franceses construirían el primer generador de hidrógeno con el fin de utilizar el gas en globos de reconocimiento.

El hidrógeno comenzó a ser utilizado por la aviación en los años 20, cuando los alemanes decidieron utilizarlo como combustible secundario de los zepelín que cruzaban el Atlántico. Hasta entonces el hidrógeno servía sólo para mantener la fuerza de ascensión de dirigibles y globos. La historia acabó en 1937, cuando el tristemente célebre Hindenburg se incendió justo antes de aterrizar en Nueva Jersey (EEUU), en medio de una tormenta eléctrica, con un centenar de personas a bordo. Aunque 34 de los 36 fallecidos murieron al arrojarlos por la borda aterrorizados y no quemados, aunque en los primeros momentos las llamas eran anaranjadas y no de un tenue



azul como son las del hidrógeno, aunque ni uno solo de los supervivientes había percibido el olor a ajo que se utilizaba para poder detectar un escape de hidrógeno, el mundo culpó de la tragedia al inflamable hidrógeno.

En 1997 Addison Bain, un científico de la NASA jubilado, hizo publicas las conclusiones de varios años de investigación sobre el accidente del Hindenburg: para aumentar la resistencia de la lona de algodón del zepelín se había aplicado a ésta un compuesto que contenía, entre otras sustancias, polvo de aluminio, un material altamente inflamable e inextinguible. Las conclusiones de Bain exculpan definitivamente al hidrógeno, pero el daño a su imagen, causado por 60 años de asociación a la tragedia, todavía no se ha reparado. Conseguir que la población conozca mejor a un gas inflamable, como todos los combustibles, pero no más peligroso que el resto y trasladar los protocolos de seguridad que han funcionado en la industria durante años a las nuevas aplicaciones del hidrógeno son dos de los principales retos a los que se enfrentan los expertos.

Hasta los años 50 ingleses y alemanes experimentaron con su uso en los motores de explosión de coches, camiones, locomotoras y hasta submarinos. Pero el hidrógeno ya tenía su leyenda negra. La segunda oportunidad llegó en 1973, con la crisis del petróleo, época en que los gobiernos dedicaron millones a la investigación en el potencial "sustituto del petróleo". Pero la crisis pasó.

Afortunadamente, en países como Canadá, EEUU, Alemania o Japón la industria –y en especial dos sectores, el aeronáutico y el de la automoción– nunca se detuvo. Y, cuando en 1992 el mundo empezó a preocuparse por un nuevo problema ligado al petróleo y el cambio climático, ya teníamos mucho camino andado. Gracias a ellos hoy no partimos de cero.

Hidrógeno como combustible vehicular ¿por qué?

Para empezar, porque es un buen combustible, capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que cualquier otro combustible conocido: 33,3 kWh por kg, frente a los 13,9 kWh del gas natural o los 12,4 kWh del petróleo, por ejemplo. Se trata también un combustible limpio a nivel local, que, cuando se quema, lo único que produce, además de energía, es básicamente vapor de agua, librándonos, entre otras, de las emisiones de CO₂, el principal gas de efecto invernadero.

Y gracias a la pila de combustible el hidrógeno es, además, un intermediario energético eficiente y tan versátil como la electricidad. Como todo buen vector energético, el hidrógeno, al igual que la electricidad, puede obtenerse a partir de un amplio abanico de recursos naturales utilizando prácticamente cualquier fuente de energía, con lo que no haría falta importarlo (siempre y cuando en su fabricación se utilizaran recursos y fuentes primarias de energía autóctonas y renovables).

Pero, por encima de todo, el hidrógeno puede almacenarse. Y esta capacidad de servir de almacén de energía, -que no tiene la electricidad- es la que da sentido al "despilfarro" energético y económico que, según algunos, supone la transformación de energía eléctrica en un hidrógeno cuyo fin es convertirse otra vez en (menos) energía eléctrica; y la que convierte al hidrógeno en el complemento ideal de las energías renovables, especialmente la eólica y la solar, que sólo funcionan cuando sopla el viento y hace sol: en las horas de baja demanda el viento y el sol se utilizarían no para cargar de energía unas aparatosas, contaminantes y siempre insuficientes baterías, sino para producir hidrógeno, que podríamos utilizar después en una pila de combustible para producir electricidad en casa o viajar en un coche "movido por el viento" sin necesidad de instalar un aerogenerador en el techo del vehículo. Con el apoyo del hidrógeno, las renovables se abrirán paso en el sector de

la automoción y se convertirán en las (verdaderas) sustitutas del petróleo. Ésa es la idea.

Existen numerosos ejemplos del marcado interés de los países industrializados en la utilización del hidrógeno como vector energético:

- El gobierno de EEUU ha invertido en 2003 1,7 billones de dólares en un programa a cinco años para comercializar autos a H₂ en 2020.
- La Unión Europea, en marzo de 2004 invierte 2,8 billones de dólares en un programa a 10 años para desarrollar pilas de combustible a H₂.
- El gobierno de Japón en 2003 duplicó su presupuesto del programa I&D (investigación y desarrollo) sobre pilas de combustible a 268 millones de u\$s.
- Las fábricas de automóviles invierten billones de dólares en el desarrollo de vehículos a H₂.
- Las fábricas de automóviles y empresas de energía han montado estaciones de servicio experimentales de H₂ en diversas partes del mundo.

Un almacén de energía difícil de almacenar

Por las propiedades físicas del hidrógeno, almacenarlo supone todo un reto, sobre todo cuando se trata de hacerlo en un contenedor pequeño, ligero, seguro y barato, como tiene que ser el depósito de un automóvil. Puede parecer extraño, cuando se sabe que un kilo de hidrógeno genera la misma energía que casi tres de gasolina.

Sin embargo, ese kilo ocupa mucho volumen, por lo que la cantidad de energía que aporta el hidrógeno por unidad de volumen –su densidad energética– es bajísima. Tan baja que, de utilizar hidrógeno sin "tratar", los coches serían "depósitos con ruedas" o se quedarían sin combustible casi antes de arrancar. Para almacenar 4 kg. de hidrógeno, (cantidad que consume un coche a pila en una distancia de 400 km) se necesitaría un depósito equivalente a un globo ¡de más de 5 m de diámetro!

Naturalmente, la solución al problema pasa por reducir el volumen del hidrógeno como se reduce el volumen de todos los gases: comprimiéndolo, o enfriándolo hasta licuarlo. Técnicamente, lo más sencillo es comprimirlo a una presión de 200-350 bares, pero el hidrógeno sigue ocupando muchísimo: a 200 bares, almacenar los 4 kg exigiría un depósito de 250 l.

El desarrollo de nuevos materiales –composites de fibras de carbono con polímeros o aluminio, por ejemplo– está permitiendo almacenarlo a presiones de hasta 700 bares, que permiten almacenar mayor cantidad con menos volumen.

En estado líquido, el hidrógeno ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita frío, mucho frío, para alcanzar los 253 °C bajo cero que necesita el hidrógeno para cambiar a este estado. Y para generar tanto frío hace falta, cómo no, energía: el 30-40% de la que obtendríamos de ese hidrógeno. Aún así, un coche típico necesitaría un depósito de más de 100 l de capacidad para mantener iguales prestaciones que uno de gasolina y añadiríamos el problema que supone mantener líquido el hidrógeno a pesar de la temperatura ambiente exterior.

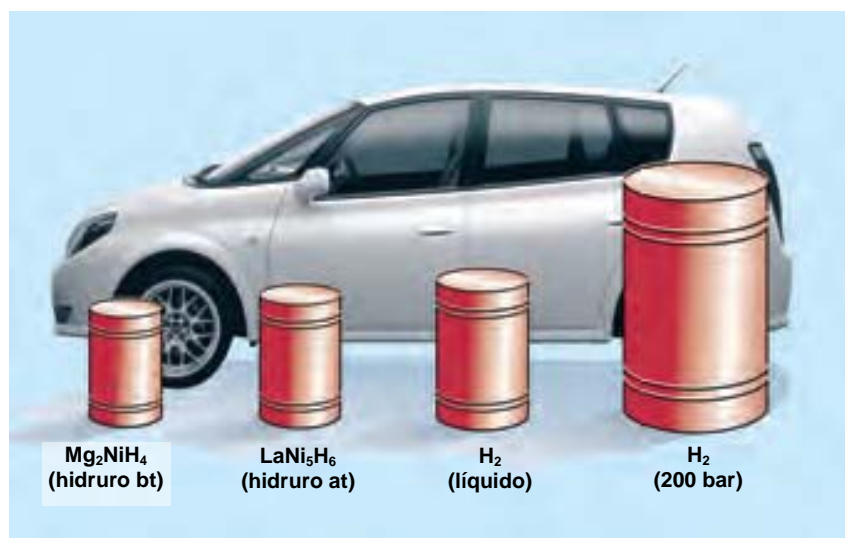
En los últimos años se está investigando mucho en sistemas más eficientes. Hasta la fecha, las dos alternativas que más convencen son el almacenamiento del hidrógeno en hidruros metálicos y en nanotubos de carbono. Los hidruros metálicos son combinaciones del hidrógeno con ciertos metales o mezclas de metales, que se obtienen enfriando la mezcla metálica e introduciendo hidrógeno a presión. El atractivo de este sistema radica en que la reacción es reversible: calentando el hidruro y disminuyendo la presión, el hidrógeno se libera y puede ser utilizado como

combustible. Es una forma de almacenamiento estable y segura, pero tiene el inconveniente de que los hidruros que operan a baja temperatura –que pueden liberar el hidrógeno a sólo 40-90 °C y tienen mayor capacidad de almacenamiento– son muy lentos y pesados, por lo que resulta más adecuada para otras aplicaciones.

Los nanotubos de carbono, que almacenan hidrógeno con mejor eficiencia y pueden operar a temperatura ambiente, pueden llegar a ser la solución. Pero aún queda mucho por hacer en este aspecto.

De momento, algunas marcas han optado, como solución transitoria, por incorporar en el vehículo un reformador que convierte en hidrógeno otro combustible primario que ocupe menos –metanol o gasolina, por ejemplo– mientras el coche anda.

El volumen de 4 kg de H₂
Según el método de compactación y en relación con el tamaño de un coche



Los dos autobuses de MAN que, desde mayo de 1999, prestan servicio en el aeropuerto de Munich, queman en un motor de combustión interna el hidrógeno gaseoso que almacenan a 250 bares en los 15 depósitos situados en el techo de cada autobús. A la izquierda, vista del techo de autobús Citaro con sus 9 tanques de H₂ y del maletero de un coche "ocupado" por los depósitos.



LA PILA DE COMBUSTIBLE

¿Qué es una pila de combustible?

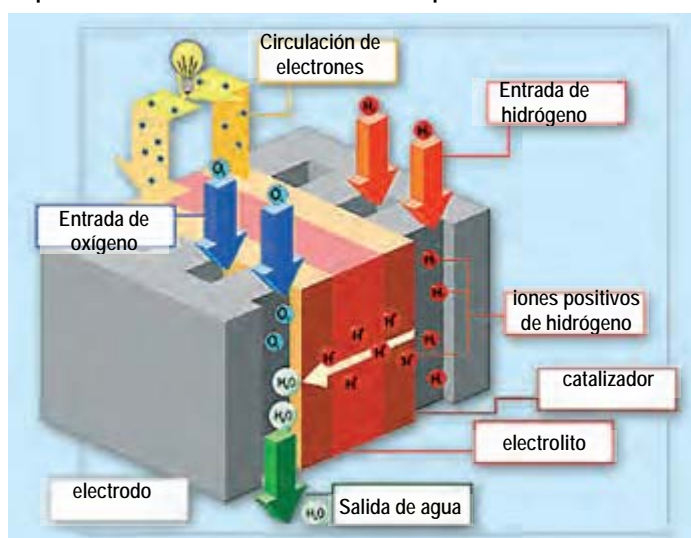
Una pila de combustible es una especie de batería de alta tecnología que convierte la energía química del combustible que la alimenta en energía eléctrica. Pero hay una gran diferencia: una batería almacena en su interior la energía química que convierte en electricidad; cuando se termina esa energía química, la batería se tira; o, en el mejor de los casos, se recarga en un largo y tedioso proceso. La pila de combustible, en cambio, convierte en electricidad la energía química de un combustible que recibe del exterior y es capaz de suministrar energía eléctrica de forma continua mientras se mantenga el aporte de este combustible. Uno de los reactivos de la pila es siempre el oxígeno, que actúa como oxidante en el cátodo y que, dada su disponibilidad en el aire, generalmente no es necesario almacenar.

El combustible propiamente dicho es habitualmente el hidrógeno, que –suministrado de forma directa o a partir del reformado de un primer combustible (metanol o etanol, por ejemplo)– alimenta la pila.

¿Cómo funciona?

La mayoría de las pilas de combustible son, en realidad, una suma de pilas individuales, que reciben el nombre de células o celdas de combustible.

Una célula de combustible consta de dos electrodos, ánodo (-) y cátodo (+) –ambos con cierto contenido de platino– separados por un electrolito sólido o líquido. En uno de los tipos más conocidos y sencillo de pila, al que corresponde este esquema, el electrolito es una membrana. En el ánodo se produce la reacción del hidrógeno, que se disocia en 2 protones y 2 electrones. Los protones o iones positivos de hidrógeno circulan a través de la membrana hasta el cátodo, mientras los electrones, que no pueden atravesar la membrana, se escapan por un circuito eléctrico que conecta los dos electrodos. Este flujo de electrones es la corriente eléctrica que alimentará, por ejemplo, el motor eléctrico de un coche. Una vez atravesado el circuito, los electrones entran en el cátodo, donde se combinan con los protones y el oxígeno del aire para formar agua.



Un mismo principio, cinco tipos de pilas

Aunque el funcionamiento de todas las pilas de combustible responde al mismo principio fundamental, entre ellas existen notables diferencias de diseño, características de operación y potencia. Así, se pueden encontrar desde pilas de 1w que funcionan a temperatura ambiente hasta módulos de 250 kW que operan a 1.000 °C de temperatura. La clasificación habitual de las pilas de combustible está basada en el tipo de electrolito que utilizan, ya que éste determina características fundamentales de la pila, y, en consecuencia, sus posibles campos de aplicación.

Las pilas tipo PEM son las que ofrecen mayor flexibilidad y versatilidad. Sus aplicaciones van desde la alimentación de pequeños aparatos portátiles, como radios y ordenadores, con potencias de 1 a 100 w, hasta sistemas de generación doméstica (1 a 5 kW) o residencial (200 kW), pasando por la alimentación del

vehículo eléctrico. Las MCFC y SOFC tienen un enorme futuro como generadores de electricidad o de electricidad y calor, aunque su nivel de desarrollo, especialmente el de estas últimas, es mucho menor.

Tipo	Electrolito *	Ion de transporte **	Temperatura de operación (°C)
Membrana polimérica (PEM)	Polímero sólido	H ⁺	60-100
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de (KOH)	OH ⁻	90-100
Acido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄ líquido	H ⁺	175-200
Carbonatos fundidos (MFCF)	Solución líquida de LiKCO ₃	CO ₃ ²⁻	600-1000
Óxidos sólidos (SOFC)	Y-ZrO ₂	O ²⁻	600-1000

* La membrana más utilizada en el tipo PEM es el naftión; KOH: hidróxido de potasio (potasa); H₃PO₄: ácido (orto)fosfórico; LiKCO₃: carbonatos de litio y potasio, aunque son posibles otras combinaciones de carbonatos alcalinos; Y-ZrO₂: óxido de zirconio (zirconia) estabilizado con una pequeña cantidad de itrio; un material cerámico.

** ion que se desplaza de un electrodo a otro. En las de los tipos PEM y PAFC las cargas positivas que se han formado en el ánodo se desplazan hasta el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno; en el resto de los tipos ocurre lo contrario: son los iones negativos los que atraviesan el electrolito para combinarse con el hidrógeno.

Fuente: Los Alamos National Laboratory



Pila de combustible de los autobuses de Madrid y Barcelona

COCHES Y AUTOBUSES A PILA

Los autobuses que ya circulan por Madrid y Barcelona son un ejemplo de las ventajas de una tecnología que se presenta como una alternativa real, limpia y silenciosa a los actuales motores de combustión interna. Así se moverán también algún día las motos, los camiones, los submarinos y hasta los aviones; pero, sobre todo, los coches.

En los últimos diez años DaimlerChrysler, Ford, General Motors/Opel, Honda, Hyundai, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot-Citroen, Renault, Honda, Toyota y Volkswagen han desarrollado al menos un prototipo de coche a pila cada uno. Alimentados por diferentes combustibles (hidrógeno frente a metanol o gasolina con bajo contenido en azufre reformados) y con sistemas de almacenamiento diversos (hidrógeno gaseoso, líquido e incluso combinado en hidruros metálicos), todos ellos se mueven parcial o totalmente gracias a la electricidad que genera una pila tipo PEM, que es la más utilizada en



automoción. Además de por su tamaño y una buena relación potencia/volumen, porque la baja temperatura a la que funciona permite que el coche arranque rápidamente y que responda de forma inmediata a las variaciones de demanda energética del motor, habituales durante la conducción.

El objetivo de la Unión Europea es que en 2020 se muevan con pilas de combustible alimentadas por hidrógeno el 2% de los coches europeos.



Un abanico de aplicaciones

Los dispositivos electrónicos portátiles son otro de los posibles campos de aplicación de las pilas de combustible. Como sus requerimientos de potencia y energía son mínimos, las micro-pilas PEM y las alimentadas por metanol directamente se perfilan como la mejor alternativa. Ordenadores portátiles, cámaras, teléfonos móviles o PDAs mejoran ostensiblemente si son alimentados con una pila de este tipo, ya que éstas duran más que las baterías convencionales. Por eso grandes empresas como Motorola, NEC o Toshiba están apostando fuertemente por esta tecnología.

Pero hay más. La alta eficiencia de las pilas de combustible, su funcionamiento silencioso y sus nulas o bajas emisiones permiten que se puedan instalar minicentrales cerca e incluso dentro de los núcleos de población, de manera que cada barrio podría generar su propia energía y desconectarse de la red eléctrica. Una buena noticia también para poblaciones aisladas y grandes superficies como fábricas, hospitales, edificios públicos, hoteles o urbanizaciones, que contarían con un suministro continuo y seguro de energía y calefacción.

VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES

La pareja hidrógeno-pila de combustible es una gran aliada de la naturaleza. La oxidación del hidrógeno –sea en un motor de explosión, sea a través de una pila– no genera emisiones de SO₂, hidrocarburos no quemados y, sobre todo, CO₂. Por el

tubo de escape de un coche a pila sólo sale vapor de agua. Las altas temperaturas que se generan en el interior de un motor térmico provocan la formación de óxidos de nitrógeno

(NO_x), que, sin embargo, pueden reducirse con ayuda de catalizadores que disminuyan la temperatura del proceso.

La eficiencia de la pila permite también reducir el número de emisiones de CO₂ y otras sustancias aunque se empleen combustibles menos limpios que el hidrógeno: como, para el mismo número de kilómetros, un coche a pila necesita menos combustible que uno con un motor tradicional, en su recorrido habrá emitido menos contaminantes.

Bibliografía:

- Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe. OPS – OMS (2003),
 - Estrategia para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU) (2005) - Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable – Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación
 - Instituto de ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires - CEAMSE (2005 / 2006 / 2007 / 2008 / 2009) Estudio de Calidad de los RSU de la Ciudad de Buenos Aires, Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires – CEAMSE.
 - Instituto de ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, (2001), Estudio de Calidad y Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad de Buenos Aires.
 - Instituto de ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, (2003), Gestión de los Servicios de Higiene Urbana: El Caso de la Ciudad de Buenos Aires, Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
 - Ley de Presupuestos Mínimos sobre Residuos Sólidos Domiciliarios – Ley 25916.
 - Robinson William (1986), The Solid Waste Handbook, John Wiley & Sons.
 - Tchobanoglous, G. (1977), Gestión Integral de los Residuos Sólidos, Mc Graw-Hill.
 - Tchobanoglous, G. (1994), Gestión Integral de los Residuos Sólidos: Principios de Ingeniería y Aspectos de la Gestión, Mc Graw-Hill.
 - University of Wisconsin (2002), Solid Waste Landfills Correspondence Course, Madison, USA
-
- “Combustibles alternativos”, Silvia Daniela Romano – Erenio González Suarez – Miguel Ángel Laborde
 - “Hidrógeno y pila de combustible”, publicación de la colección “Energías Renovables para todos” elaborada por Haya Comunicación. *Dirección de la colección: Luis Merino / Pepa Mosquera, Redacción de este cuaderno: Paloma Asensio (Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid)*