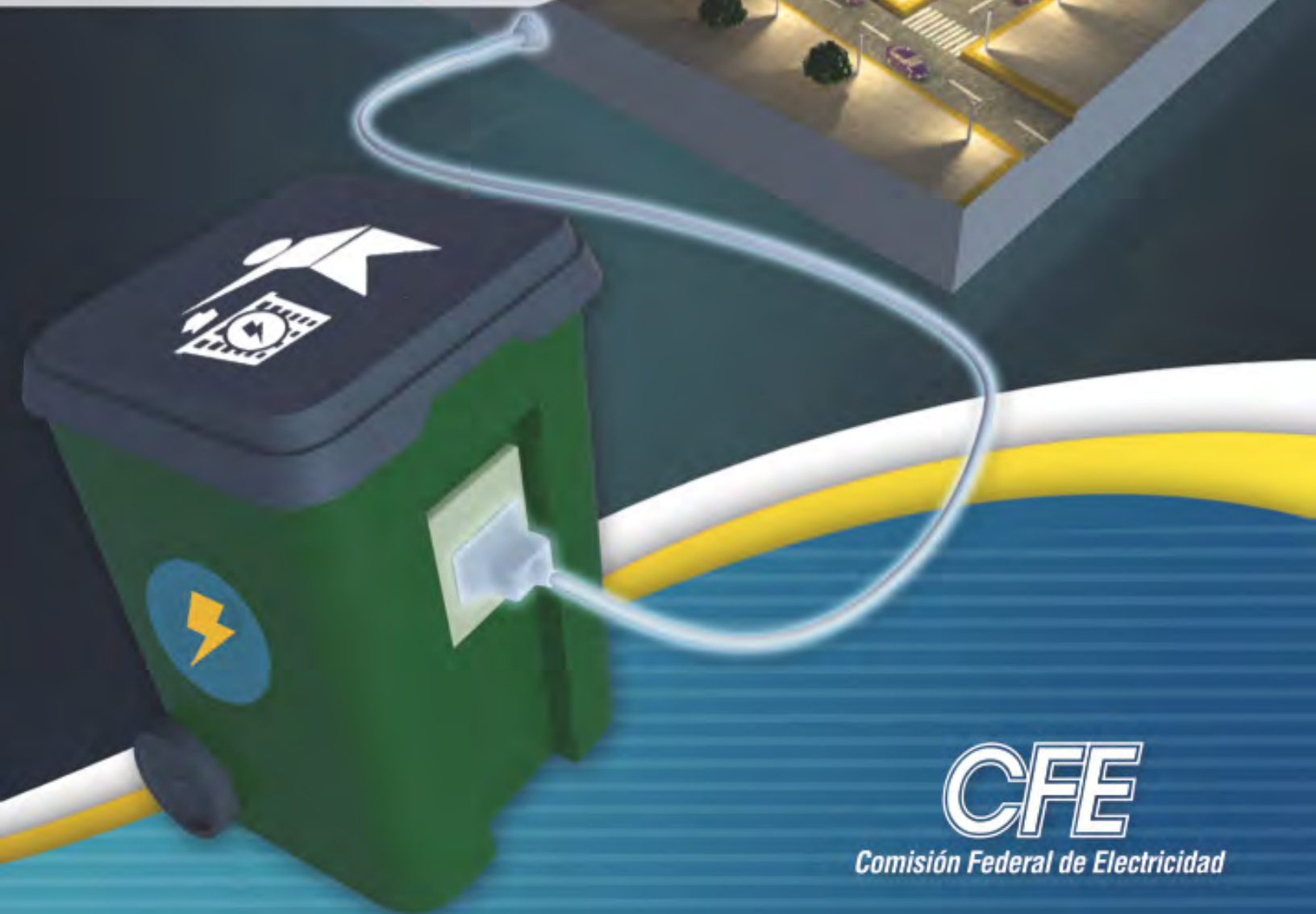




INSTITUTO DE  
INVESTIGACIONES  
ELÉCTRICAS

# Guía de usuario

Generación de electricidad  
mediante residuos sólidos urbanos



**CFE**

Comisión Federal de Electricidad

Este material es de distribución gratuita, prohibida su venta.

Primera edición: octubre de 2012

D.R. © Comisión Federal de Electricidad (CFE)  
Unidad de Electrificación,  
Río Atoyac No. 97-3er. piso, sala 309,  
Col. Cuauhtémoc, C.P. 06598, México, D. F.  
[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)

Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)  
Gerencia de Energías Renovables  
Reforma 113,  
Col. Palmira, C.P. 62000, Cuernavaca, Morelos.  
[www.iie.org.mx](http://www.iie.org.mx)

Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso expreso de la Comisión Federal de Electricidad.

Los textos e ilustraciones que se presentan en esta Guía de Usuario - Generación de Electricidad mediante residuos sólidos urbanos, han sido preparados para efectos exclusivamente ilustrativos e informativos. Todas las fotografías, diagramas, tablas e ilustraciones sin referencia han sido creados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Ni la Comisión Federal de Electricidad, ni el Instituto de Investigaciones Eléctricas, ni ninguno de sus empleados aceptan responsabilidad alguna por pérdidas o daños en ninguna persona o propiedad, que resulten del uso del material, instrucciones, métodos o ideas aquí contenidos, o de la acción o abstención de acción que resultaren de tal uso.

Esta guía fue desarrollada por la Gerencia de Energías Renovables del Instituto de Investigaciones Eléctricas, participando en su preparación el Dr. César Alfredo Romo Millares, la M. en C. M. Consolación Medrano Vaca, el Dr. Hipólito Romero Tehuitzil, el Ing. José Luis Arvizu Fernández, el Dr. Jorge Huacuz Villamar, y el Ing. José Beltrán Adán.

Diseño de la portada: Arturo Fragoso Malacara  
Imagen 3D: Daniel Hoyos Morales  
Idea original: Francisco de Jesús Galván Bobadilla

# Contenido

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Contenido</b>                                                                              | 3  |
| <b>Prefacio</b>                                                                               | 4  |
| <b>Introducción</b>                                                                           | 5  |
| <b>Capítulo 1. Gestión de residuos sólidos urbanos</b>                                        | 7  |
| Gestión integral de residuos sólidos urbanos                                                  | 7  |
| Programas de reducción                                                                        | 7  |
| Reúso                                                                                         | 7  |
| Reciclaje                                                                                     | 7  |
| Compostaje y digestión anaeróbica                                                             | 9  |
| Tratamiento térmico con recuperación de energía                                               | 9  |
| Confinamiento en rellenos                                                                     | 9  |
| Situación de residuos sólidos urbanos en México                                               | 9  |
| Marco regulatorio de residuos sólidos urbanos en México                                       | 11 |
| Disposición de residuos sólidos urbanos en México                                             | 12 |
| Rellenos sanitarios registrados en el mecanismo de desarrollo limpio                          | 13 |
| Plantas de conversión térmica                                                                 | 15 |
| Costos de manejo y confinamiento                                                              | 15 |
| <b>Capítulo 2. Tecnología de generación eléctrica a partir de biogás de relleno sanitario</b> | 16 |
| Estimación del potencial de generación de un relleno sanitario                                | 20 |
| Modelo de producción de biogás                                                                | 21 |
| Planta de generación eléctrica                                                                | 21 |
| <b>Capítulo 3. Tecnologías de conversión térmica</b>                                          | 23 |
| Incineración de RSU con recuperación de energía                                               | 23 |
| Tecnologías de gasificación y pirólisis                                                       | 26 |
| Tecnología de gasificación con arco de plasma                                                 | 27 |
| Digestión anaeróbica para RSU                                                                 | 27 |
| Emisiones al medioambiente                                                                    | 28 |
| Integración de plantas de incineración con otros procesos                                     | 30 |
| Criterios clave para adoptar una tecnología de incineración                                   | 30 |
| Proveedores de plantas de incineración                                                        | 32 |
| <b>Capítulo 4. Gestión del proyecto</b>                                                       | 33 |
| Estudio preliminar                                                                            | 36 |
| Estructuración del proyecto                                                                   | 36 |
| Aprobación por el cabildo y congreso estatal                                                  | 37 |
| Creación de una nueva empresa                                                                 | 37 |
| Implementación y ejecución de una estrategia de comunicación y promoción                      | 37 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Proyecto ejecutivo                                                                                                               | 38 |
| Permisos de la autoridad                                                                                                         | 38 |
| Trámites ante SEMARNAT                                                                                                           | 40 |
| Gestión con la CONAGUA                                                                                                           | 41 |
| Gestión con la CRE                                                                                                               | 42 |
| Gestión con la CFE                                                                                                               | 43 |
| Registro ante el mecanismo de desarrollo limpio (MDL)                                                                            | 45 |
| Esquemas de financiamiento para proyectos de conversión de RSU a energía                                                         | 46 |
| Financiamiento de BANOBRAS                                                                                                       | 47 |
| Mecanismos de apoyo                                                                                                              | 50 |
| Mecanismo de desarrollo limpio                                                                                                   | 50 |
| Causas de fracasos en proyectos <i>waste to energy</i>                                                                           | 50 |
| <b>Capítulo 5.</b> Evaluación tecno-económica de proyectos de conversión de biogás de rellenos sanitarios a energía eléctrica    | 53 |
| Evaluación técnica de un proyecto de inversión                                                                                   | 53 |
| Tecnologías para uso del biogás de rellenos sanitarios                                                                           | 53 |
| Generación de energía eléctrica                                                                                                  | 53 |
| Evaluación técnica de proyectos de conversión de biogás a energía eléctrica                                                      | 53 |
| Factores que impactan en la viabilidad de un sistema de generación eléctrica                                                     | 53 |
| Dimensionamiento del sistema de generación eléctrica                                                                             | 55 |
| Aspectos económicos                                                                                                              | 55 |
| Costos de inversión y O & M                                                                                                      | 55 |
| Evaluación de los ingresos al proyecto por venta de electricidad y otros                                                         | 57 |
| Evaluación de la factibilidad económica                                                                                          | 57 |
| Comparación de alternativas                                                                                                      | 59 |
| Evaluación de opciones de financiamiento                                                                                         | 59 |
| <b>Capítulo 6.</b> Evaluación tecno-económica de proyectos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos a energía eléctrica | 60 |
| Tecnologías para convertir residuos sólidos urbanos                                                                              | 60 |
| Evaluación técnica de una planta de conversión de residuos a energía                                                             | 61 |
| Aspectos económicos                                                                                                              | 62 |
| Costos de inversión y O & M                                                                                                      | 63 |
| Ingresos del proyecto                                                                                                            | 65 |
| Evaluación de la factibilidad económica                                                                                          | 65 |
| Comparación de alternativas                                                                                                      | 66 |
| Evaluación de opciones de financiamiento                                                                                         | 66 |
| <b>Capítulo 7.</b> Ejemplos de instalaciones en el país                                                                          | 67 |
| Relleno sanitario del municipio de Salinas Victoria, N.L.                                                                        | 67 |
| Relleno sanitario de San Nicolás, Aguascalientes                                                                                 | 67 |
| Relleno sanitario de Ciudad Juárez, Chihuahua                                                                                    | 69 |
| <b>Fuentes</b>                                                                                                                   | 71 |

## Prefacio

Cada habitante en México genera en promedio 1 kg de basura por día, gran parte del cual se recolecta y dispone a través de los municipios, de acuerdo a sus propios recursos y cuotas establecidas, en sitios que van desde tiraderos a cielo abierto sin ninguna infraestructura, hasta rellenos sanitarios que cumplen con altas especificaciones. Esto significa que más de 100 mil toneladas de basura por día tienen que ser recolectadas, transportadas y confinadas en nuestro país.

A nivel mundial, el tema de la disposición de la basura urbana es sumamente relevante y se ve desde diferentes ópticas, según sea la situación particular de cada país. Hay algunos desarrollados, principalmente en Europa, donde se está impulsando la reducción a cero de sus residuales mediante el reciclaje, reúso y conversión térmica, mientras que en otros, donde hay una mayor disponibilidad de espacios, se sigue confinando la basura en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.

Desde hace algunos años, algunos municipios en México han iniciado proyectos para tener una mejor gestión de sus residuales y muchos de ellos ya cuentan con espacios aptos para su confinamiento, sin embargo, existe un rezago importante en muchos de éstos, por lo que se requiere un mayor esfuerzo para que se detonen los proyectos que solventen técnica y ambientalmente la problemática de muchas de nuestras comunidades.

Es un hecho que existen ya las tecnologías que permiten reducir a cero los residuales, esto implica encadenar los procesos de separación, reciclaje, reúso y destrucción de los mismos y aunque en México ya se realizan algunas partes de este proceso, no se ha establecido formalmente una gestión integral de los residuos municipales.

Si el lector está interesado en una mejor gestión de los residuos sólidos urbanos, esta guía, que ha sido elaborada principalmente para los responsables en la toma de decisiones a nivel político, entidades reguladoras, inversionistas del sector, concesionarios, profesionales que participan en la gestión de residuos sólidos dentro de los municipios y empresas afines, le dará información sobre las opciones tecnológicas, costos esperados y los aspectos metodológicos clave para desarrollar e implementar proyectos exitosos de confinamiento y disposición de residuales urbanos, con la particularidad de contar con la opción de generación eléctrica.

Sin duda alguna las oportunidades existen, pero la implantación de proyectos en nuestro país dependerá de acciones coordinadas entre las entidades municipales y gubernamentales, inversionistas y ciudadanos, en donde se incentiven y promuevan las tecnologías que pueden solucionar los múltiples problemas derivados de la disposición de basura que aquejan a los municipios del territorio nacional.



## Introducción

Según cifras oficiales de 2011 [1], en nuestro país se produjeron alrededor de 48 millones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales se estima que el 80% se confina, ya sea en sitios controlados como son los rellenos sanitarios y rellenos de tierra, y en sitios no controlados, que son los tiraderos a cielo abierto. El restante 20% se compone de residuos que se reciclan (5%), y una cantidad no cuantificada de basura que es tirada en barrancos, ríos, terrenos baldíos o es incinerada a cielo abierto.

Por mandato constitucional, los municipios en México tienen a su cargo la función de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos que la población genera. Si tomamos en cuenta que el promedio estimado de generación de basura per cápita es de 1 kg diario, se tiene una gran cifra de más de 100 mil toneladas de RSU generadas diariamente en nuestro país, la cual representa un verdadero reto, en especial para los municipios situados en áreas densamente pobladas.

Los datos proporcionados por la SEMARNAT muestran que del mencionado 80% de RSU que se va a confinamiento, el 75% se va a sitios en donde existe un control y el 25% a tiraderos a cielo abierto donde no existe control alguno, entendiendo por control todas aquellas acciones destinadas a mantener bajo normas la emisión de gases y lixiviados del relleno. Esto es importante mencionarlo, ya que la basura confinada tiende a descomponerse y formar gas metano el cual, si no se recolecta adecuadamente en el sitio, se libera a la atmósfera, teniendo un fuerte impacto sobre el calentamiento global. Simplemente el recolectarlo y quemarlo en el sitio ya representa un importante avance para cuidar el medioambiente, pero obviamente, en la actualidad es menester aprovechar su contenido para producir energía aprovechable, ya sea como electricidad o calor.

Por otra parte, los lixiviados son los líquidos formados por el agua en el residuo, que junto con las aguas de lluvia se percola a través de los residuos y arrastra una gran cantidad de compuestos indeseables. Estos lixiviados requieren ser manejados y tratados para evitar que lleguen a contaminar mantos acuíferos subterráneos.

A nivel mundial, la generación per cápita de RSU no es muy diferente a la de México, sin embargo, de entrada se pueden consultar múltiples casos [2, 3, 4] en los que la generación de basura se con-

virtió en un problema de alto impacto, que ha requerido de medidas urgentes para su solución. En general, en los llamados “países industrializados”, la gestión de los RSU tiene un enfoque más avanzado que en nuestro país y se transita un camino hacia a una gestión integral, ejecutándose acciones tendientes a concientizar y educar a la población, así como a establecer los llamados programas de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar), para eventualmente, mediante procesos de conversión termoquímica y de recuperación de la energía, reducir prácticamente a cero la cantidad de residuales.

Esto se ha logrado mediante prohibiciones e incentivos incorporados en sus leyes y normas. Por ejemplo, en países como Suiza, Suecia, Noruega, Holanda, Austria y Bélgica existe una prohibición expresa para confinar en rellenos sanitarios residuales que contengan poder calorífico aprovechable [5, 6]. Esto ha propiciado que se desarrollen programas 3R con altos porcentajes de reciclaje y se fomente la construcción de plantas de incineración con recuperación eléctrica y térmica [7]. Con el mismo propósito, en otros 20 países europeos vemos cómo es una práctica común el gravar impositivamente la confinación de RSU en rellenos sanitarios. En China, por ejemplo, ante la falta de espacios para seguir confinando su basura, se ha incentivado la construcción de plantas de incineración con generación eléctrica, pagando el estado una tarifa preferencial por la electricidad generada, del orden del doble que se paga para las plantas que la generan con carbón [8]. Lo que se ve como una premisa fundamental de política en las sociedades más avanzadas es que se ha reconocido que el confinamiento de RSU

en rellenos sanitarios no es una práctica sustentable y se están tomando acciones para diversificar sus posibilidades [9].

En México hay una enorme tarea que desarrollar para caminar hacia una gestión integral de residuos. Convertir los tiraderos a cielo abierto en rellenos sanitarios controlados debería ser una de las prioridades de los municipios, ya que está en juego el medioambiente y el bienestar de la población. Trabajar en programas de educación y conciencia social para reducir, reusar y reciclar también debería ser un punto de inicio que obligatoriamente ya se debería estar impartiendo a escolares e instrumentando en todo el territorio nacional.

La problemática de los municipios de nuestro país es diversa. La falta de inversión para convertir los tiraderos a cielo abierto, controlar mejor los rellenos sanitarios y construir nuevos, la saturación de capacidad en los rellenos existentes y las protestas sociales por los olores, fauna nociva y el paso del transporte, representan sólo una parte de la problemática. No obstante, es alentador que algunos municipios han iniciado la búsqueda de soluciones, y en conjunto con inversionistas, gobiernos estatales y la autoridad ambiental, han establecido proyectos que no sólo han obtenido resultados satisfactorios y el reconocimiento de la población, sino que también han demostrado rentabilidad económica.

Dado que el volumen de basura que se genera diariamente tiende a crecer, tanto por el incremento de la población, como por el hecho de que cada vez producimos más basura per cápita, cualquier decisión que se tome hoy en día tendrá una repercusión en el futuro inmediato.

Las tecnologías que permiten gestionar la basura en toda su cadena, ya sea para su reciclaje, procesamiento, incineración o confinamiento con recuperación de energía están disponibles, por lo que es urgente que los municipios establezcan una visión prospectiva y destinen los recursos para desarrollar los estudios de factibilidad que determinen las mejores soluciones.

De acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica expedida en 2014, la energía generada por el aprovechamiento del poder calorífico del metano y otros gases asociados en los sitios de disposición de residuos se considera como energía limpia, por lo que el desarrollo de proyectos privados de generación de electricidad para venta de electricidad está permitido, por lo que los municipios pueden

tener una alternativa económica a las tarifas de alumbrado público y bombeo que les provee la Comisión Federal de Electricidad.

El desarrollo de un proyecto de recuperación de energía, ya sea eléctrica o térmica, requiere del análisis del tipo y cantidad de residuales urbanos disponibles, del conocimiento profundo de las tecnologías en cuestión para seleccionar la idónea, de identificar el portafolio y récord de operación de los proveedores, de establecer los estudios de factibilidad técnica y económica, y finalmente del conocimiento de la gestión de permisos y trámites ante la autoridad.

El propósito de esta guía es justamente presentar esta información clave para desarrollar e implementar proyectos exitosos.

## Capítulo 1. Gestión de residuos sólidos urbanos

### Gestión integral de residuos sólidos urbanos

Una de las tantas representaciones esquemáticas del triángulo de gestión integral de residuales se muestra en la figura 1.1, donde en forma descendente se presentan las acciones que deberían llevarse a cabo para gestionar adecuadamente los residuos sólidos urbanos [10]. En ella están inmersos los conceptos de las 3R (reducción, reúso y reciclaje) y se priorizan las opciones de manejo de residuos partiendo de su reducción, reúso, reciclaje, compostaje, digestión anaerobia, su conversión térmica con y sin recuperación de energía, y la disposición final en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto como última opción.

### Programas de reducción

Mientras se generen menos residuos, menor necesidad hay de disponerlos, por lo que es la manera más efectiva de reducirlos. Estos programas dependen en gran medida de políticas públicas y de la creación de incentivos económicos para modificar los patrones de producción y consumo de bienes, es decir, de establecer cambios tanto por el lado del consumidor como del productor, para uti-

lizar sólo lo necesario y comprometerse a una reducción en la cantidad de residuos que generan sus actividades, por ejemplo, para el productor, el rediseño de empaques y el incremento de la vida útil de productos, mientras que para el consumidor sería el cambio de hábitos para utilizar lo indispensable, generando el mínimo de residuos. Generalmente estamos acostumbrados a comprar más de lo que consumimos, lo recomendable es comprar sólo lo esencial, pues generalmente los sobrantes se tiran a la basura.

### Reúso

Consiste en reusar los materiales para la misma aplicación o para una distinta, sin tener que hacer modificaciones mayores. Implica darle la máxima utilidad a las cosas sin necesidad de destruirlas o deshacernos de ellas, ahorrando la energía que se hubiera destinado para hacer dicho producto. El tener mercados de bienes de segunda mano y tener productos que pueden ser retornables por el consumidor es muy útil, aunque no indispensable.

### Reciclaje

Hoy en día, cuando pensamos en basura, también pensamos en reciclaje, que es el proceso mediante el cual los productos de desecho son recolectados, transformados y nuevamente introducidos al ciclo de producción. A diferencia del reúso, en el reciclaje se requiere de materiales, energía y trabajo para la transformación del residuo, el cual se necesita que esté previamente separado. Prácticamente el 90% de los RSU son reciclables, sin embargo, sólo se puede



**Figura 1.1. Triángulo de gestión sustentable de residuos sólidos urbanos.**  
Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.



reciclar si el producto se puede vender. Algunos de los principales beneficios que se obtienen al reciclar son:

- Se reduce la necesidad de espacios en rellenos sanitarios y de incinerar la basura.
- Se ahorra energía y se evita la contaminación causada por la manufactura de productos a partir de materia prima virgen y la emisión de gases de efecto invernadero.
- Se conservan recursos naturales como agua, madera y minerales.
- Aumenta la competitividad de las empresas y la oferta de trabajo.

Son factores importantes en la cadena de reciclaje el costo del material separado, su pureza y el mercado existente para productos reciclados. La tabla 1.1 muestra una lista de los productos finales que pueden obtenerse a partir de residuos.

La realidad es que una gran proporción de los residuos que generamos no se puede reusar ni reciclar, o las cantidades existentes son tan pequeñas, que su reciclaje no es económicamente viable. Es aquí donde las autoridades municipales deben trabajar

**Tabla 1.1. Productos obtenidos del reciclaje de residuos.**

Fuente: Secretaría de Desarrollo Social. Manual para determinar la factibilidad de reducción y reúso de residuos sólidos municipales [11].

| Residuos                                                    | Producto Finales                                                                    |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Bagazo de caña de azúcar                                    | Papel                                                                               |
| Papel y cartón                                              | Cartón                                                                              |
| Polietileno de alta densidad                                | Tarimas de plástico                                                                 |
| Hule de llanta                                              | Loderas para camión                                                                 |
| Hule, cuerda nylon, alambre de acero                        | Llantas                                                                             |
| Polietileno, PVC                                            | Poliducto para agua e instalaciones eléctricas                                      |
| Madera de pino                                              | Aglomerados                                                                         |
| Pedacería de vidrio                                         | Toda clase de productos de vidrio                                                   |
| Fibra de vidrio de tercera                                  | Fibra de vidrio para aislamientos termostáticos                                     |
| Chatarra de acero                                           | Perfiles para fabricación, maquinaria y estructuras                                 |
| Chatarra de aluminio, hierro y bronce                       | Piezas de maquinaria en general                                                     |
| Chatarra de cobre                                           | Conectores eléctricos, tuercas y válvulas                                           |
| Chatarra de aluminio                                        | Lingote de aluminio para la industria envasadora                                    |
| Desperdicios de cinc, aluminio y plomo                      | Óxido de cinc                                                                       |
| Desperdicios de conductores eléctricos                      | Barras de cobre                                                                     |
| Pedacería de ladrillo refractario                           | Material refractario                                                                |
| Frutas, legumbres, pan, tortillas y carne en descomposición | Alimento para animales, mejoradores de suelos                                       |
| Huesos y cartílagos                                         | Alimentos, gelatinas, cosméticos, pegamentos, farmacéuticos, abonos y fertilizantes |
| Llantas                                                     | Suelas para zapatos, juegos infantiles                                              |
| Plástico en película                                        | Hidroxietil celulosa                                                                |
| Otros plásticos                                             | Juguetes, suelas para zapatos tenis, etc.                                           |
| Colchones viejos                                            | Colchones y bases para colchón                                                      |
| Envases de vidrio                                           | Envases para mermeladas, café, etc.                                                 |
| Botellas                                                    | Se vuelven a utilizar                                                               |
| Trapop                                                      | Estopa                                                                              |

estrechamente con la industria en la planeación y establecimiento de sistemas de gestión integral de los residuos que incluyan el reciclaje, así como otras alternativas para recuperar valor, usándolos como combustibles.

### Compostaje y digestión anaeróbica

La fracción orgánica de los RSU es susceptible de utilizarse en procesos de compostaje o digestión anaerobia para obtener composta y biogás, respectivamente, si es separada en su origen. La diferencia entre estos dos procesos consiste en que en el compostaje, la degradación de la materia orgánica se hace en presencia de aire (aerobia), mientras que la digestión anaerobia se realiza en un digestor con ausencia de oxígeno. La composición típica obtenida en el biogás es de 45%-60%  $\text{CH}_4$  y 40%-60%  $\text{CO}_2$ . En el capítulo 2 se presenta a mayor detalle este proceso.

### Tratamiento térmico con recuperación de energía

*Waste-to-Energy* (WTE) es el término en inglés que se emplea para los procesos en los que se obtiene energía eléctrica o térmica a través del tratamiento térmico (combustión principalmente) de los RSU. La tecnología dominante es la incineración en calderas de parrilla móvil, acondicionadas para quemar los residuales urbanos sin mayor separación y donde el vapor que se genera alimenta, ya sea a un turbogenerador para producir energía eléctrica, o se utiliza para propósitos de calefacción en zonas urbanas. A través de este proceso se obtiene una reducción del 80% al 95% en el volumen de los RSU, quedando únicamente cenizas de material inerte que pueden confinarse o utilizarse como insumo en la industria de la construcción.

Hasta hace algunas décadas, la incineración de RSU no era bien vista por la sociedad, ya que no había un control sobre los gases y compuestos tóxicos emanados de su combustión. Hoy en día, la tecnología de incineración cuenta con un equipamiento muy efectivo en el aspecto de control de emisiones y está reconocida a nivel mundial como una tecnología amigable con el medio ambiente, así como segura y eficiente en el aprovechamiento de la energía al utilizar el calor generado por la combustión.

Cabe mencionar que en los últimos años han surgido nuevas variantes tecnológicas a la incineración, que incorporan procesos de pirólisis, gasificación y arco de plasma, que buscan hacer más eficientes

los procesos y tener menores costos. En el capítulo 3 se describirá a detalle su estatus tecnológico.

### Confinamiento en rellenos

Este proceso es el último en la cadena de gestión integral de residuos sólidos urbanos y debería considerarse como la opción menos deseable. De hecho, como ya se mencionó, algunos países desarrollados sólo consideran al material inorgánico no reciclable como el único residual sujeto a confinarse. Sin embargo, en países como México donde una gran cantidad de RSU todavía es depositada en tiraderos a cielo abierto, los rellenos sanitarios representan una opción para mejorar la calidad de vida de la población y aminorar el impacto al medioambiente.

En los rellenos sanitarios se pueden tener las opciones de colectar y quemar el biogás en antorchas o aprovecharlo como combustible dentro de un paquete motogenerador y producir energía eléctrica. El capítulo 2 de la presente guía muestra los detalles de este proceso.

### Situación de residuos sólidos urbanos en México

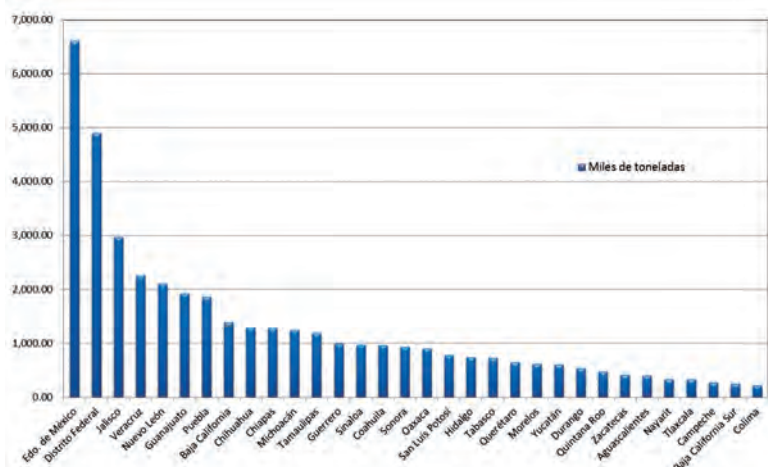
Los residuos sólidos urbanos se refieren a la basura producida en las ciudades e incluye los desechos generados en los hogares (basura doméstica) y otras fuentes (comercial, institucional, construcción y demolición, entre otras). No se incluyen los residuos peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación.

Es importante introducir algunos conceptos y datos básicos de generación y composi-

ción de RSU en nuestro país para entender la situación actual y las posibilidades para desarrollar procesos de gestión de los mismos. Las figuras 1.2 y 1.3 muestran la generación anual estimada de RSU por entidad federativa y la generación per cápita diaria, donde se estima un promedio nacional de 1.02 kg/hab/día. Por otro lado, la figura 1.4 muestra la composición promedio de los RSU estimada por la SEMARNAT en 2011 [12]. Esta composición puede no ser representativa para los residuos generados en determinada región o municipio, ya que factores como los niveles de ingreso y hábitos de consumo de la población (rural o urbana), ubicación geográfica y estacionalidad son los que en particular determinan su composición.

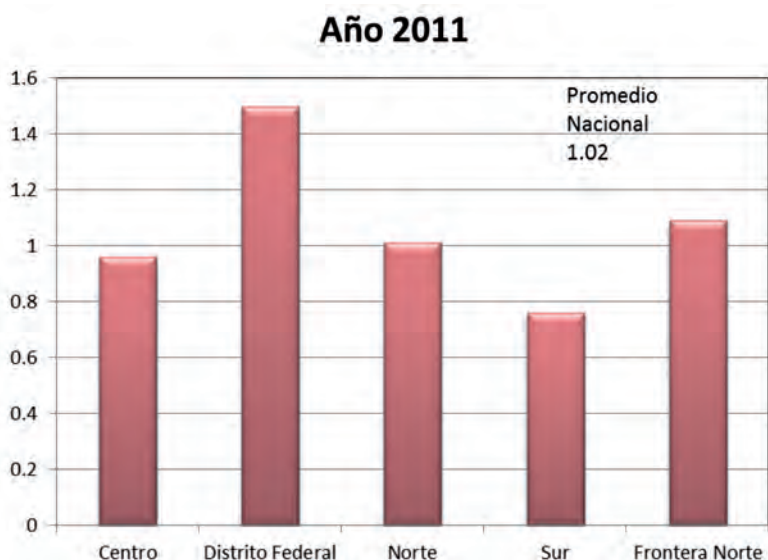
Generalmente, el contenido de materia orgánica en áreas rurales será mayor que en áreas urbanas, mientras que los porcentajes de plásticos, papel y cartón tenderán a ser mayores en áreas urbanas. Dado que toda materia orgánica puede ser sujeta a descomposición química, existen las posibilidades para derivar estos compuestos hacia plantas de composta o de digestión anaeróbica en donde se pueda generar un valor agregado, o en el último de los casos confinar esta materia en rellenos sanitarios. Los metales, vidrio, algunos plásticos, y productos de cartón y papel son materiales que pueden ser reciclados.

Cabe destacar que el contenido energético de los RSU es un factor importante a considerar, ya que de éste dependerá su utilización como material combustible en aplicaciones térmicas como son las calderas de incineración. Para efectos de comparación, en la tabla 1.2 se presentan datos de poder calorífico y humedad para diversas muestra colectadas por el IIE [13] en diversas localidades del país. Se muestran datos de humedad y po-

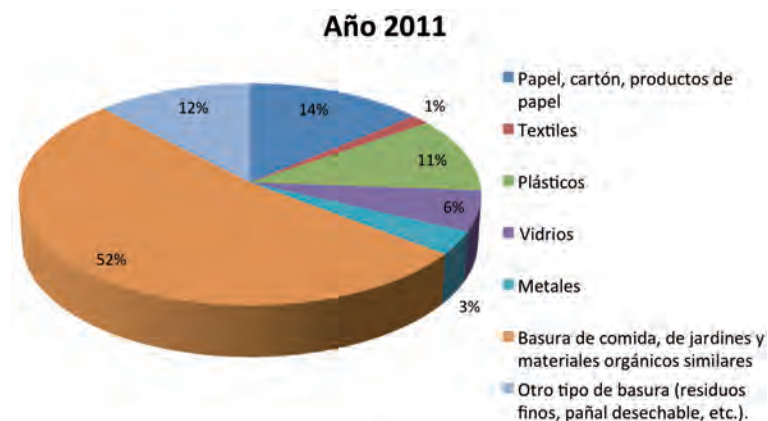


**Figura 1.2. Generación estimada de residuos sólidos urbanos por entidad federativa [12].**

Fuente: SEMARNAT. SNIARN. Base de datos estadísticos, módulo de consulta temática, dimensión ambiental, [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx) (consulta: 1 de junio de 2012).



**Figura 1.3. Generación per cápita diaria (kg/hab/día) por región del país [12].**



**Figura 1.4. Distribución promedio de los RSU generados en el país [12].**

**Tabla 1.2.** Características de diferentes muestras de RSU del país [13].

| Sitio                  | Humedad | Poder calorífico superior (kJ/kg) | Poder calorífico inferior (kJ/kg) |
|------------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Guanajuato. Muestra 1* | 49.90%  | 10,945                            | 8,956                             |
| Guanajuato. Muestra 2  | 33.73%  | 12,164                            | 10,491                            |
| Puebla*                | 38.70%  | 12,420                            | 10,587                            |
| Matamoros              | 27.25%  | 14,855                            | 13,125                            |
| Estado de México*      | 44.33%  | 13,402                            | 11,454                            |
| Mexicali               | 13.90%  | 19,726                            | 18,118                            |
| Morelia                | 23.71   | 10,024                            | 8,721                             |
| Morelos*               | 41.2%   | 14,255                            | 12,317                            |

\* Muestras tomadas en temporada de lluvias.

der calorífico superior e inferior, siendo el “poder calorífico inferior” el calor realmente aprovechable, una vez descontada la energía necesaria para evaporar el agua. Los datos difieren según las distintas condiciones de humedad de las muestras. Otros factores que tienen influencia en el poder calorífico, aparte de los productos ya mencionados de la propia composición (figura 1.4) son la estación del año, el nivel socioeconómico, la condición urbana o rural y la situación de separación de reciclables o pepena establecida en la localidad. Para propósitos de caracterización se recomienda la ejecución de muestreos de los RSU, de acuerdo con las Normas Mexicanas: NMX-AA-015-1985, muestreo y método de cuarteo de residuos sólidos municipales [14], y NMX-AA-022-1985, selección y cuantificación de subproductos [15].

Para una caracterización completa de los RSU se recomienda realizar análisis último y próximo, incluyendo elementos como el cloro y el azufre, los cuales pueden llegar a formar hidroclouros (HCl) u óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), tanto en el biogás como en los gases de combustión, que requerirán ser controlados o eliminados.

### Marco regulatorio de residuos sólidos urbanos en México

A continuación se presentan para referencia del lector, las leyes y normas que regulan el manejo y disposición de residuales en México. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

tiene bajo su responsabilidad establecer las normas oficiales que regulen esta actividad.

- El artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que los municipios tendrán a su cargo las funciones de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos.
- La “Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos” (LGPGIR) [16] junto con su “Reglamento de Ley” [17] norman las disposiciones que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, dándoles la libertad a los municipios para prestar o concesionar el servicio público de manejo integral de RSU. Asimismo se establecen las bases para, entre otras actividades, fomentar la valorización de residuos, así como el desarrollo de mercados de subproductos bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológicos y económicos, y esquemas de financiamiento adecuados.
- El “Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2013-2018” [18] es el instrumento que establece la política pública en materia de residuos a través de objetivos, lineamientos, acciones y metas que contribuyan a garantizar el derecho de toda persona al ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, valorización y la gestión integral de los residuos. Dicho programa también contiene los elementos necesarios para la elaboración e instrumentación de los programas locales de la prevención de la gestión integral de los residuos de ma-

nejo especial y sólidos urbanos, a cargo de las entidades federativas y municipios respectivamente.

- La NOM-083-SEMARNAT-2003 [19] da las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, por lo que esta norma es fundamental para todo relleno sanitario.
- La NOM-098-SEMARNAT-2002 [20] hace referencia al tema de protección ambiental, especificaciones para la incineración de residuos, operación y límites de emisión de contaminantes. Cabe hacer notar que en esta norma se cataloga a las cenizas, resultado del proceso de incineración, como peligrosas, por lo que su manejo deberá cumplir con lo establecido para estos residuos.
- La NOM-085-SEMARNAT-2011 [21] hace referencia a la contaminación atmosférica para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos, o cualquiera de sus combinaciones y establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, al igual que los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión. Cabe hacer notar que existe un proyecto de modificación de esta norma [22] en donde se reducen sustancialmente los límites máxi-

mos de emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y partículas, haciendo necesaria la instalación de equipo de control de emisiones con alta eficiencia para nuevas instalaciones.

- La NOM-001-SEMARNAT-1996 [23] establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y cuerpos, los cuales deben ser considerados en la instalación de nuevas plantas de generación.

Por otro lado, la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética [24] también debe incluirse dentro del marco jurídico, ya que regula el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad, con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como elaborar la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética.

### Disposición de residuos sólidos urbanos en México

Según datos presentados en la figura 1.5 [12], en 2011 el país contaba con 196 rellenos sanitarios y 20 rellenos de tierra controlados. En 2005, el Banco Mundial [25] concluyó que sólo el 15% de los RSU generados en México eran dispuestos adecuadamente. Según estimaciones realizadas por la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) en 2011 [26], apenas el 35% de los rellenos sanitarios bajo supervisión municipal cumplían con las normas ambientales (principalmente la NOM 083), tanto de operación como de construcción de un relleno sanitario. La figura 1.6 [12] muestra el destino de los RSU en México, donde el 23.2%, equivalente a 9,519,000 ton/año, fue dispuesto en tiraderos a cielo abierto. Por otra parte, haciendo referencia al 4.8% de reciclaje de la figura 2.6, los residuos que tienen un mercado para reciclaje son papel, cartón, vidrio, plástico, aluminio, hule y chatarra de metales ferrosos y no ferrosos, sin embargo, datos del Consejo Nacional de Industriales Ecológicos (CONIECO) [27] indican que en México sólo se recicla el 19% de los metales que se desechan, 13% del vidrio, menos de una décima parte del papel y 3.1% de los plásticos que se van a la basura.

La figura 1.7 muestra el crecimiento en la capacidad y número de rellenos sanitarios en México en el periodo 1995-2011.



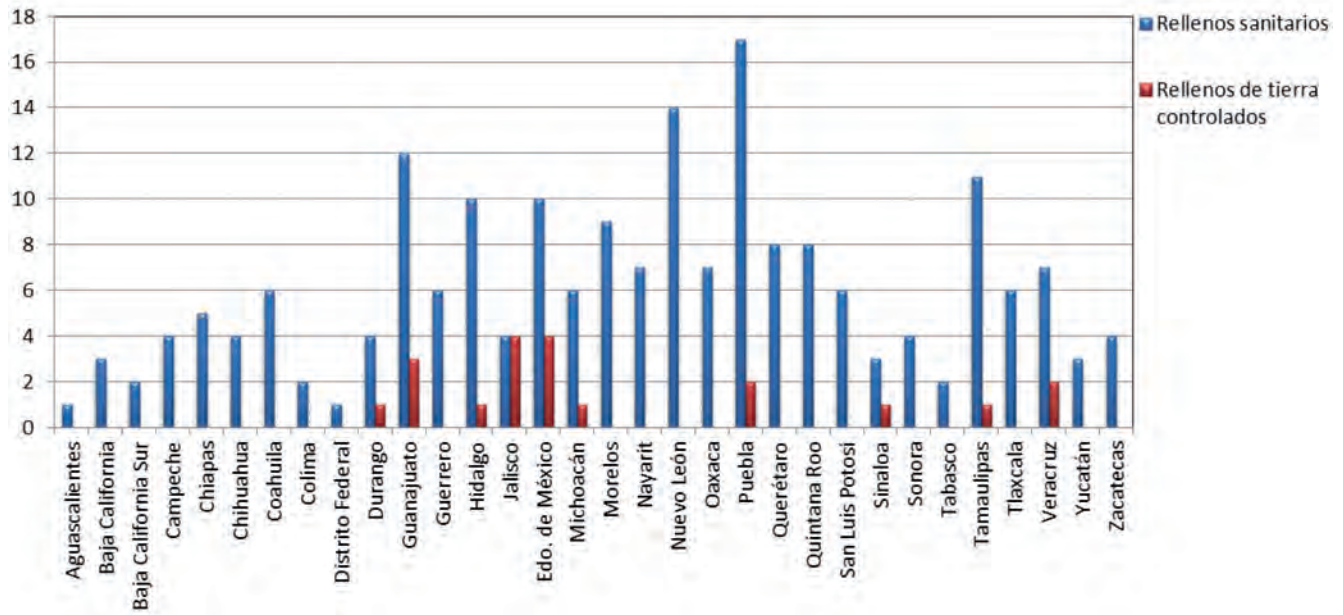


Figura 1.5. Instalaciones para la disposición de residuos sólidos urbanos.

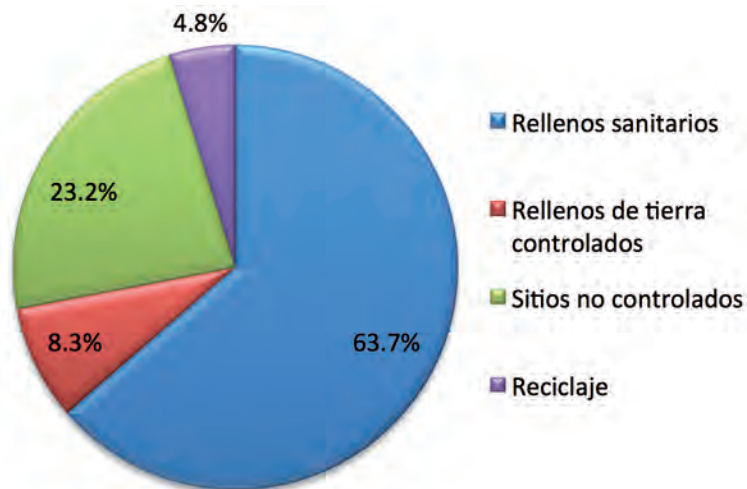


Figura 1.6. Destino de los RSU en 2011.

### Rellenos sanitarios registrados en el mecanismo de desarrollo limpio

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es uno de los tres mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto [28] para facilitar la ejecución de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por las partes, que son países en vías de desarrollo, en cooperación con países desarrollados (países anexo I). Por un lado tiene como objetivo ayudar a los países que son parte del anexo I, a cumplir con sus metas de limitación y reducción de emisiones de

GEI y por el otro, ayudar a los países no anexo I, al logro de un desarrollo sostenible.

El mecanismo permite que las partes no incluidas en el anexo I se beneficien de las actividades de proyectos que tengan por resultado reducciones certificadas de emisiones y que las partes incluidas en el anexo I utilicen las reducciones certificadas de emisiones resultantes de esas actividades de proyectos, para contribuir al cumplimiento de una parte de sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos. Es un mecanismo de mercado, ya que los créditos resultantes de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero o por la absorción en los sumideros se comercializan y quien los adquiere los contabiliza para el logro de los compromisos de reducción asumidos.

A la fecha, México cuenta con 17 proyectos registrados en el portal del Mecanismo de Desarrollo Limpio de las Naciones Unidas (UNFCC) [29] que comercializan bonos de carbono, tal como se muestra en la tabla 1.3.

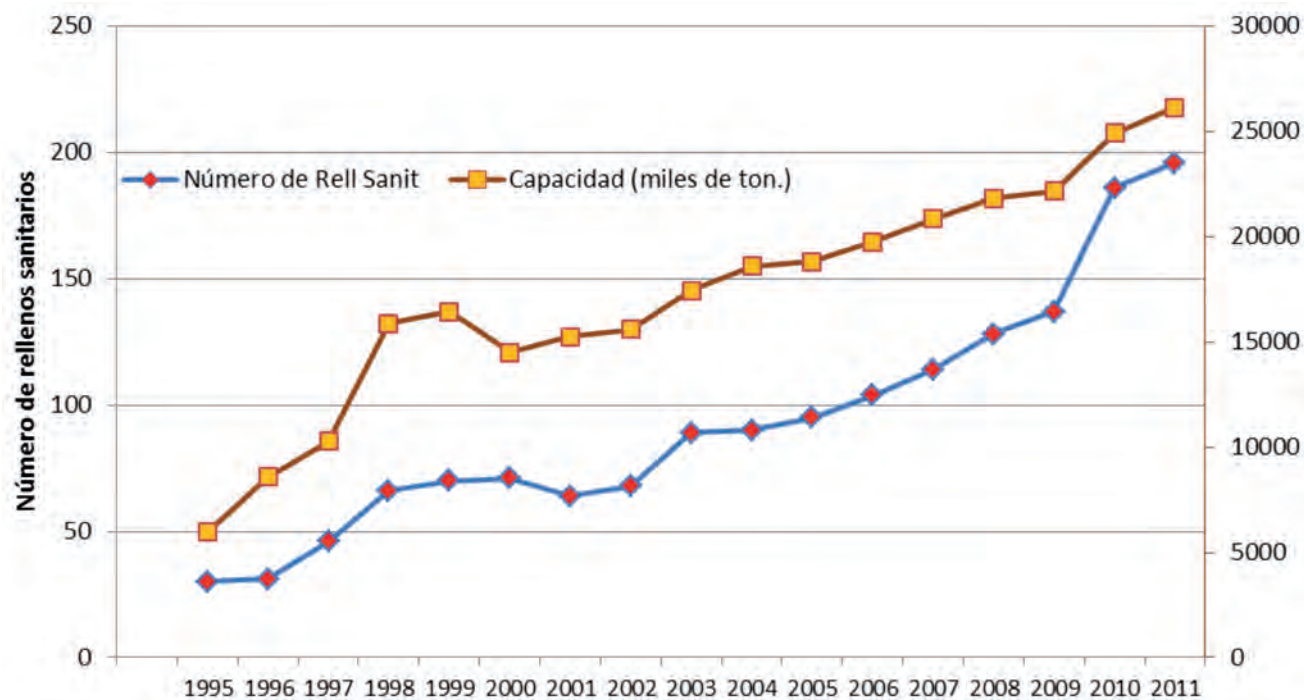


Figura 1.7. Evolución de la instalación de rellenos sanitarios y cantidad depositada de RSU en México.

Tabla 1.3. Proyectos registrados por México en el MDL [29].

| Nombre del proyecto                                                      | Localidad              | Fecha de registro | Reducciones de CO <sub>2</sub> eq por año (ton) |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|
| Aguascalientes Ecomethane Landfill Gas to Energy Project                 | Aguascalientes, Ags.   | 15 Jul 06         | 162,593                                         |
| Ecatepec Ecomethane Landfill Gas to Energy Project                       | Ecatepec, Edo. de Mex. | 02 Oct 06         | 209,353                                         |
| Hasars Landfill Gas Project                                              | Zapopan, Jal.          | 05 Oct 07         | 137,735                                         |
| Tultitlan Ecomethane Gas to Energy Project                               | Tultitlán, Edo. de Mex | 30 Nov 07         | 41,681                                          |
| Ciudad Juarez Landfill Gas to Energy Project                             | Ciudad Juárez, Chih.   | 30 Nov 07         | 170,499                                         |
| Proactiva Merida Landfill Gas to Energy Project                          | Mérida, Yuc.           | 31 Ene 08         | 106,340                                         |
| Durango Ecomethane Gas to Energy Project                                 | Durango, Dgo.          | 25 Feb 08         | 83,340                                          |
| Milpillas Landfill Gas Recovery Project                                  | Temixco, Mor.          | 06 Nov 08         | 153,588                                         |
| Monterrey II LFG to Energy Project                                       | Monterrey, N. L.       | 12 Feb 09         | 225,323                                         |
| Tecamaco EcoMethane Landfill Gas to Energy Project                       | Tecamaco, Edo. de Mex. | 21 Mar 09         | 57,196                                          |
| Verde Valle Landfill Gas Project                                         | Tijuana, B. C.         | 09 Jul 09         | 197,259                                         |
| Landfill Gas Management Project Puerto Vallarta Landfill Site, Mexico    | Puerto Vallarta, Jal.  | 30 Nov 09         | 52,267                                          |
| Coyula Landfill Gas Project                                              | Guadalajara, Jal.      | 29 Abr 10         | 86,707                                          |
| Culiacán Northern Landfill Gas Project                                   | Culiacán, Sin          | 09 Jul 10         | 42,746                                          |
| Landfill Gas Recovery and Flaring Project in the El Verde Landfill, León | León, Gto.             | 27 Oct 10         | 178,901                                         |
| Relleno Norte Landfill Gas Project                                       | Cancún, Q. R.          | 04 Ene 11         | 36,878                                          |
| Monterrey I LFG to Energy Project                                        | Monterrey, N. L.       | 28 Jun 11         | 209,273                                         |

Por otro lado, a junio de 2012 sólo tres de los 196 rellenos sanitarios, situados en las ciudades de Monterrey, Aguascalientes y Ciudad Juárez, cuentan con infraestructura para recuperar energía del biogás producido. En el capítulo 7 se describen dichas instalaciones.

De acuerdo con COCEF [26], en México existen al menos 85 rellenos con potencial para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento o quema del biogás.

### Plantas de conversión térmica

En cuanto a plantas de conversión térmica, en México sólo se cuenta con plantas incineradoras para residuos peligrosos. El INE [30] reportó en 2003 la existencia de 43 incineradoras con autorización, 36 para residuos biológicos infecciosos y siete para residuos indus-

triales, sin embargo, a la fecha se menciona la existencia de un mayor número de equipos que incluyen hornos cementeros [31, 32]. Actualmente no se tiene ninguna planta de conversión térmica que produzca energía, aunque ya hay antecedentes de estudios de factibilidad para el desarrollo de las primeras instalaciones de este tipo.

### Costos de manejo y confinamiento

En México no existen costos específicos para el manejo y confinamiento de RSU, ya que la responsabilidad recae en la autoridad municipal que tiene la facultad de crear organismos autónomos para este fin, o concesionar el servicio de manejo a empresas privadas. Sin embargo, con el afán de presentar algunos datos que sirvan de referencia, la tabla 1.4 muestra rangos de costos de los que se tiene referencia en el IIE [33]. Desde luego que éstos variarán dependiendo del tamaño de la población, desarrollo económico de la zona, entidad propietaria del terreno y disponibilidad cercana de sitios de confinamiento.

**Tabla 1.4.** Costos de referencia para manejo y confinamiento de RSU. Fuente IIE [33].

| Actividad                                                           | Costo (pesos)/ton |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Recolección                                                         | \$100-\$600       |
| Transporte y transferencia                                          | \$30-\$180        |
| Tarifa de confinamiento ( <i>tipping fee</i> ) en relleno sanitario | \$125-\$350       |

## Capítulo 2. Tecnología de generación eléctrica a partir de biogás de relleno sanitario

El relleno sanitario es una obra de ingeniería diseñada para recibir residuos sólidos municipales en un área lo más pequeña posible, que cuenta con sistemas de captación de gas y lixiviados, con el objetivo de limitar los impactos negativos al medioambiente. Desafortunadamente, la gente tiende a confundir su imagen por la de sitios no controlados donde se generan malos olores, moscas, fauna nociva y donde se contamina el ambiente. En la realidad, estos sitios están diseñados cuidadosamente y preparados para operar durante el tiempo en que se confinan los residuos, manteniendo su cuidado por periodos de 30 años después de que el relleno se cierra.

Para el interesado en conocer a fondo el tema de rellenos sanitarios y su función dentro de la gestión integral de residuos, el Portal Latinoamericano de Residuos Sólidos (GIRESOL) [34] presenta en su biblioteca virtual, un compendio de informes bastante extenso y copia de presentaciones de eventos organizados tanto en México como en diversas partes del mundo. Asimismo está disponible una variedad de guías y programas [35, 36, 37, 38, 39] para temas de residuos sólidos, elaboradas por la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ), en conjunto con el Gobierno Federal y diversos Estados del país.

Los términos comúnmente utilizados en el tema de rellenos sanitarios incluyen:

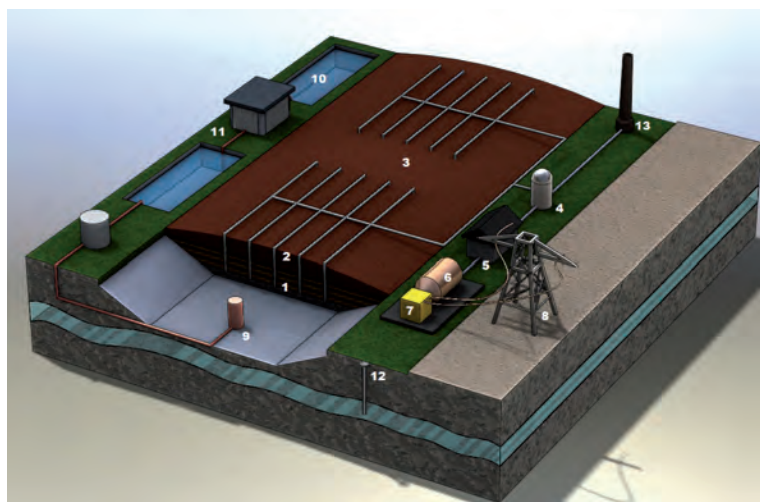
|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Celda</b>                          | Las celdas pueden ser fosas, superficies planas o depresiones naturales donde se colocan los RSU. Regularmente son cuadradas y van desde 60 m hasta 300 m de largo y de 4.5 m hasta 15 m de ancho, en su caso con pendientes laterales de 1.5:1 a 2:1 [40].                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Celda diaria</b>                   | Se define como la unidad básica de construcción del relleno sanitario y está constituida por la cantidad de basura que se entierra en un día y por la tierra necesaria para cubrirla.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Cubierta diaria</b>                | Consiste de 15 cm a 30 cm de suelo nativo o material alternativo tales como composta, arena de fundición o arcilla, que es aplicada en los frentes de trabajo al final de cada periodo de operación. Históricamente, las cubiertas diarias se aplicaban para prevenir la fauna nociva, moscas y otros vectores de enfermedad. Actualmente, la cubierta diaria es usada principalmente para controlar la dispersión del material, reducir olores y controlar la entrada de agua hacia el interior del relleno sanitario durante la operación. |
| <b>Banco o terraza</b>                | Son usados para mantener la estabilidad de la pendiente del relleno sanitario, para la colocación de los canales de drenado del agua superficial y para la colocación de la tubería para la recuperación de gas del mismo. La elevación final incluye la capa de cubierta del relleno.                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Geomembrana</b>                    | Lámina flexible impermeable de material sintético (PVC o polietileno de alta densidad) utilizada como impermeabilizante inferior, lateral y superior en rellenos sanitarios, pozos de lixiviación y reservorios para agua.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Revestimiento de vertederos</b>    | Materiales (ya sea naturales o hechos por el hombre) que son usados para alinear el fondo y los lados en el fondo del relleno sanitario. Los revestimientos usualmente consisten de capas sucesivas de arcilla compactada y/o material geosintético, diseñado para prevenir la migración de los lixiviados del relleno y el gas del mismo. El sistema de captación de lixiviados se instala inmediatamente encima del sistema de impermeabilización.                                                                                         |
| <b>Capa final de cubierta</b>         | Es aplicada sobre la superficie del relleno sanitario después de que las operaciones de éste son completadas. Las cubiertas del relleno sanitario consisten de capas sucesivas de arcilla compactada y/o material geosintético.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Lixiviado</b>                      | Líquido que se forma en el fondo del relleno sanitario como resultado de la percolación de la precipitación, escurrimientos no controlados y agua de irrigación dentro del relleno. También incluye agua inicialmente contenida en la basura.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Monitoreo ambiental</b>            | Involucra las actividades asociadas con la colección y análisis de agua y aire, usados para monitorear el movimiento de los gases de rellenos sanitarios y lixiviado en el sitio del mismo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Clausura del relleno sanitario</b> | Término usado para describir los pasos que deben considerarse para cerrar y asegurar un sitio, una vez que las operaciones han sido completadas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Cuidado post-clausura</b>          | Se refiere a las actividades asociadas con los términos de mantenimiento de los rellenos sanitarios, típicamente 30 a 50 años.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Remediación</b>                    | Se refiere a aquellas acciones necesarias para detener y limpiar la liberación de contaminantes no previstos al ambiente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |



En la actualidad, un relleno sanitario no se puede construir en cualquier sitio, requiriéndose la participación de expertos en geología, hidrogeología, hidráulica, química, mecánica de suelos, ecologistas y consultores en tránsito vehicular. Para su ubicación, un buen sitio se caracteriza principalmente por no contar con acuíferos cercanos, ya que uno de los riesgos principales a considerar es la contaminación por lixiviados, los cuales son fluidos ricos en elementos con un alto contenido de materia orgánica y algunos metales pesados altamente contaminantes como el plomo, que al desplazarse verticalmente pueden llegar al subsuelo.

El diseño de un relleno sanitario debe contemplar los procesos que ocurren en la descomposición de la basura, pues no sólo se producen lixiviados sino el llamado biogás, producto de la digestión anaerobia del contenido orgánico de los RSU. El biogás es una mezcla constituida principalmente de metano y bióxido de carbono, en concentraciones fluctuantes entre 45% a 60% para el metano y entre 40% a 60% para el bióxido de carbono. Otros constituyentes presentes en concentraciones menores son el monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, nitrógeno, oxígeno y trazas de compuestos orgánicos diferentes al metano.

Para prevenir las fugas de biogás y lixiviados, el sitio es acondicionado con geomembranas o capas de material arcilloso impermeable. Se suele utilizar una capa de material arcilloso para prevenir la perforación de la cubierta, tanto en la base como en la superficie del relleno.



**Figura 2.1. Diagrama esquemático de un relleno sanitario con producción de biogás para generación eléctrica.**

Sistemas de tuberías de desagüe de lixiviados y de colección de biogás son instalados para extraer y tratar de una manera controlada ambos compuestos, que de otra forma se escaparían aleatoriamente al medioambiente. Los lixiviados que se acumulan por encima de la cubierta en la base del relleno son bombeados, ya sea para su reinyección al relleno o para un tratamiento final en una planta construida para este fin, antes de disponer de este líquido como un efluente no contaminante en canales de desagüe convencionales.

En una operación diaria, los RSU son colocados y compactados al interior de celdas, y al final del día son cubiertos con una capa de suelo nativo o de algún material mineral como el tepetate, para aislarlos del aire y de la lluvia.

La captura y tratamiento del biogás generado es necesario, debido al carácter explosivo de las mezclas biogás—aire, al comportamiento del  $\text{CH}_4$  y del  $\text{CO}_2$  como gases de efecto invernadero y al valor energético del metano. Ambos compuestos son importantes gases de efecto invernadero, sin embargo, el grado de la contribución de cada uno es muy diferente, siendo el efecto del metano 23 veces mayor al del bióxido de carbono [41].

El biogás producido puede ser colectado mediante tubos verticales u horizontales perforados y llevado, ya sea a un mechero para su quemado, o a una instalación de generación eléctrica donde es comprimido, filtrado, deshidratado e introducido en motores de combustión interna que generan energía eléctrica (figura 2.1).

De acuerdo con la figura se identifican tres procesos principales: a) manejo de gas y generación eléctrica, b) manejo de líquidos y c) manejo de riesgos.

a) Manejo del gas y generación eléctrica

1. El relleno sanitario se forma de celdas de basura comprimida y sellada por capas de tierra u otros materiales y una geomembrana.
2. En el relleno se hacen pozos para colocar tubería con perforaciones para extraer el gas. Los pozos verticales de extracción de gas son de 18 a 36 pulgadas de diámetro y generalmente son instalados después que el relleno sanitario o porciones de éste han sido completados. En ellos se inserta tubería de PVC perforada de 4 a 6 pulgadas de diámetro inmersa en un contorno de grava. También existe la posibilidad de colocar tubería en forma horizontal, colocada en trincheras para casos de rellenos sanitarios profundos o para coleccionar biogás en celdas activas.
3. Una red de tubería une todos los pozos y transporta el biogás hasta cabezales en donde se monitorea y evalúa el comportamiento de la sección de pozos. El biogás es conducido mediante tubería flexible de PVC o polietileno de alta densidad hasta las instalaciones anexas, donde se procederá ya sea a su quemado, o a su acondicionamiento previo para uso como combustible en el paquete de generación.
4. El biogás debe pasar por un sistema de filtrado de impurezas que pudieran dañar los componentes del motogenerador y reducir la eficiencia del sistema, y por un condensador para retirar de él la humedad. Esta planta puede tener equipo adicional lavador de gas para purificar el metano, separando el bióxido de carbono.
5. El biogás es extraído del relleno mediante una bomba que crea una presión negativa en éste, con lo que de esta manera fluye hasta las instalaciones de quemado o acondicionamiento.
6. El biogás llega al paquete de generación que incluye motores de combustión interna.
7. El biogás se quema en el motor, generando la electricidad en el generador eléctrico acoplado.

8. Un transformador incrementa el voltaje para poder ser incorporado a la red eléctrica.

b) Manejo de los líquidos (lixiviados)

9. Los lixiviados se drenan mediante un sistema de bombas y tuberías ubicadas inmediatamente por encima de la cubierta inferior. Las terrazas tienen pendiente en el fondo del relleno sanitario para que el lixiviado drene hacia los canales de recolección. La tubería perforada colocada en cada canal es dirigida a una ubicación central, desde donde se bombea para su tratamiento o reinyección a la superficie del relleno sanitario. La pendiente crucial de las terrazas es de 1% a 5%, y la pendiente de los canales de drenado es de 0.5% a 1.0 % [40].
  10. Los lixiviados son llevados a una planta de tratamiento (por ejemplo una laguna de evaporación), donde se retira una buena parte de sus contaminantes.
  11. Los líquidos se reciclan al relleno para facilitar la descomposición de la materia orgánica. Otras alternativas incluyen tratamiento seguido de disposición por aspersión, tratamiento de tierra húmeda y la descarga al sistema de tratamiento de aguas residuales, una vez que se cumple con la norma de disposición de éstas.
- c) Manejo de riesgos
12. Se cuenta con pozos de monitoreo de aguas subterráneas para verificar la existencia de fugas de lixiviados del relleno.
  13. Se cuenta con una antorcha de emergencia para quemar el gas metano y otros

compuestos, cuando la planta generadora de energía no pueda emplearlo (como por ejemplo, cuando recibe mantenimiento).

Si se estima que en los RSU los materiales como papel, alimentos y madera representan un 70%, los de origen petroquímico un 15% y el restante está constituido por vidrio, metal y otros minerales, en teoría la biorreacción completa de una tonelada de biomasa (base seca) puede generar hasta  $200 \text{ Nm}^3$  (normalizados) de gas metano. Dado que la concentración en peso de biomasa seca en los RSU es del orden del 40%-60%, entonces se tiene un rango teórico de generación de metano de  $80\text{-}120 \text{ Nm}^3$  por tonelada de RSU. Sin embargo, un relleno sanitario está lejos de ser un biorreactor perfecto y parte de la biomasa no se llega a degradar por falta de condiciones de humedad requerida para sostener el crecimiento bacterial, por lo que estas cifras de rendimiento suelen ser mucho menores, siendo una cifra conservadora  $55 \text{ Nm}^3$  por tonelada de RSU [42]. En términos prácticos, se estima que por cada millón de toneladas se generan  $9.34 \text{ m}^3/\text{min}$  de biogás [43], lo que equivale a una potencia de  $0.85 \text{ MW}$  eléctricos y una generación de 6.3 millones de kWh por año [44, 45].

Por otro lado, el biogás tiene como promedio un poder calorífico entre  $18.8$  y  $23.4 \text{ MJ/m}^3$ , lo que equivale a  $5.0 - 6.5 \text{ kW-h/m}^3$ , que lo cataloga como un combustible sumamente útil para producción de energía eléctrica en un motogenerador o como un combustible que se puede quemar en calderas u otros equipos térmicos.

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003, la disposición final de residuos sólidos urbanos se clasifica en cuatro categorías, las cuales definen la capacidad de un relleno sanitario. La posibilidad de contar con un aprovechamiento de generación eléctrica normalmente aplica para los tipos A, B y C.

### Estimación del potencial de generación de un relleno sanitario

La producción de biogás de un relleno sanitario es función de la composición de RSU y el propio diseño de la instalación. También influye la población bacteriana presente, las características térmicas, la entrada de humedad y el escape de gas. Adicionalmente, la heterogeneidad espacial y de los propios residuales propicia que interactúen una amplia gama de condiciones físicas y ecosistemas biológicos, lo que hace compleja la predicción y el control del relleno sanitario.

**Tabla 2.1.** Categorías de los sitios de disposición final.

| Tipo | Tonelaje recibido (Ton/Día) |
|------|-----------------------------|
| A    | Mayor a 100                 |
| B    | De 50 hasta 100             |
| C    | De 10 hasta 50              |
| D    | Menor a 10                  |

La vida útil del relleno sanitario depende de la edad de la basura confinada, de las buenas prácticas del confinamiento de la misma y de las obras efectuadas para su clausura. Después de un año de que el relleno sanitario inicie operaciones, se tienen ya las condiciones anaeróbicas propicias para la generación de biogás. La figura 2.2 tomada de la *Environmental Protection Agency* (EPA) [46] muestra el comportamiento de la composición del gas de relleno sanitario a partir del confinamiento de los RSU, distinguiendo cuatro fases. La primera es aeróbica, mientras que las siguientes son anaeróbicas. El gas metano aparece en la fase III, llegando a estabilizarse hasta la fase IV, que corresponde aproximadamente al lapso de un año.

En la actualidad existen modelos teóricos que permiten predecir la degradación de la basura y la generación de biogás, sin embargo, en la práctica, la vida útil de un relleno sanitario se establece con mayor certeza después de realizar pruebas de producción en campo, que incluyen el análisis del gas producido en pozos construidos expofeso para la ejecución de métodos de pruebas para la determinación del flujo de producción de gas de relleno sanitario, como el establecido en el método 2E de la USEPA [47].

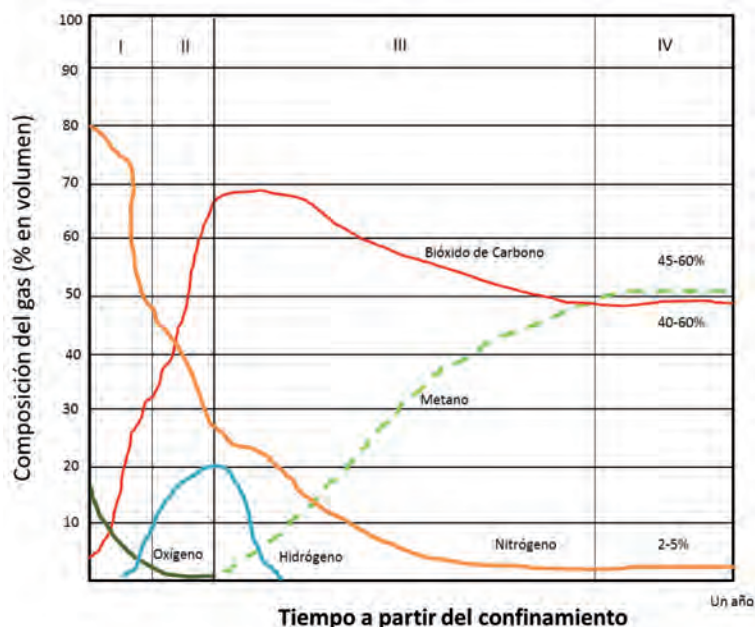


Figura 2.2. Modelo típico de generación de gas en rellenos sanitarios.

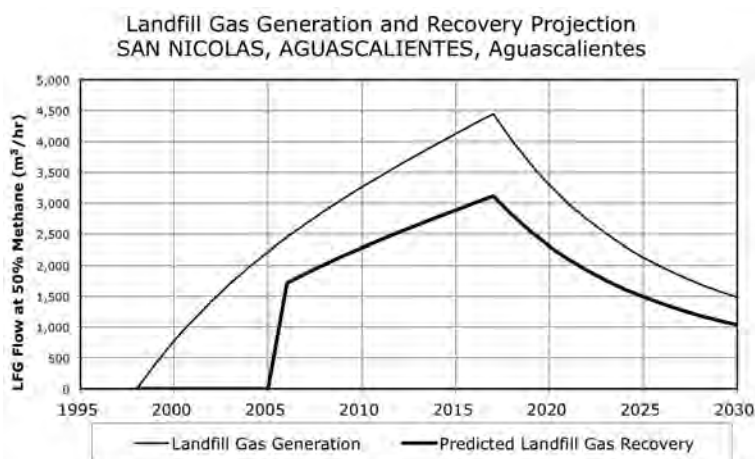


Figura 2.3. Curvas de predicción para la producción de metano del relleno sanitario de Aguascalientes.

### Modelo de producción de biogás

El *Landfill Methane Outreach Program* (LMOP) de la EPA desarrolló en 2003, el primer modelo de biogás mexicano [48] en colaboración con la Agencia Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID por sus siglas en inglés) y otras agencias gubernamentales mexicanas, para ayudar a operadores y dueños de rellenos sanitarios a evaluar la viabilidad, así como los beneficios en la captación y uso del biogás como fuente de energía.

El modelo proporciona valores precalculados para el índice de generación y generación potencial de metano, los cuales fueron desarro-

llados usando datos específicos del clima, de la caracterización de residuos y específicos sobre el biogás de sitios representativos en México, los cuales permiten que los usuarios puedan generar índices de generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios, localizados en diversas regiones de México. En esta liga de internet [49] se puede descargar dicho *software* de manera gratuita, junto con su manual de usuario, con el cual se pueden obtener curvas de predicción de metano durante el tiempo de vida del relleno sanitario.

En la figura 2.3 se muestran como ejemplo las curvas de predicción para la producción de metano del relleno sanitario de Aguascalientes, con datos colectados por el IIE en 2012.

### Planta de generación eléctrica

Más del 85% de las instalaciones que generan electricidad a partir del biogás de relleno sanitario utilizan motores de combustión interna [50], siendo el porcentaje restante compartido por turbinas de gas y microturbinas. Los motores de combustión interna son la tecnología ideal para aplicaciones entre 800 kW y 3MW, y para mayores tamaños se utilizan turbinas de gas (> 5 MW) y las microturbinas para potencias entre 30 kW y 250 kW. En cualquier caso, existe la posibilidad de hacer una combinación de equipos para cubrir la capacidad de generación de biogás de un relleno sanitario.

Los motores o turbinas suelen venir en módulos prefabricados de planta que incluyen su generador eléctrico y sistema de enfriamiento, por lo que su instalación es sencilla y sumamente rápida, en comparación con otras tecnologías de generación como las calderas de incineración.



En la figura 2.4 se muestra un esquema simple de la distribución de sistemas y equipos de una planta de generación eléctrica con biogás de relleno sanitario

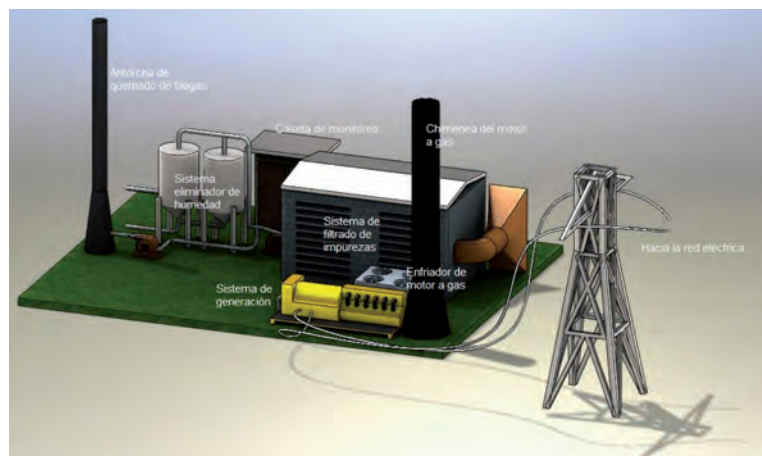
- Sistema de bombeo de gas. Consta de un soplador que provee la presión negativa en la red colectora, para llevar el biogás del relleno sanitario a la estación de acondicionamiento y filtrado de gas.
- Sistema eliminador de humedad. Consiste en un condensador de la humedad presente en el biogás. El agua se retorna al relleno sanitario.
- Módulo de acondicionamiento del biogás para separación de impurezas. Después de eliminar la humedad, cualquier impureza del gas, ya sean partículas o algún compuesto polimérico (siloxanos) se remueve del biogás mediante un sistema de filtros o absorbentes. Asimismo puede incluirse un sistema lavador de gases para elevar el porcentaje de metano mediante la remoción de  $\text{CO}_2$ .
- Compresor de gas para proveer la presión requerida del mismo para operación del motor a gas.
- Paquete motogenerador. Incluye un motor de combustión interna a gas con bujía que trabaja de manera similar a un motor de un automóvil, con la diferencia que en lugar de gasolina usa biogás. Normalmente, el motor a gas está equipado con mecanismos compensadores de presión y controles de combustión para responder eficientemente ante cambios en la calidad del biogás. Se acopla a un

generador eléctrico que permite generar la electricidad a bajo voltaje. El motogenerador está dentro de un gabinete de acero inoxidable sobre el cual se suele colocar el sistema de enfriamiento del motor.

- Antorcha para quemar el biogás no utilizado por la planta eléctrica.
- Sistema de medición de gas. Cuenta con analizadores para determinar la composición de gas, medidores de flujo para contabilizar con precisión el flujo de biogás y un sistema automático de adquisición y reporte de datos. La contabilidad de estos parámetros es indispensable para la acreditación de bonos de carbono por parte del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Normalmente, estos equipos están certificados y envían reportes automáticos vía satélite.

Generalmente, la operación de la planta de generación eléctrica está a cargo de un par de operadores desde un cuarto de control instalado en el mismo sitio, mientras que el monitoreo de producción del gas de relleno sanitario lo realiza una técnico, recorriendo los puertos de medición localizados en cabezales que reciben flujo de grupos de pozos. En los puertos de medición se conectan analizadores portátiles de gas de relleno sanitario, habilitados para medir el flujo, la composición del gas y la temperatura, lo cual permite detectar o corregir oportunamente fallas en el sistema de recolección de gas.

Para referencia del lector, el capítulo 7 presenta información de los únicos tres proyectos desarrollados en el país hasta 2012.



**Figura 2.4. Equipos principales de acondicionamiento del gas y de generación eléctrica.**



## Capítulo 3. Tecnologías de conversión térmica

Existen tres tecnologías principales para la conversión térmica de los RSU: caldera de incineración, reactor de pirólisis/gasificación, y reactor de gasificación con arco de plasma. La figura 3.1 muestra esta clasificación, representando en el diagrama los productos intermedios de cada una de ellas y la generación de electricidad o vapor como producto final. De acuerdo con la figura 3.2, la diferencia entre las tecnologías estriba en el aporte del aire de combustión para su proceso. Mientras que en la incineración se opera con altos excesos de aire para quemar el RSU, para los otros dos procesos se opera con un déficit de oxígeno, por lo que los RSU, en lugar de ser quemados son gasificados, obteniéndose un gas de síntesis. Este gas, compuesto principalmente por CO y  $H_2$ , puede utilizarse como combustible en una turbina de gas o un motor de combustión interna. En todos los procesos suelen involucrarse procesos muy eficientes de limpieza de gases para evitar emisiones contaminantes al medioambiente y proteger a los propios equipos de generación de procesos de corrosión/erosión.

Mientras que la incineración con recuperación de energía es un proceso que cuenta con un gran número de instalaciones a nivel mundial, los otros dos son de reciente desarrollo. A continuación se hará una descripción de ellos, destacando su situación actual dentro del panorama energético mundial.

### Incineración de RSU con recuperación de energía

El proceso de incineración de basura en plantas industriales con recuperación de energía data de hace más de 100 años, con una primera planta construida en Nueva York [51], y aunque en sus inicios fue catalogado como un proceso no bien visto por sus altas emisiones al medioambiente, hoy en día la tecnología, mayoritariamente desarrollada en Europa ha madurado, convirtiéndose en segura, efectiva y ambientalmente aceptada. El estricto control que se ejerce sobre los equipos de combustión y limpieza de gases distingue a estas instalaciones sobre las plantas convencionales que operan con combustibles fósiles, permitiendo que se opere en la zona conurbada de muchas ciudades importantes en el mundo [52] sin problemas. Hasta 2012 se contabilizaban más de 900 plantas de incineración con recuperación de energía entre los países desarrollados, procesando más de 180 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos por año [53]. Sólo en la primera dé-

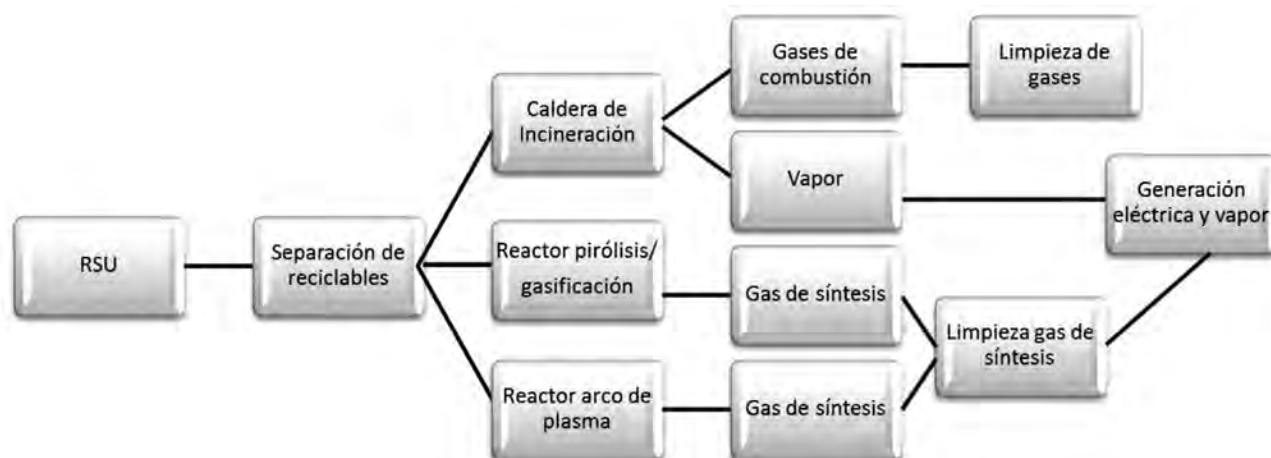
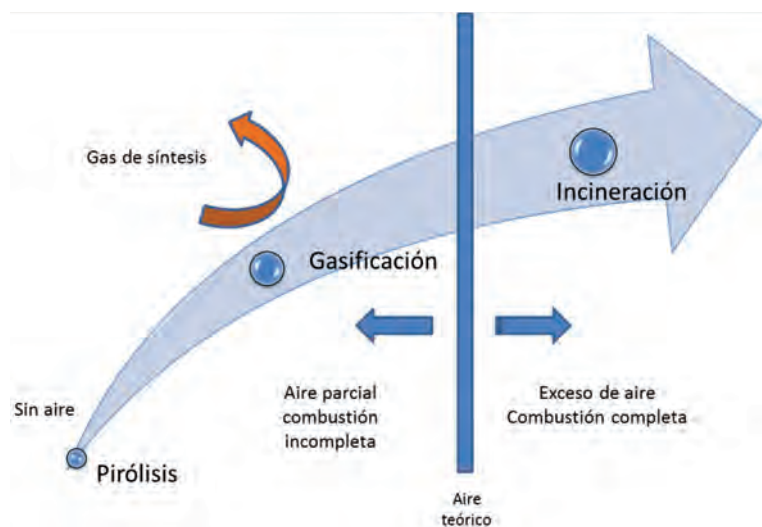


Figura 3.1. Opciones de conversión térmica de RSU. Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.



**Figura 3.2. Suministro de aire a los procesos.**

cada del siglo XXI se han construido 215 plantas, la mayor parte en Europa y Asia, con 49 plantas terminadas o en construcción en el periodo 2009-2011 [54].

La figura 3.3 muestra el diagrama de una planta moderna de incineración que recupera energía a través del aprovechamiento del calor de los gases de combustión. La planta se compone de una serie de equipos para transformar el potencial calórico de los RSU en energía eléctrica y reducir su volumen a menos del 10% en forma de cenizas. Básicamente, en este tipo de plantas existen dos variantes: la primera, mostrada en el diagrama y denominada en inglés como *mass burn*, en la que, fuera de la separación de piezas muy voluminosas de basura no combustible, se reciben los RSU tal como se descargan de los autotransportes de limpia, y la segunda, en la que los RSU se preprocesan para separar y clasificar algunos componentes con valor para reciclaje, y el remanente se tritura para su incineración. En este caso se le denomina a la técnica de quemado como RDF (*refuse-derived fuel*) y la variante en el proceso es que se tiene una caldera más compacta [55, 56].

La caldera de incineración *mass burn* es la tecnología más madura para la conversión de RSU y por lo tanto la más común, empleada dentro de las grandes plantas que recuperan energía en el mundo. Por ejemplo, en Estados Unidos se cuenta con 76 de 89 plantas de incineración con esta tecnología [57], siendo las restantes calderas para combustible pretratado RDF. Las capacidades con las que se fabrican van desde las 180 hasta las 675 ton/día [58] y en todas

ellas se aplica por diseño una parrilla móvil, reciprocante u oscilante de gran capacidad enfriada por agua, en donde los RSU son transportados y expuestos en tiempos no mayores a una hora, a temperaturas por arriba de los 850°C, hasta ser incinerados. Se emplean altos excesos de aire, del orden del 80% al 100%, alimentados mayoritariamente por debajo de la parrilla (hasta 75% del total del aire) y complementado por chorros de aire a gran velocidad, suministrados a través de toberas ubicadas en las paredes del horno. Con este flujo de aire, normalmente tomado de la zona de almacenamiento y fosa de carga, se asegura una combustión completa de los compuestos orgánicos, sin embargo, en todos los casos, los gases de combustión requieren tratarse para poder controlar los compuestos ácidos como el ácido clorhídrico (HCl), los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), el ácido fluorhídrico y las cenizas volantes. Para la captura de metales pesados como plomo, mercurio y otros se utilizan procesos adicionales como inyección de carbón activado, así como sistemas de inyección de urea o amoníaco para reducir los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Como en toda caldera convencional, las paredes del horno están recubiertas por tuberías por las que circula agua a alta presión, la cual es evaporada a través del intercambio de calor radiante de la combustión. A la salida del horno, los gases se hacen pasar por secciones adicionales de recuperación de energía (sobrecalentador, economizador). El vapor resultante, a condiciones de alta presión y temperatura, típicamente alimenta los turbogeneradores eléctricos que generan electricidad. Dado que la composición de la basura no es uniforme, las instalaciones modernas cuentan con sistemas de control de la combustión que permiten regular

las variables de combustión y entregar así un flujo de vapor estable al turbogenerador [56, 59, 60].

Antes de ser liberados a la atmósfera, los gases de combustión pasan a través de una serie de equipos que permiten eliminar los compuestos ácidos, óxidos de nitrógeno, partículas y retener cualquier otro compuesto potencialmente tóxico. Las dioxinas y furanos son normalmente eliminados ya sea en el horno, a través de buenas prácticas de combustión, consistentes en mantener flujos turbulentos para un mezclado intenso, altas temperaturas ( $850^{\circ}\text{C}$ - $1200^{\circ}\text{C}$ ) y al menos dos segundos de tiempo de residencia de los gases de combustión, o en los equipos adicionales para el control de HCl, SO<sub>x</sub>, HF y partículas, en donde las dioxinas y furanos aún presentes, en fase gaseosa, se condensan en partículas pequeñas y son atrapadas por filtros [61].

El lavador de gases tipo seco o semiseco (inyección de cal o cal hidratada), en conjunto con un sistema de filtros de mangas que captura todo tipo de partículas sólidas, ha demostrado ser un equipo efectivo para el control de las emisiones de los compuestos ácidos (HCL, HF), de azufre y de partículas sumamente pequeñas [59]. Los sistemas secos y semisecos se prefieren sobre los sistemas húmedos, ya que se evita la descarga de agua residual que tiene que

ser tratada, aunque hay que mencionar que estos últimos tienden a lograr mayores eficiencias de remoción. Este par de sistemas también trabaja con un sistema de inyección de carbón activado para capturar los metales pesados y en especial el mercurio. Dado que también están presentes, aunque en menor medida, óxidos de nitrógeno y éstos están estrictamente regulados a nivel mundial, todas las plantas presentan algún tipo de sistema de control para la emisión de NO<sub>x</sub>. Los sistemas del tipo catalítico selectivo (SCR) emplean reactivos como amoníaco o urea para producir las reacciones que reducen los NO<sub>x</sub> a nitrógeno y agua, con eficiencias de hasta el 90%, tal como se muestra en la figura 3.3. Este proceso se opera a temperaturas del orden de los  $250^{\circ}\text{C}$  y se emplean como catalizadores óxidos de titanio o vanadio. Con este sistema se obtienen valores típicos de NO<sub>x</sub> entre  $20\text{ mg/Nm}^3$  y  $70\text{ mg/Nm}^3$ . Existe otro proceso alternativo sin catalizador (SNCR), consistente en inyectar

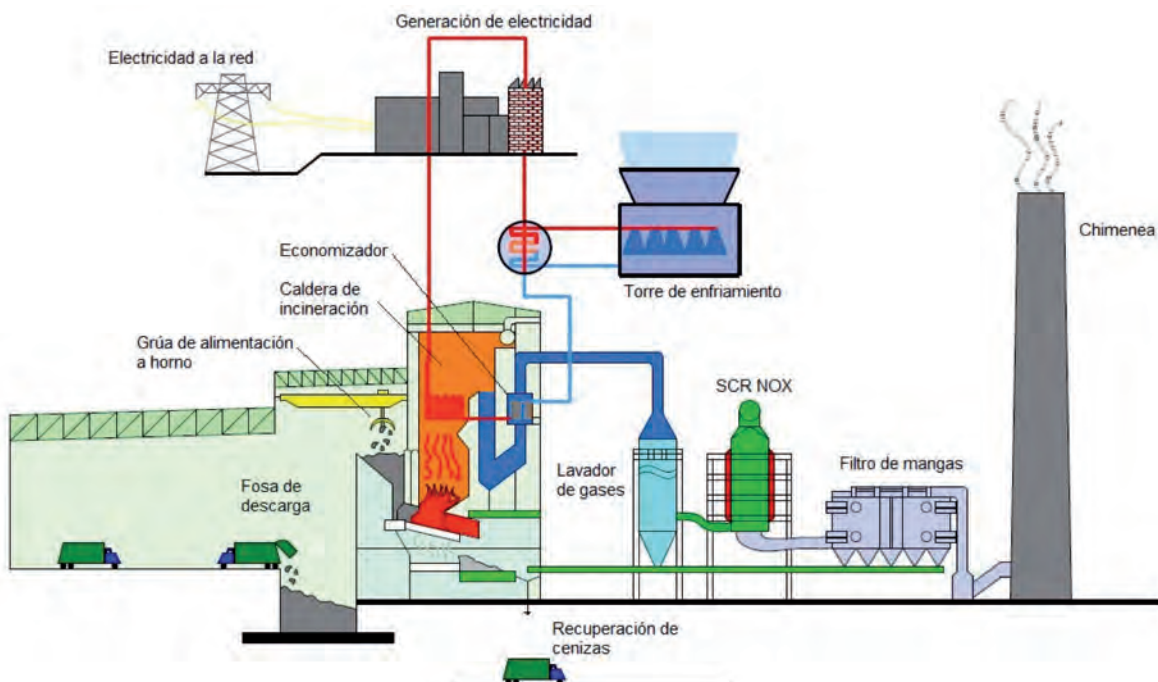


Figura 3.3. Diagrama de una planta de incineración con recuperación de energía.

directamente urea o amoníaco a la salida de los gases en el horno y aunque tiene una menor eficiencia (30%-75%), puede ser suficiente para reducir el nivel de  $\text{NO}_x$  a 150 mg/Nm<sup>3</sup>.

Cuando los RSU se incineran se producen cenizas volantes y cenizas de fondo. Las cenizas volantes son material particulado muy ligero que viaja con la corriente de gases y puede colectarse en diferentes etapas de la caldera o en el sistema de filtros de manga. Las cenizas de fondo se componen de cenizas pesadas que se quedan en la parte inferior del horno y que se extraen mediante un sistema continuo de recolección. La suma de ambos tipos de cenizas representan alrededor del 10% del volumen original de los RSU alimentados y pueden ser destinadas para confinamiento en un relleno sanitario o para su utilización en aplicaciones como material base de carreteras o de construcción. Asimismo pueden ser sujetas a procesos de recuperación de materiales como hierro y aluminio.

Mientras que el criterio de diseño para determinar la capacidad de una planta de conversión de RSU reside en la cantidad de residuos que procesará la planta, las calderas de incineración se diseñan no sólo en términos de las toneladas de residuo que estarán incinerando, sino en el poder calorífico del residual con que se alimentará. Es decir, que una planta diseñada para recibir un número "X" de ton/día puede que no sea del mismo tamaño para diferentes localidades, ya que si en uno de los casos el residual tiene un mayor poder calorífico, se requerirá de una caldera de mayor capacidad [56]. Por esto es sumamente importante contar con una buena caracterización del RSU disponible.

La eficiencia neta de una planta de incineración con generación de energía varía en el rango de 25%-28%, dependiendo del tipo de sistema de enfriamiento de la planta y del consumo energético del sistema de limpieza de gases. Esta cifra es considerablemente menor a las eficiencias de plantas de generación eléctrica utilizando combustibles fósiles, básicamente por el menor poder calorífico de los RSU, al hecho de que se genera vapor a menores condiciones de presión y temperatura, y a la existencia de equipos de limpieza de gases que requieren de energía eléctrica para su funcionamiento.

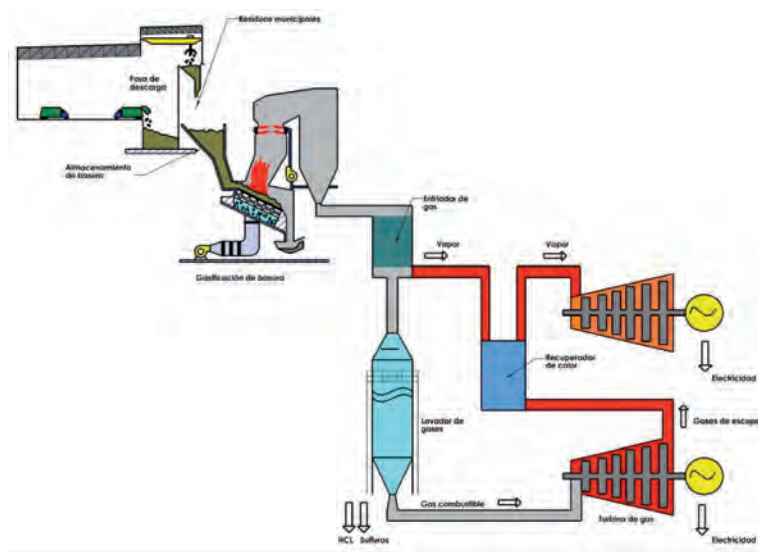
En términos de eficiencia en la generación eléctrica, las plantas de incineración más eficientes se encuentran en el norte de Europa, donde nuevas plantas como AEB Amsterdam recuperan 0.7 MWh de electricidad por tonelada de RSU incinerada. Este índice se en-

cuentra en promedio en 0.55 MWh/ton en Estados Unidos [54].

## **Tecnologías de gasificación y pirólisis**

La gasificación [59, 60, 62, 63] es el calentamiento de los RSU para producir un gas de síntesis, el cual consiste básicamente de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y algunos otros compuestos traza. La energía o poder calorífico del gas de síntesis varía entre 7.4 MJ/Nm<sup>3</sup> y 18.6 MJ/Nm<sup>3</sup> (este último representa aproximadamente la mitad que el gas natural). Una vez acondicionado, el gas de síntesis puede ser empleado como combustible auxiliar en calderas para la producción de calor y electricidad en turbinas, o bien puede transformarse en combustibles mediante síntesis química. En la pirólisis, los RSU son calentados en ausencia de oxígeno o aire, generándose gas de síntesis similar al del proceso de gasificación. En ambos procesos se tiene como objetivo reducir los volúmenes de gases de combustión y los costos de tratamiento asociados. Cabe señalar que dependiendo del diseño del reactor, el RSU requiere ser pretratado. Algunas de estas técnicas se han encontrado con problemas técnicos [64] y económicos al ser adaptadas a mayor escala para uso comercial industrial y han dejado de desarrollarse. Algunas se utilizan a escala comercial (p. ej. en Japón) y otras están siendo ensayadas en plantas de demostración en Europa, pero en conjunto todavía representan sólo una pequeña porción de la capacidad de tratamiento total, en comparación con la incineración.

La figura 3.4 muestra el esquema de una planta de gasificación que produce energía eléctrica a partir de la combustión del gas



**Figura 3.4. Esquema de una planta de gasificación.**

de síntesis y del vapor generado, como producto del intercambio de calor entre los gases de combustión y el agua. Tanto la pirólisis como la gasificación difieren de la incineración, en que pueden usarse para la recuperación del valor químico del gas de síntesis (en lugar del valor energético). Los productos químicos derivados pueden usarse en algunos casos como materia prima para otros procesos. No obstante, aplicados a plantas de conversión de RSU, lo más común es combinar pirólisis, gasificación y un proceso a base de combustión, con frecuencia en la misma instalación y como parte de un proceso integrado. En tal caso, la instalación recupera el valor energético en lugar del valor químico del gas de síntesis. Como residuales del reactor se obtienen metales en trozos, escoria vitrificada (con baja lixiviación y estable) y concentrados metálicos derivados de la ceniza secundaria. En el esquema presentado, la caldera es muy similar a la de incineración, con la diferencia de que se emplea una concentración muy baja de  $O_2$ .

### Tecnología de gasificación con arco de plasma

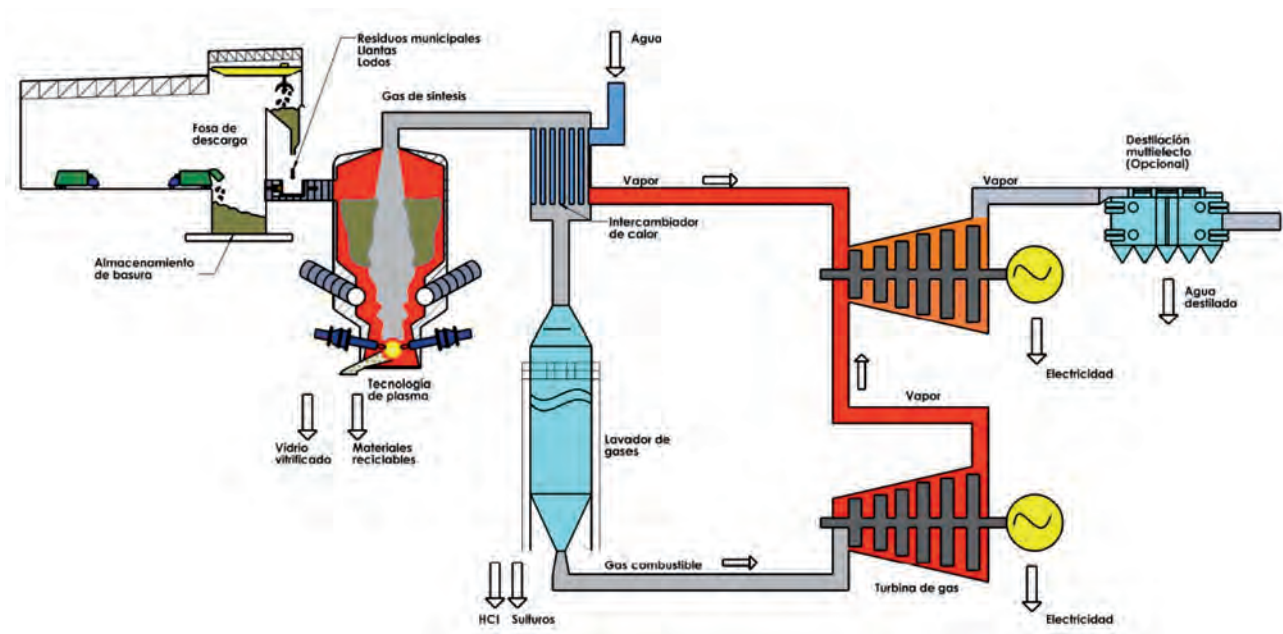
Esta es una tecnología de muy reciente desarrollo y basa su principio de operación en generar un plasma de alta temperatura ( $4000^{\circ}C$ - $7000^{\circ}C$ ) para inducir un proceso de pirólisis en los RSU. Tal como sucede en los procesos de pirólisis y gasificación descritos se genera un gas de síntesis y como residuo una roca de escoria vitrificada de características estables y con facilidad para la obtención de subproductos como metales [63].

La figura 3.5 muestra el esquema simplificado de esta tecnología. El plasma se genera en el reactor a partir de las llamadas antorchas de plasma, que consisten en electrodos en los que se induce un arco eléctrico y por el que se hace pasar una corriente de gas inerte, el cual eleva su temperatura y se ioniza convirtiéndose en plasma. Al contacto de éste con los RSU, la materia se descompone en sus constituyentes atómicos, para después reaccionar entre sí y formar el gas de síntesis (predominantemente  $CO$  e  $H_2$ ). Cabe mencionar que esta tecnología no ha tenido los resultados esperados y varios proyectos en Estados Unidos han tenido serios contratiempos [65, 66], sin embargo, la tecnología presenta un vasto potencial a futuro y países como Gran Bretaña están en vías de desarrollar plantas para producción de bioetanol y energía eléctrica [67]. Una de sus principales desventajas reside en la alta energía consumida por las antorchas de plasma, que se toma del mismo proceso, reduciendo así la electricidad neta que puede irse a la red eléctrica [64].

### Digestión anaeróbica para RSU

Aunque no es un proceso de conversión térmica, es un proceso alterno de interés para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los RSU en el que se produce biogás como producto de la descomposición bacteriana del material orgánico de los RSU, y para la cual es indispensable la separación de agentes tóxicos inhibidores como desinfectantes, insecticidas y medicamentos, aparte de metales y vidrio. Se utiliza un biodigestor o reactor, el cual básicamente es un recipiente hermético totalmente sellado, al cual se le deposita el material orgánico diluido con agua y, en ausencia de aire, se fermenta con la ayuda de microorganismos





**Figura 3.5. Esquema de gasificación con arco de plasma.**

produciendo biogás. Éste se colecta y se lleva a instalaciones similares a las mostradas en el capítulo 2. El proceso puede realizarse en *batch* o en continuo a través de multietapas, siendo este último el más eficiente. El tiempo promedio en el que se lleva a cabo es de ocho semanas y se requiere del aporte de energía para propósitos de calentamiento, bombeo y agitación. El residuo final se compone de lodos que pueden emplearse como mejoradores de suelos [68].

### Emisiones al medioambiente

El estricto control de las emisiones de gases contaminantes al medioambiente es uno de los principales objetivos en todas las tecnologías de conversión de residuales a electricidad, razón por la cual se pone especial atención en el diseño y operación del equipamiento dedicado al cumplimiento de las normas de emisión de contaminantes. Se estima que hasta un 35% del costo de capital de una planta de incineración es dedicado a las instalaciones de limpieza de gases.

La tabla 3.1 muestra en las columnas 2-4, la evolución en la reducción de emisiones contaminantes en 227 unidades ubicadas en 88 plantas de generación con tecnología de incineración en Estados Unidos [69]. De particular relevancia están las emisiones de dioxinas/furanos y mercurio de más del 99% y 96% respectivamente. Por otro lado, en las columnas 5-7 se muestran las emisiones promedio de 95 plan-

tas WTE en Estados Unidos y se compara contra los límites establecidos por EPA [62]. Por último, la columna ocho muestra el valor límite de emisiones reglamentado para equipos de incineración en México [70], con la aclaración de que estos equipos posiblemente deberán cumplir con la norma NOM-085 [21] de emisiones de fuentes fijas.

Como se puede apreciar, las emisiones promedio son sumamente pequeñas. De acuerdo con estudios realizados por la *Health Protection Agency* del Reino Unido [71] se ha demostrado que el impacto potencial a la salud de los habitantes que viven en las inmediaciones de una planta de incineración tiende a ser tan pequeño, que es difícil de cuantificar.

Con relación a otras tecnologías, la tabla 3.2 muestra un comparativo de emisiones de la tecnología de incineración *mass burn* con diferentes tecnologías de generación con combustibles fósiles, también con sistemas de control de emisiones [72].

**Tabla 3.1.** Evolución en la reducción de emisiones de plantas de incineración en el periodo 1990–2005 en Estados Unidos y emisión promedio por planta.

Fuentes: Memorandum informative: *Emissions from Large and Small MWC Units at MACT Compliance*. Aug 10, 2007. Office of Air Quality Planning and Standards. EPA [69]. *Meeting the Future: Evaluating the Potential of Waste Processing Technologies to Contribute to the Solid Waste Authority's System (A White Paper)*. Gershman, Brickner & Bratton, Inc. September 2, 2009 [62]

| Contaminante      | Emisiones 1990 (ton/año) | Emisiones 2005 (ton/año) | Porcentaje de reducción | Emisión promedio | Límite EPA | Emisión promedio como % EPA | Límite equipos incineración MÉXICO NOM-098 SEMARNAT [70] | Unidades           |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|
| Dioxinas/furanos* | 4400                     | 15                       | 99+%                    | 0.05             | 0.26       | 19.2                        | 0.2                                                      | ng/Nm <sup>3</sup> |
| Mercurio          | 57                       | 2.3                      | 96%                     | 0.01             | 0.08       | 12.5%                       | 0.07                                                     | mg/Nm <sup>3</sup> |
| Cadmio            | 9.6                      | 0.4                      | 96%                     | 0.001            | 0.020      | 5%                          | 0.07                                                     | mg/Nm <sup>3</sup> |
| Plomo             | 170                      | 5.5                      | 97%                     | 0.02             | 0.20       | 10%                         | 0.7**                                                    | mg/Nm <sup>3</sup> |
| Partículas        | 18,600                   | 780                      | 96%                     | 4                | 24         | 16.7%                       | 50                                                       | mg/Nm <sup>3</sup> |
| HCl               | 57,400                   | 3,200                    | 94%                     | 10               | 25         | 40%                         | 15                                                       | ppmv               |
| SO <sub>2</sub>   | 38,300                   | 4,600                    | 88%                     | 6                | 30         | 20%                         | 28.4                                                     | ppmv               |
| NO <sub>x</sub>   | 64,900                   | 49,500                   | 24%                     | 170              | 180        | 94.4                        | 148                                                      | ppmv               |

\* Las unidades de dioxinas/furanos están en gr/año de TEQ (*toxic equivalent quantity*). Otros elementos están en ton/año.

\*\* Suma de todos los metales pesados.

**Tabla 3.2.** Comparativo de emisiones entre tecnologías.

Fuente: *Comparison of Air Emissions from Waste-to-Energy Facilities to Fossil Fuel Power Plants*. SWANA, 2006 [72].

| Tipo de tecnología                 | Dióxido de carbono | kg/MW-hr Dióxido de azufre | Óxidos de nitrógeno |
|------------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|
| Carbón                             | 1021               | 5.9                        | 2.72                |
| Combustóleo                        | 759                | 5.4                        | 1.81                |
| Gas natural                        | 515                | 0.04                       | 0.77                |
| Conversión de RSU con incineración | 379                | 0.36                       | 2.45                |

cual es un potente gas con efecto invernadero. Los rellenos sanitarios modernos colectan este gas y puede ser que lo quemen o aprovechen en instalaciones de generación eléctrica. Cabe destacar que una proporción del metano del relleno escapa a la atmósfera sin control. El envío de los RSU a plantas de conversión evita la generación no controlada de metano a la atmósfera.

A continuación se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de las tecnologías de conversión térmica.

### Ventajas

- Son más amigables para el ambiente que las plantas convencionales que queman combustibles fósiles, ya que producen electricidad que de otra manera se hubiera tenido que generar quemando dichos combustibles.
- Se aprovechan como combustible los RSU que de otra manera se hubieran ido a un relleno sanitario, donde se genera metano, el cual es un potente gas con efecto invernadero.
- Las plantas de conversión térmica preservan los valiosos espacios existentes en los rellenos sanitarios, minimizando la cantidad de material que tiene que ser llevado al relleno para el requerimiento diario de cubierta.
- Permite la recuperación y reciclamiento de metales.
- La tecnología actual para el control de emisiones permite un estricto control en

las emisiones de HCl, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, partículas, metales pesados y otros elementos tóxicos como dioxinas y furanos.

- Se reduce el volumen de residuos sólidos en un 90%, quedando cenizas que reducen la necesidad de espacio en rellenos sanitarios y que incluso pueden utilizarse como material agregado en la construcción de caminos.
- En términos de producción eléctrica, las plantas de conversión térmica producen de 5 a 8 veces más electricidad que los rellenos sanitarios con infraestructura de generación eléctrica.

### Desventajas

- Las plantas modernas de incineración equipadas con el estado del arte en tecnología de control de emisiones tienden a estar dentro de las opciones más costosas de gestión de RSU, y requieren de personal altamente capacitado para operarlas y mantenerlas [73]. Los altos costos de capital de aproximadamente 200,000 dólares a 275,000 dólares por tonelada procesada de RSU, para la tecnología *mass burn*, han puesto a esta opción fuera del alcance de muchos países en desarrollo, sobre todo si se compara con opciones como el relleno sanitario.

- Aun en países industrializados la población, por desconocimiento, todavía tiene una mala percepción sobre la instalación y operación de este tipo de plantas, por lo que en todos los casos se requiere hacer una ardua labor de convencimiento a nivel social. Se ha observado que esta labor no siempre produce resultados positivos, por lo que el involucrar a la población desde el inicio del proyecto es de alta prioridad.

### Integración de plantas de incineración con otros procesos

Siendo el vapor el producto de una caldera de incineración, existe la posibilidad de integrarlo dentro de esquemas de generación de alta eficiencia, como podría ser el de un ciclo combinado de turbina de gas, recuperador de calor y turbina de vapor. Incorporar flujos de vapor de media presión proveniente de la caldera de incineración directamente a la turbina, no representaría mayor problema para un esquema de ciclo combinado, aunque de acuerdo con estudios realizados por el IIE [74], el resultado de una integración de este tipo representa un efecto de reducción en la eficiencia neta de la planta y tendría que evaluarse el impacto en el costo nivelado de generación, así como la rentabilidad de dicha integración.

### Criterios clave para adoptar una tecnología de incineración

En la tabla 3.3, el Banco Mundial [73] sugiere revisar los siguientes criterios para adoptar una tecnología de incineración.

**Tabla 3.3.** Criterios para adoptar una tecnología de incineración con recuperación de energía. Fuente: Banco Mundial [73].

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Combustible        | El promedio anual del poder calorífico inferior debe ser al menos 7 MJ/kg y no debe ser inferior a 6 MJ/kg en ninguna estación del año.                                                                                                                                                                                                                                   | √√√ |
|                    | La cantidad total de RSU a incinerar debe ser superior a 50,000 toneladas, con variaciones semanales en el suministro no mayores al 20%.                                                                                                                                                                                                                                  | √√√ |
|                    | Las predicciones de cantidad de RSU y su composición deberán establecerse con base en muestreos del área que proveerá de RSU a la planta. La tarea deberá llevarse a cabo por una institución independiente con experiencia.                                                                                                                                              | √√  |
|                    | Suposiciones acerca del suministro de residuales industriales y comerciales a la planta deberán ser establecidos con base en un estudio de incentivos tanto positivos como negativos. para las entidades interesadas.                                                                                                                                                     | √√  |
| Tecnología         | La tecnología de la caldera debe incluir parrillas móviles. Además, el proveedor debe tener numerosas plantas de referencia con buen récord de funcionamiento.                                                                                                                                                                                                            | √√√ |
|                    | El horno de la caldera debe ser diseñado para operación continua y estable, quemando completamente los RSU (emisiones de CO < 50 mg/Nm <sup>3</sup> y TOC ( <i>total organic compounds</i> ) < 10mg/Nm <sup>3</sup> ).                                                                                                                                                    | √√√ |
|                    | Se deben enfriar los gases a 200°C o menos para hacerlos pasar por un sistema de limpieza de gases.                                                                                                                                                                                                                                                                       | √√√ |
|                    | El control de emisión de partículas debe incluir al menos precipitadores electrostáticos (partículas < 30 mg/Nm <sup>3</sup> ).                                                                                                                                                                                                                                           | √√√ |
|                    | Debe existir un relleno sanitario con control de lixiviados para el confinamiento de cenizas de la planta.                                                                                                                                                                                                                                                                | √√√ |
|                    | La planta de incineración debe ubicarse en zonas industriales (media y pesada).                                                                                                                                                                                                                                                                                           | √√  |
|                    | La chimenea debe tener una altura de al menos el doble que el edificio más alto de la zona o al menos 70 m de alto.                                                                                                                                                                                                                                                       | √√  |
| Ciclo del proyecto | La planta debe estar alejada por lo menos 300 m a 500 m de zonas residenciales                                                                                                                                                                                                                                                                                            | √   |
|                    | Un consultor con experiencia en el desarrollo de proyectos debe contratarse en la fase previa de planeación.                                                                                                                                                                                                                                                              | √√√ |
| Economía           | Para evitar conflictos, la población debe ser informada durante todas las fases del proyecto, especialmente en la fase de planeación.                                                                                                                                                                                                                                     | √√√ |
|                    | Deben existir condiciones de planeación estables en el precio de consumibles, refacciones, confinamiento de residuos y venta de energía. Además los costos de capital (moneda extranjera) deben ser predecibles.                                                                                                                                                          | √√√ |
|                    | La financiación del costo neto del tratamiento debe asegurar el flujo de RSU como parte del sistema integral de gestión de residuales. Consecuentemente la tarifa de confinamiento ( <i>tipping fee</i> ) en la planta de incineración debe ser igual o menor a la correspondiente del relleno sanitario. Buena voluntad y capacidad de pago deben ser abordadas a fondo. | √√√ |
|                    | Moneda extranjera debe estar disponible para comprar refacciones críticas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                | √√√ |
|                    | Acuerdos irrevocables deben ser tomados para la venta de energía (tipo y cantidad) antes de cualquier decisión en torno al diseño de la sección de recuperación de energía de la planta.                                                                                                                                                                                  | √√  |
|                    | Cuando energía térmica sobrante vaya a ser usada para propósitos de calentamiento distrital, la planta deberá estar situada cerca de la red de distribución para evitar nuevos sistemas de conducción.                                                                                                                                                                    | √√  |
|                    | Para ser económicamente factibles, los trenes individuales de incineración deberán tener una capacidad de al menos 240 ton/día (10 ton/h) y deberán ser al menos dos unidades separadas.                                                                                                                                                                                  | √   |
|                    | Si existe un mercado para la venta de agua caliente (calentamiento distrital o similar) o venta de vapor de baja presión, la planta debe basarse en la venta de calor solamente, ya que es preferible en términos de complejidad técnica y económica.                                                                                                                     | √   |

√√√

Criterio obligatorio.

√√

Criterio fuertemente recomendado.

√

Criterio recomendable.

## Proveedores de plantas de incineración

Los mercados asiáticos y europeos son los que más han crecido en la última década y aunque en Estados Unidos y Canadá no se construyó ninguna planta en este mismo periodo de tiempo, actualmente están en construcción los proyectos West Palm Beach en Florida (3000 ton/día) y Durham York (140,000 t/año) en Ontario [75, 76].

Dentro de las principales compañías internacionales que actualmente poseen plantas y están en el mercado de proveeduría, construcción y operación de plantas de incineración con generación eléctricas se tienen las siguientes (por orden alfabético):

**Tabla 3.4.** Principales empresas internacionales dedicadas a incineración con recuperación de energía. Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

| Compañía                              | Tipo de empresa                                                                                                                                            | Portafolio                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Babcock &amp; Wilcox</i>           | Contratista general, constructor, proveedor de equipo, O&M, servicios ingeniería, investigación y desarrollo.                                              | 55 plantas en el periodo 1997-2013. Proveedor de calderas de incineración con tecnología propietaria <i>mass burn</i> y <i>RDF</i> en 62 plantas <i>waste to energy</i> en Estados Unidos. Desarrolla el proyecto West Palm Beach, Fl., con 3 calderas de 1000 ton/día. |
| <i>Covanta Energy Corporation</i>     | Dueño de plantas <i>waste to energy</i> , contratista general, constructor, proveedor de equipo. O&M, servicios de ingeniería, investigación y desarrollo. | 45 plantas en América del Norte. Dueño de 14 plantas en Estados Unidos y opera 31. Tiene seis proyectos en desarrollo en Europa. Representa a Martin Gmbh en Estados Unidos.                                                                                            |
| <i>Fisia Babcock</i>                  | Ingeniería, construcción, proveedor de equipo.                                                                                                             | Presencia en 460 unidades en 21 países.                                                                                                                                                                                                                                 |
| <i>Hitachi Zosen Inova</i>            | Contratista general, proveedor de equipo, O&M, servicios de ingeniería, investigación y desarrollo.                                                        | Principalmente en el mercado asiático. 190 plantas en Asia.                                                                                                                                                                                                             |
| <i>Martin Gmbh</i>                    | Contratista general, proveedor de equipo, O&M, servicios de ingeniería, investigación y desarrollo.                                                        | Se especializa en la tecnología de parrilla móvil para calderas de incineración y equipo de control de emisiones. 720 unidades equipadas con sus equipos.                                                                                                               |
| <i>Novo Energy, LLC</i>               | Proveedor de equipo y servicios.                                                                                                                           | Proveedor de equipo en ocho plantas <i>waste to energy</i> .                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Keppel Seghers</i>                 | Contratista general, constructor, proveedor de equipo, O&M, servicios de ingeniería, investigación y desarrollo.                                           | 100 plantas construidas en el mundo.                                                                                                                                                                                                                                    |
| <i>Veolia Environmental Services</i>  | Dueño. Ingeniería, proveedor de servicios                                                                                                                  | Dueño de dos plantas en Estados Unidos y opera 10 plantas.                                                                                                                                                                                                              |
| <i>Wheelabrator Technologies Inc.</i> | Dueño de plantas <i>waste to energy</i> , contratista general, proveedor de equipo. O&M, servicios de ingeniería, investigación y desarrollo.              | 17 plantas <i>waste to energy</i> en Estados Unidos, tres en China y cinco adicionales en construcción, tres en Europa y una en construcción. Utiliza diseños de parrillas de Von Roll de Suiza.                                                                        |



## Capítulo 4. Gestión del proyecto

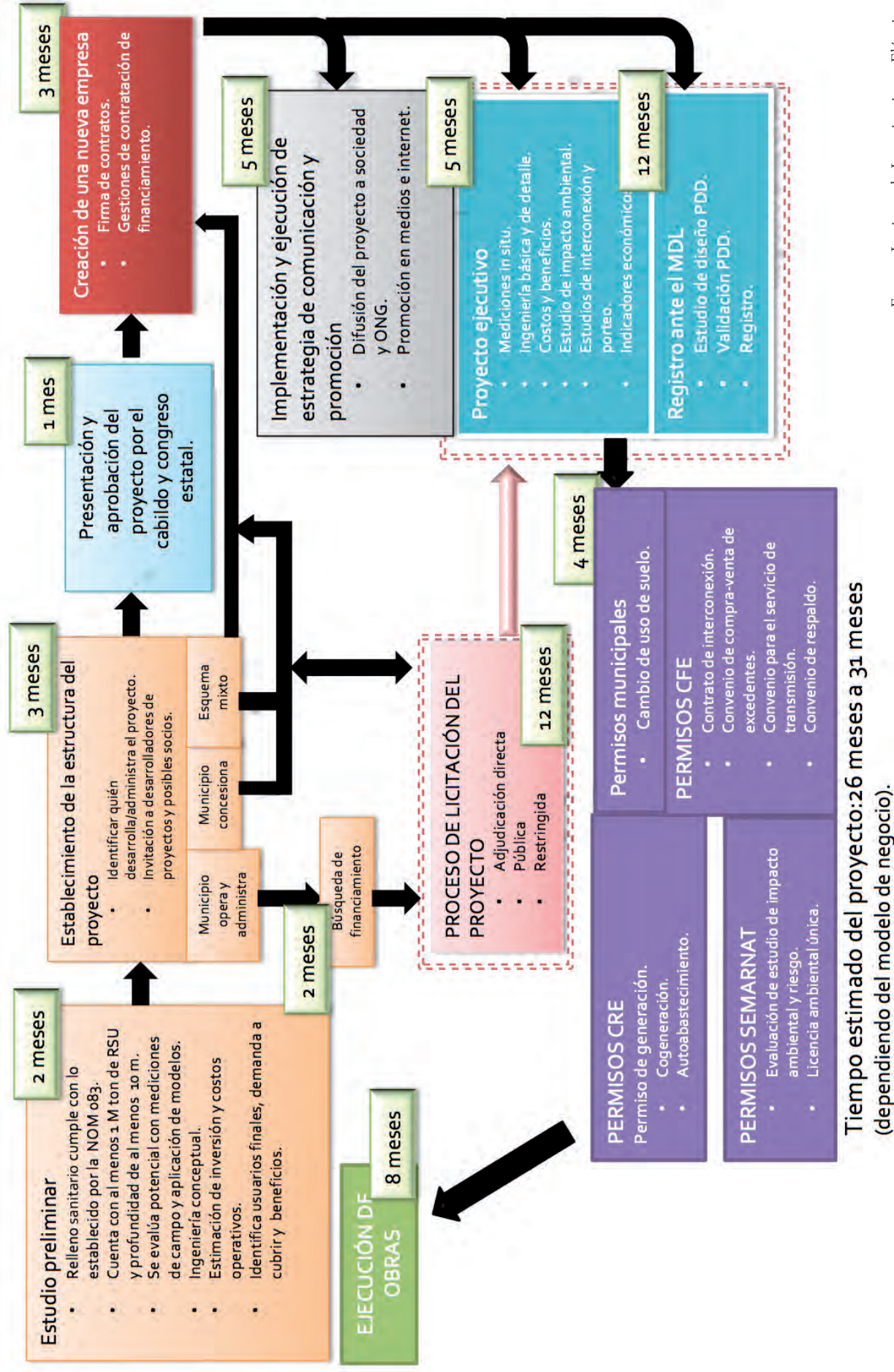
La gestión para el desarrollo exitoso de proyectos de generación eléctrica mediante RSU requiere de una cuidadosa planeación y ejecución de actividades. Ya sea que el proyecto aproveche el biogás de un relleno sanitario existente, o se desarrolle un proyecto de conversión térmica de residuales, en ambos casos se requerirá de estudios de prefactibilidad que demuestren beneficios potenciales al municipio al implementar el proyecto, no sólo en términos económicos sino también ambientales y sociales.

De acuerdo con la Ley y el Reglamento del Servicio Público de Energía Eléctrica [77, 78], el desarrollo de proyectos privados de generación de electricidad para autoabastecimiento está permitido, por lo que los municipios pueden tener una alternativa económica a las tarifas que les provee la Comisión Federal de Electricidad. El uso de energía eléctrica en servicios municipales (alumbrado público, bombeo de agua y edificios públicos) se ha convertido en una carga económica muy importante para dichas entidades, debido al régimen tarifario al que están sujetas, representando un alto porcentaje de sus gastos de operación, por lo que un proyecto de este tipo puede ser muy atractivo en términos económicos. Otros beneficios se mencionan a continuación.

### Beneficios para el municipio al desarrollar proyectos de RSU con recuperación de energía:

- Al generar su propia energía eléctrica, el gobierno local puede disminuir sus costos por pago de la misma.
- Se desencadena una derrama económica local (fase de construcción, empleos temporales y fijos) por el desarrollo del proyecto. Se pueden generar ingresos fiscales adicionales para el gobierno local.
- Se aprovecha un combustible valioso que puede llegar a ser una importante fuente de energía.
- Se reduce el riesgo de incendios en rellenos sanitarios, los cuales tienen altos costos económicos, ambientales y hasta políticos.
- En proyectos de plantas de incineración se evita el confinamiento de RSU en rellenos sanitarios, conservando terrenos valiosos del municipio.
- Mejora en la calidad de aire local y disminución de riesgos a la salud, ya que otros compuestos orgánicos diferentes al metano son destruidos al quemarse. Asimismo se reducen los malos olores del relleno producidos por la presencia de sulfatos.
- Se puede capturar del 60% al 90% del metano generado por el relleno sanitario, lo que implica una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Indirectamente reduce emisiones de gases de efecto invernadero, al desplazar generación eléctrica con fuentes de energía no renovables (carbón, combustóleo, gas natural).
- Avances en metas de desarrollo sustentable.

Ya sean proyectos de plantas de conversión térmica o rellenos sanitarios, la secuencia de pasos en la gestión y ejecución de proyectos para la recuperación de energía es muy similar, aunque los tiempos de construcción son bastante más largos en el caso de plantas de incineración, ya que una vez fincado el pedido, se contempla un tiempo de tres años para tener el inicio de operación comercial, a diferencia de los ocho meses para la opción de generación en rellenos sanitarios. La secuencia de pasos que abarca el desarrollo de un proyecto desde principio a fin se ejemplifica en las figuras 4.1 y 4.2.



Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas

Figura 4.1. Implementación de un proyecto de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario para generación eléctrica.



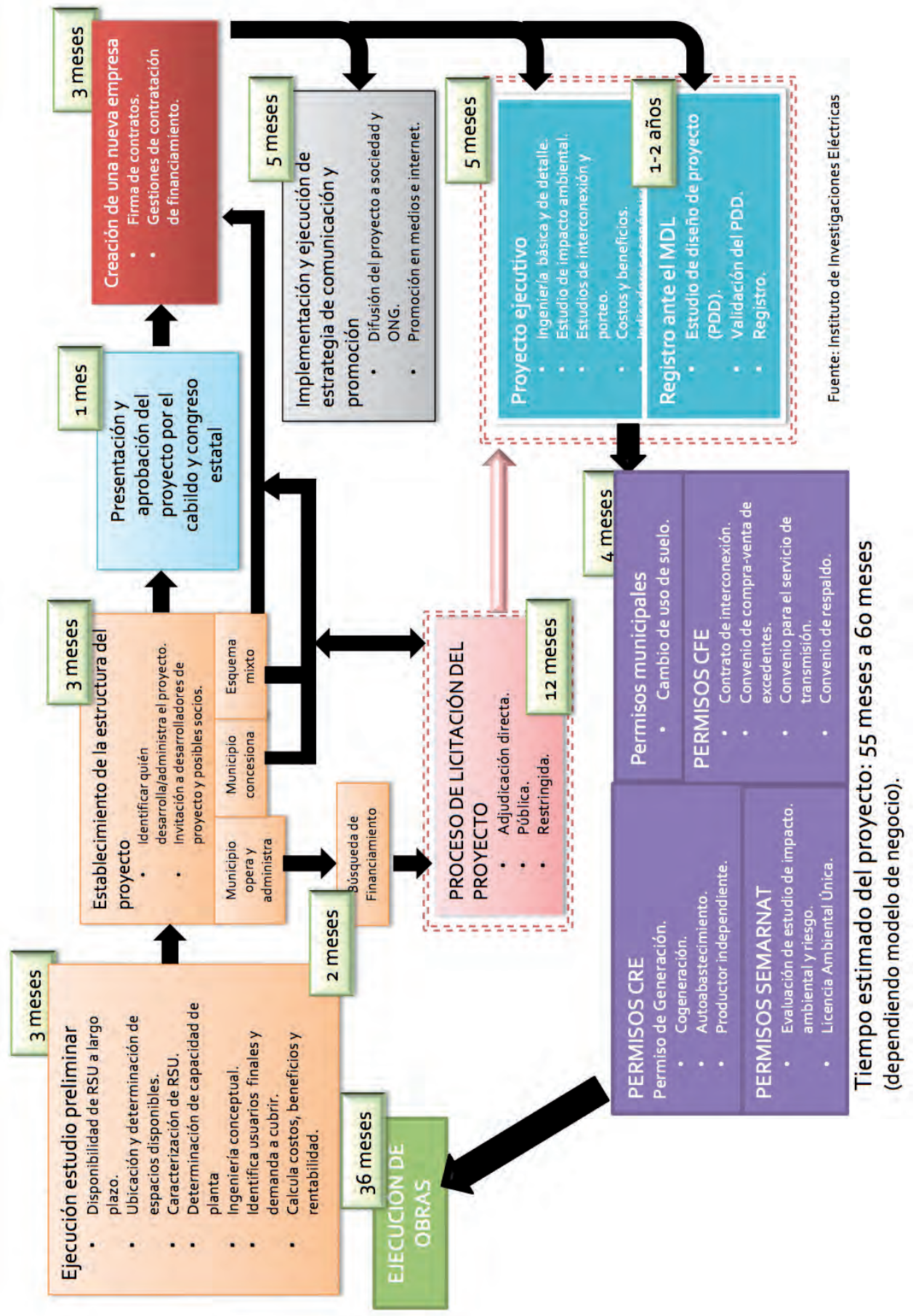


Figura 4.2. Implementación de un proyecto de incineración de RSU para generación eléctrica.

## Estudio preliminar

Para desarrollar rellenos sanitarios, un primer paso consiste en la evaluación del recurso existente mediante la estimación de las toneladas confinadas en el relleno sanitario, la medición en campo de biogás y la aplicación de modelos para estimar las curvas de generación de biogás en el periodo de vida del proyecto. Es fundamental que el relleno cumpla con todo lo especificado por la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 y se sugiere que cuente con al menos un millón de toneladas, una profundidad de al menos 15 m y una precipitación anual de 635 mm, cantidades consideradas por la EPA [79] como ideales para generar el biogás que soporte el desarrollo de proyectos de generación eléctrica.

Por otro lado, para el desarrollo de proyectos de conversión térmica se torna indispensable conocer los flujos de RSU disponibles en la zona que pudieran alimentar a una planta de incineración en un plazo de al menos 20 años. Asimismo se deberá contar con una evaluación del poder calorífico de los RSU mediante toma de muestras, ya que esto permitirá dimensionar la capacidad de la caldera y la planta, la potencia eléctrica de diseño y por lo tanto los costos de inversión del proyecto.

Además, para ambos tipos de proyectos es necesario conocer el tipo de usuario y tensión a la que se consumirá la electricidad, su demanda eléctrica y las tarifas a las que son sujetos, con el fin de estimar sus posibles beneficios y obtener los índices de rentabilidad de los mismos.

Los estudios iniciales pueden ser desarrollados por firmas consultoras del ramo, institutos de investigación y universidades, a un costo que puede variar entre \$500 mil a \$2 millones de pesos, en función de la complejidad del proyecto y las pruebas de campo, así como de los muestreos a realizar. Normalmente estos estudios corren por cuenta del propio municipio o estado con recursos propios, aunque también pueden ser financiados por empresas privadas interesadas. En la sección de fuentes de financiamiento de la presente guía se presentan algunas opciones de fondos que pudieran cubrir estudios preliminares necesarios para consolidar proyectos.

## Estructuración del proyecto

El poder definir un modelo de negocio exitoso del proyecto se convierte en uno de los puntos clave en la secuencia de actividades. De

acuerdo con el tipo de proyecto y la situación particular de cada municipio, se deberá identificar si éste puede desarrollarse y administrarse internamente, si se busca una sociedad con algún desarrollador de proyectos o un socio privado, o si se concesiona buscando que el municipio no aporte recursos económicos propios. Resulta muy útil realizar invitaciones a desarrolladores de proyectos con experiencia nacional e internacional en la ejecución de proyectos de este tipo, así como a fabricantes de equipo. También resulta indispensable invitar a los posibles socios que consumirán la electricidad y que se verán beneficiados al tener un menor costo de este servicio.

Dependiendo de la decisión, la gestión del proyecto requerirá de variantes, ya que se tendrán que seguir procedimientos definidos en el marco jurídico aplicable a la licitación de obras y servicios públicos, ya sea mediante una licitación pública o restringida, o una asignación directa. La tabla 4.1 muestra las características de cada modalidad de licitación:

En el caso de requerir emitir una licitación pública o restringida, la práctica normal indica que el licitante deberá incluir en su oferta la realización de todos los estudios técnicos que permitan el cumplimiento de requerimientos impuestos por la CRE, la SEMARNAT, la CFE y el propio municipio y estado, así como la elaboración del documento de diseño de proyecto (Project Design Document-PDD) para su registro en el **Mecanismo de Desarrollo Limpio**. Se requiere un tiempo estimado de un año para llevar a cabo un proceso de licitación pública internacional. En el caso de una adjudicación directa, de todos modos se deberán realizar los mismos estudios, con la salvedad de que podrá haber un ahorro en tiempo del orden de seis meses.

**Tabla 4.1.** Características de las modalidades de licitación.**Licitación pública**

Es abierta y permite a todo interesado participar en la misma, siempre y cuando cumpla con los requisitos señalados en la convocatoria respectiva. Ésta se adjudicará al licitante que haya presentado la mejor oferta técnico-económica.

**Licitación restringida**

La participación está subordinada a la participación que realice el licitador, que cuenta con un amplio poder discrecional para elaborar la lista de aquéllos (al menos tres licitantes) a quienes considere proponentes aptos para convocarlos.

**Adjudicación directa**

La participación se limitará a aquel oferente que posea cierta capacidad mínima o especializada de producción y, en este caso, no se realiza invitación abierta, sino la invitación a un solo proponente.

## Aprobación por el cabildo y congreso estatal

La presentación del proyecto para aprobación del cabildo y congreso estatal es necesaria para dar certidumbre a todos los participantes, y asegurar la continuidad del mismo más allá del término del periodo de administración en turno. La presentación deberá incluir la descripción del proyecto; currícula de entidades involucradas; plazos de ejecución; costos de inversión, operación y mantenimiento; análisis financiero con indicadores de rentabilidad económica; beneficios económicos, ambientales y sociales, y una estructuración del modelo de negocio con las posibles fuentes de financiamiento. Es muy recomendable invitar a la presentación a delegados federales o representantes de SEMARNAT, la CFE y la CRE. La participación del gobierno del estado es importante, ya que éste mantiene los vínculos con el gobierno federal y tiene influencia en las comunidades.

## Creación de una nueva empresa

Ya sea que el municipio decida desarrollar el proyecto de manera autónoma, decida formar una sociedad, o se concesione el servicio de explotación, se deberá constituir legalmente una nueva empresa para operar y administrar el proyecto. Para esto se deberá constituir una sociedad de autoabastecimiento o cogeneración (sociedad de propósito específico) según el caso, considerando tener cuando menos dos socios que consuman energía eléctrica. Siendo los montos de inversión bastante considerables y ante la situación predominan-

te de escasez de recursos económicos y humanos en la mayoría de los municipios del país, es común que se siga algún esquema en el que el municipio concesione o se asocie con empresas privadas para el desarrollo y explotación del proyecto. En las negociaciones entre las partes, puede haber una diversidad de beneficios para el municipio, derivados de la concesión o asociación en los derechos de explotación, por ejemplo, entrega de regalías por parte del productor, participación en utilidades, o entrega de electricidad a menores costos.

El definir la fuente de financiamiento del proyecto (ver sección más adelante) se vuelve una parte fundamental, ya que permitirá contratar los trabajos técnicos que definirán los detalles del proyecto, cubrir costos asociados con las gestiones, y desde luego los costos de ingeniería, materiales, equipos y construcción de la obra.

## Implementación y ejecución de una estrategia de comunicación y promoción

La comunidad en donde se ubicará la nueva instalación juega un papel muy importante, ya que ellos, aunque se vean o no beneficiados por la electricidad producida y la creación de empleos, pueden volver inviable el proyecto si se oponen. Una estrategia de comunicación y difusión del proyecto estará orientada a establecer los mecanismos para una consulta pública y divulgar dentro de la comunidad, los beneficios que el proyecto les otorgará y los impactos que se tendrán.

En México, los temas de transporte y manejo de basura, su incineración, o generación de biogás son altamente sensibles, por lo que este proceso debe ser considerado como



de alta prioridad. Deberán implementarse campañas de difusión a todos los habitantes, ya sea en radio, televisión local, en escuelas y eventos sociales, para convencer al ciudadano del por qué se requiere una planta de generación, señalando los beneficios que representará. Lo mismo deberá hacerse con organizaciones no gubernamentales orientadas a la protección del medioambiente.

El incorporar mano de obra local en la construcción y crear empleos permanentes en la operación de la planta, suele contribuir a lograr la aceptación de este tipo de proyectos.

Cabe destacar que es conveniente que toda interacción se concrete, en la medida de lo posible, con acuerdos formales que plasmen los compromisos del desarrollador hacia la comunidad y el visto bueno de sus representantes, así como de las ONG.

## Proyecto ejecutivo

Dentro de este concepto se desarrollará la ingeniería básica y de detalle del proyecto, así como los estudios necesarios para presentar a las autoridades, como son el **estudio de impacto ambiental**, el **estudio de interconexión a red** y el **estudio de porteo** a los usuarios finales. También se generarán los indicadores económicos y de rentabilidad del mismo, y en el caso de estar involucrado en un proceso de licitación, normalmente el licitante desarrolla parte de estos estudios, con el fin de cotizar el monto a ofertar.

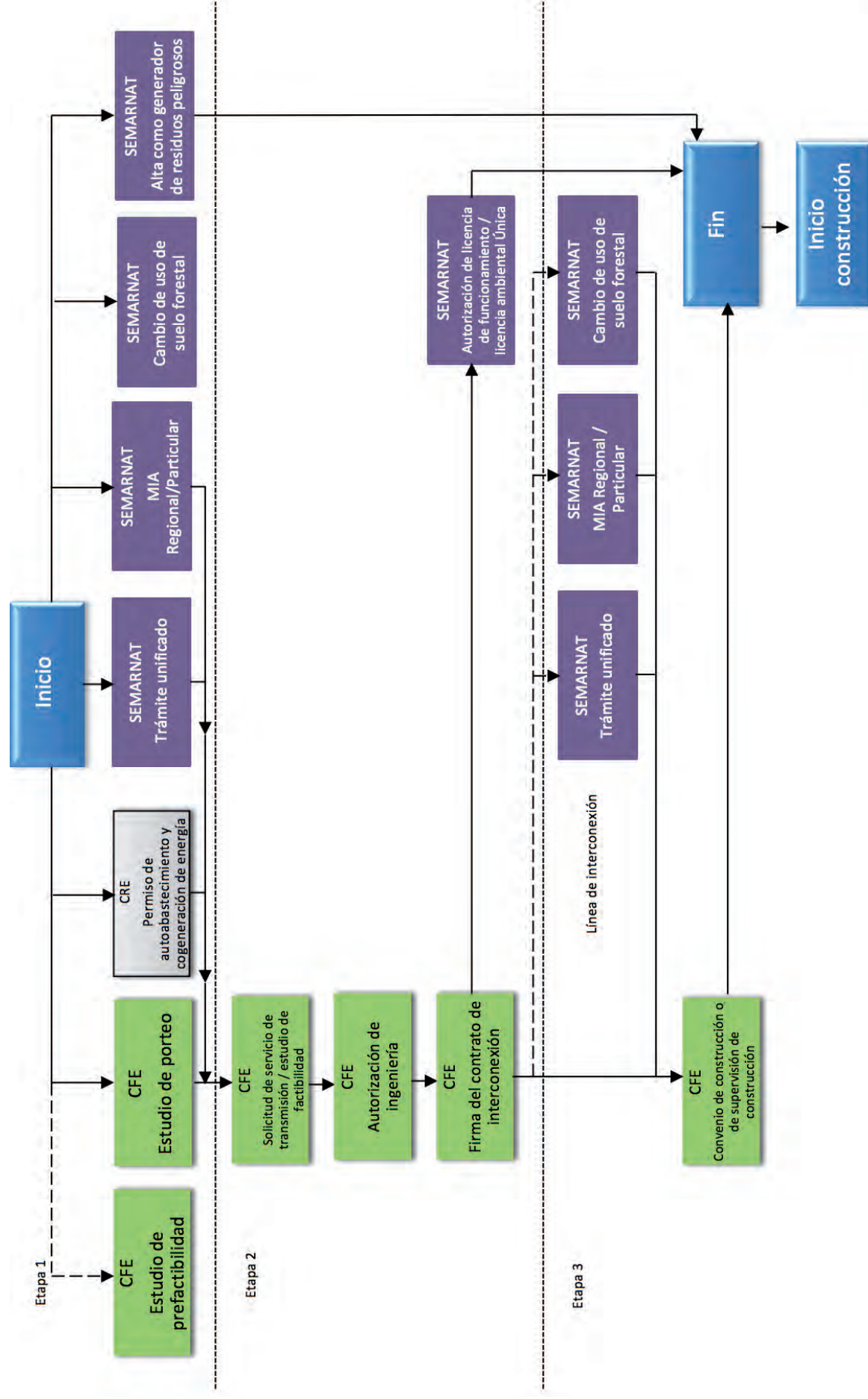
## Permisos de la autoridad

Es indispensable que los trámites ante las distintas entidades regulatorias del país como la SEMARNAT, la CONAGUA, la CRE y la CFE se realicen antes de cualquier inversión. La figura 4.3 publicada por la CRE en su sitio *web* [80] muestra la secuencia de los trámites a efectuar ante estas instancias. Éstos se pueden gestionar de manera paralela, salvo en los casos en los que se indica lo contrario en el mapa de procesos.

Como recomendaciones previas a la realización de trámites, la CRE sugiere lo siguiente:

- Revisar la situación legal de los terrenos donde se ubicará el proyecto y la línea de interconexión asociada al mismo.

- Revisar condiciones de disponibilidad del recurso hídrico para el proyecto.
- Antes de definir la ubicación física del proyecto, contactar a la Procuraduría Agraria para conocer la vocación o interés de predios dentro del Programa de Fomento a la Inversión en la Propiedad Rural (FIPP).
- Antes de iniciar las gestiones con la CFE, se requiere contar con el estudio de prefactibilidad de interconexión del proyecto. Este es un estudio que permite identificar al desarrollador desde el inicio, así como las barreras técnicas y tecnológicas que podrían enfrentarse al querer interconectarse con la red eléctrica. La certidumbre total sobre el punto de interconexión se tendrá hasta la firma del contrato de interconexión, sin embargo, dicho estudio de prefactibilidad permite celebrar los contratos de manera más ágil.
- Prever que, independientemente del requerimiento de transmisión de energía eléctrica de un proyecto, se requiere contar con un contrato de interconexión firmado para operar. La única situación que no lo requeriría sería cuando se tratara de un proyecto que se encontrara totalmente aislado de la red eléctrica.
- Si por el desarrollo de la central eléctrica y la línea de transmisión se requiere de la remoción de vegetación forestal en términos de lo establecido en la **Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable**, se deberá tramitar la autorización de cambio de uso de suelo de terrenos forestales ante la SEMARNAT.



- Si la empresa promotora cuenta con la propiedad o derecho de usufructo sobre los terrenos donde se instalarán tanto la central eléctrica como la línea de transmisión, podrá realizar el trámite unificado de cambio de uso de suelo ante la SEMARNAT (se emite una sola autorización que involucra lo concerniente al impacto ambiental y el cambio de uso de suelo de terrenos forestales).
- La autorización respectiva en materia de impacto ambiental, como de cambio de uso de suelo de terrenos forestales para cada uno de los componentes que integran el proyecto de generación y transmisión de energía eléctrica (central eléctrica y línea de interconexión) se podrá gestionar de manera independiente. Para todos los procesos se deberán presentar debidamente requisitadas, las solicitudes necesarias para los trámites ante la Comisión Nacional del Agua, en virtud de que éstos se pueden gestionar y obtenerse autorización, al mismo tiempo que los que se efectúan ante las otras instancias conforme el mapa de procesos establecido, de manera que se agilice la gestión y no haya retrasos en la autorización conjunta de los mismos.
- Los procesos de registro de alta de generadores de residuos peligrosos y licencia de funcionamiento o **licencia ambiental única** se pueden gestionar desde la primera etapa del proyecto, sin embargo, se sugiere hacerlo una vez que se tenga claridad sobre el mismo, esto es, en la segunda o tercera etapas.
- Actualización de licencia de funcionamiento. De la misma manera tiene el objetivo de expedir una licencia e integrar un registro de la operación de proyectos que generarán algún tipo de emisión a la atmósfera. Este trámite sólo se realiza en caso de que ya se cuente con una licencia de funcionamiento, en caso contrario se deberá solicitar la **licencia ambiental única**. El trámite tiene un plazo de 30 días hábiles y el entregable es la resolución de actualización de la licencia de funcionamiento.

### Trámites ante SEMARNAT

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) establece, en su artículo 28 [81], que los proyectos que involucren obras o actividades en torno al proceso de generación eléctrica requerirán la autorización en materia de impacto ambiental de la SEMARNAT. La manera de obtenerla es mediante un estudio

de impacto ambiental presentado, ya sea por los interesados o por instituciones de investigación, colegios o asociaciones profesionales. La SEMARNAT [82] proporciona información sobre el trámite requerido.

Un estudio de impacto ambiental normalmente contiene lo siguiente: i) datos generales del proyecto; ii) descripción de su construcción y operación; iii) cumplimiento de la normatividad ambiental y su vinculación con los planes de desarrollo; iv) descripción del medio físico, natural y social del sitio donde se desarrollará el proyecto; v) identificación y evaluación de los impactos que se pueden ocasionar con el proyecto, y vi) propuesta de medidas para mitigar o compensar dichos impactos. Adicionalmente y de acuerdo con los artículos 30 y 31 de la LGEEPA, se requerirá de un **informe preventivo** o de una **manifestación de impacto ambiental** (MIA). Esta última deberá contener, por lo menos, una descripción de los posibles efectos en el o los ecosistemas que pudieran ser afectados por la obra o actividad de que se trate, considerando el conjunto de los elementos que conforman dichos ecosistemas, así como las medidas preventivas, de mitigación y las demás necesarias para evitar y reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente. También es posible que los gobiernos estatales y municipales requieran de la presentación de un estudio de impacto ambiental, para cumplir con leyes y reglamentos locales.

Por otro lado, se requiere un permiso de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), órgano desconcentrado de la SEMARNAT que regula los títulos de concesión de uso y descargas de aguas residuales.

Una vez cubiertos los requisitos de impacto ambiental y riesgo, generación de emisiones y residuos peligrosos, y de servicios hidráulicos, la SEMARNAT expide la **licencia ambiental única** (LAU) que permite coordinar, en un solo proceso, la evaluación, dictamen y resolución de los trámites ambientales que los responsables de dichos establecimientos deben cumplir ante esta entidad en materia de impacto ambiental y riesgo, emisiones a la atmósfera, generación de residuos peligrosos y su tratamiento Y en lo referente a la descarga de aguas residuales y trámites conexos relacionados con cuerpos de agua y bienes nacionales, el trámite se hace ante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

A continuación se enumeran los trámites:

- Trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal. Tiene como objetivo unificar los procesos de la autorización de la manifestación de impacto ambiental del cambio de uso de suelo forestal. Para iniciar este trámite es necesario contar con el poder, propiedad o similar, para el uso del suelo que será afectado. El trámite toma 60 días hábiles y el entregable es el resolutivo del trámite unificado.
- Solicitud de autorización de cambio de uso de suelo en terrenos forestales. Para iniciar este trámite es necesario contar con el poder, propiedad o similar, para el uso de suelo que será afectado. El trámite toma 60 días hábiles y el entregable es el resolutivo de cambio de uso de suelo en terrenos forestales. El proceso no tiene afirmativa, ni negativa ficta.
- Recepción, evaluación y resolución de la manifestación de impacto ambiental (regional o particular. Tiene como objetivo evaluar y resolver sobre el estudio de impacto ambiental (regional o particular) del proyecto. El trámite toma 60 días hábiles y el entregable es la resolución de la manifestación de impacto ambiental.
- Registro de alta de generadores de residuos peligrosos. Tiene como objetivo integrar una base de datos de todos los generadores de residuos peligrosos para monitorear su producción y disposición final conforme a la normativa aplicable. El trámite tiene plazo de 60 días hábiles y el entregable es el propio registro como generador de residuos peligrosos.

- Licencia Ambiental Única. Tiene como objetivo expedir la licencia e integrar un registro de la operación de proyectos que generarán algún tipo de emisión a la atmósfera. Este trámite no debe realizarse si el proyecto ya cuenta con una Licencia de Funcionamiento, en cuyo caso se deberá realizar la actualización de la misma. El trámite tiene un plazo de 40 días hábiles y el entregable es la resolución de la Licencia Ambiental Única.

### Gestión con la CONAGUA

Los trámites de CONAGUA [83] se enumeran a continuación y se realizan de manera conjunta, por lo que es necesario ingresarlos al mismo tiempo con la solicitud debidamente requisitada y la información soporte anexada.

- Concesión de aprovechamiento de aguas superficiales. Este trámite es un requisito para los proyectos de más de 30 MW y aquéllos que no están previstos en los supuestos del artículo 120 del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. Para iniciar este proceso es necesario contar con el trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal, o la autorización o exención de la manifestación de impacto ambiental (regional o particular), y el título de permiso de generación eléctrica aplicable. El trámite tiene un plazo de 60 días hábiles y el entregable es el título de concesión de aprovechamiento de aguas superficiales. El proceso no tiene afirmativa, ni negativa ficta.
- Permiso para realizar obras de infraestructura hidráulica. Este proceso busca gestionar el trámite del permiso para realizar obras de infraestructura hidráulica.

lica, cuya administración compete a la CONAGUA. Para iniciar este proceso es necesario contar con el trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal, o la autorización o exención de la manifestación de impacto ambiental (regional o particular), y el título de permiso de generación eléctrica aplicable. El trámite tiene un plazo de 60 días hábiles y el entregable es el permiso para realizar obras de infraestructura hidráulica. El proceso no tiene afirmativa, ni negativa ficta.

- Concesión para la ocupación de terrenos federales, cuya administración compete a la CONAGUA. Este proceso busca gestionar el trámite de la concesión para la ocupación de terrenos federales para un proyecto hidroeléctrico, cuya administración compete a la CONAGUA. Para iniciar este proceso, es necesario contar con el trámite unificado de cambio de uso forestal, o la autorización o exención de la manifestación de impacto ambiental (regional o particular), y el título que permiso de generación eléctrica aplicable. El trámite tiene un plazo de 60 días hábiles y el entregable el título de concesión para la ocupación de terrenos federales.

## Gestión con la CRE

La Comisión Reguladora de Energía es la entidad en México que regula la energía eléctrica y el gas natural. Sus atribuciones incluyen regular el suministro y venta de energía eléctrica a los usuarios del servicio público, la adquisición de energía eléctrica para el servicio público, y la generación, exportación e importación de energía que realicen los particulares.

Por lo general, el tipo de trámite que los rellenos sanitarios gestionan con la CRE es un permiso de cogeneración, donde se establece el permiso para generar energía eléctrica en la modalidad de cogeneración y se autorizan los establecimientos asociados para recibir la electricidad con su demanda máxima. También se puede dar el caso de un permiso de autoabastecimiento en el caso de que toda la energía se utilice por la misma entidad que la produce. En el portal de la CRE [84] se pueden consultar diferentes documentos y formatos relacionados con estos permisos.

Por otro lado, la **Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética** (LAERFTE) [85] otorga diversas atribuciones a la Comisión

Reguladora de Energía, con el objeto de regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica. Aplica para rellenos sanitarios que cumplan con la normatividad y actualmente excluye proyectos de generación de energía mediante incineración de residuales.

La CRE cuenta con regulaciones específicas para fuentes renovables de energía, con la finalidad de fomentar el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica. Estos instrumentos consideran las características de este tipo de fuentes de energía, como es la disponibilidad intermitente del energético primario, y se incluyen conceptos únicamente aplicables a dichas fuentes [86].

- Energía sobrante. Cuando un permisionario entrega a sus centros de consumo una cantidad de energía mayor a la correspondiente de su potencia comprometida de porteo, o cuando la demanda de los centros de consumo sea menor a la potencia entregada en el punto de interconexión.
- Energía faltante. Cuando una fuente de energía no satisface la potencia de compromiso de porteo con sus centros de consumo.
- Energía complementaria. Se considera así cuando un centro de consumo, además de la energía que recibe de su fuente de energía, requiere de un contrato de suministro normal de ésta. Con las energías complementaria y faltante se determina la demanda facturable, como lo establece el Acuerdo de Tarifas.



- Capacidad aportada al SEN. Se reconoce la capacidad que la fuente de energía renovable aporta en las horas de máxima demanda del sistema eléctrico nacional.

Para el caso de fuentes de energía renovable es posible realizar compensaciones de energía faltante con energía sobrante, es decir, si existe energía sobrante neta en un mes, ésta puede utilizarse para compensar faltantes de meses posteriores, haciendo un corte anual.

Asimismo, los cargos por la transmisión de energía eléctrica para fuentes renovables se calculan en función de la energía portada y para ello, dichos cargos se multiplican por el factor de planta de la fuente de energía. El instrumento para regular lo anterior es el contrato de interconexión para fuentes de energía renovable del tipo intermitente.

Para realizar este trámite se recomienda tener el estudio de prefactibilidad de interconexión por anticipado. El trámite toma 50 días

hábiles, puede realizarse en línea y el entregable es el título de permiso de autoabastecimiento o cogeneración de energía eléctrica. El proceso no tiene afirmativa ni negativa ficta.

### Gestión con la CFE

Como se mencionó anteriormente, en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) y su Reglamento (RLSPEE), los municipios y el sector privado pueden participar en la industria eléctrica mexicana, en las actividades que se presentan en la tabla 4.2. Para el caso de los proyectos que nos ocupan se aplicarían las modalidades de autoabastecimiento y cogeneración.

**Tabla 4.2.** Modalidades de participación del sector privado en la generación de electricidad.

#### Autoabastecimiento

Generación de energía eléctrica destinada a la satisfacción de necesidades propias de personas físicas o morales.

#### Cogeneración

Energía eléctrica producida conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambos, cuando la energía térmica no aprovechada en los procesos se utilice para la producción directa o indirecta de energía eléctrica, o cuando se usen combustibles producidos en sus procesos para la generación directa o indirecta de energía eléctrica.

#### Producción independiente

Generar energía eléctrica destinada a su venta a la Comisión Federal de Electricidad.

#### Pequeña producción

Puede destinarse en su totalidad para su venta a la Comisión Federal de Electricidad. En este caso, la capacidad total del proyecto no podrá exceder de 30 MW. También puede ser una modalidad de autoabastecimiento, en donde los solicitantes destinen el total de la producción de energía eléctrica a pequeñas comunidades rurales o áreas aisladas que carezcan de la misma y que la utilicen para su autoconsumo, siempre que los interesados constituyan cooperativas de consumo, copropiedades, asociaciones o sociedades civiles, o celebren convenios de cooperación solidaria para dicho propósito y que los proyectos, en tales casos, no excedan de 1 MW.

#### Importación o exportación

La importación o exportación de energía eléctrica, de acuerdo con las disposiciones de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.

#### Emergencias

La generación de energía eléctrica destinada a uso en emergencias derivadas de interrupciones en el servicio público de energía eléctrica.

La CFE definió las Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [87], en las cuales se establecen y comunican los requerimientos técnicos, administrativos y legales para la interconexión al sistema. El solicitante deberá elaborar un Estudio de Factibilidad de Interconexión al SEN que demuestre que la instalación podrá interconectarse al sistema eléctrico nacional sin problema alguno.

Asimismo deberá elaborarse un **Estudio de Transmisión de Energía Eléctrica** que defina la viabilidad para la transmisión de electricidad a través de la red propiedad de la CFE. Aquí se definen las características del porteo de electricidad de acuerdo con la ubicación de la instalación y los socios que tomarán la energía, la carga del sistema eléctrico, los servicios conexos requeridos y el tipo de consumo de los socios (en baja o media tensión). Con base en este estudio, la CFE calculará los costos de porteo.

Producto de la presentación de los estudios mencionados ante la Subdirección de Programación de la CFE se desprenden los siguientes documentos:

- Contrato para la interconexión. El objeto de este contrato es realizar y mantener durante la vigencia del mismo, la interconexión entre el sistema eléctrico nacional, la cual es propiedad de CFE, y el generador. Al celebrar un **contrato de interconexión con la CFE**, también es común el celebrar un **contrato de servidumbre de paso** con propietarios de terrenos por donde pasarán las líneas de transmisión de la energía eléctrica. Este contrato debe ser autorizado por el cabildo, además de formalizarse con el gobierno municipal y la CFE.
- Convenio con la CFE de compraventa de excedentes de energía eléctrica.
- Convenio con la CFE para el servicio de transmisión de energía eléctrica.
- Contrato de adhesión con la CFE para la prestación del servicio de respaldo eléctrico, el cual permite otorgar energía eléctrica a los usuarios socios, en caso de falla en los generadores instalados o trabajos de mantenimiento. Consiste en que la CFE cobra una cantidad mensual que funge como seguro.

Los trámites a realizar son los siguientes:

- Estudio de prefactibilidad de interconexión. Tiene como objetivo identificar la viabilidad preliminar de interconexión de un proyecto de generación con el sistema eléctrico. Tiene un tiempo de ejecución de hasta 60 días hábiles, dependiendo del tamaño del proyecto, y el entregable final es un reporte del estudio.
- Estudio de porteo. Tiene como objetivo determinar el costo de transmisión de energía eléctrica entre la fuente y los puntos de carga de un proyecto de autoabastecimiento. Tiene un tiempo de ejecución de 45 días hábiles y el entregable final es el resolutivo del estudio.
- Solicitud de servicio de transmisión. Éste es un importante requisito para la operación del proyecto de generación eléctrica y tiene como objetivo iniciar las gestiones hacia la firma del contrato interconexión y los convenios asociados. La solicitud tiene un tiempo de respuesta de 60 días hábiles, dependiendo del tamaño del proyecto, y el entregable final es el resultado del estudio de factibilidad.
- Autorización de ingeniería básica. Tiene como objetivo autorizar la ingeniería básica del proyecto de generación eléctrica, ya sea desarrollada por la CFE o por algún tercero. El tiempo para su obtención es de 20 días hábiles y el entregable es la autorización de la misma.
- Solicitud de firma del contrato de interconexión y convenios asociados. Tiene como objetivo celebrar el contrato de

interconexión y generar un compromiso de largo plazo para el servicio de transmisión desde el punto de interconexión del proyecto, el cual puede servir para financiar el desarrollo de la línea de interconexión, cuando aplique. El proceso toma 90 días naturales y el entregable es el contrato de interconexión y convenios asociados firmados.

- Convenio de construcción. Tiene como objetivo contratar a la CFE para gestionar las obras de construcción e instalación del proyecto de generación de electricidad. Éste es un proceso opcional y los permisionarios pueden llevarlo a cabo a través de terceros. El plazo de evaluación es de 20 días hábiles y el entregable es el oficio resolutivo en el cual la CFE ofrece un presupuesto estimado para la consideración del interesado.
- Convenio de supervisión de construcción. En caso que se opte por ejecutar la construcción a través de un tercero es necesario realizar este proceso, el cual tiene como objetivo que la CFE supervise la construcción e instalación del proyecto de generación. El plazo de evaluación es de 20 días hábiles y el entregable es el oficio resolutivo en el cual la CFE ofrece un presupuesto estimado para la consideración del interesado.

### Registro ante el mecanismo de desarrollo limpio (MDL)

Dado que México ratificó el **Protocolo de Kioto** como país **no Anexo I**, los proyectos de energías renovables con reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tienen la posibilidad de obtener beneficios económicos adicionales a la generación de energía, a través de la venta de bonos de carbono. Para ello se requiere su registro como proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) [89].

En México, la SEMARNAT es la promotora y coordinadora del programa MDL, que tiene como objetivo inscribir el proyecto en el mercado de bonos de carbono. Otro sitio orientado al financiamiento y desarrollo de proyectos de carbono para América Latina es la plataforma Finanzas Carbono [91], desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Uno de los requisitos iniciales para el registro de un proyecto MDL es que la cantidad de basura acumulada en los rellenos sanitarios sea mayor a 200,000 toneladas, y como ya se mencionó, la EPA re-

comienda al menos un millón de toneladas para proyectos de generación eléctrica.

La figura 4.4 muestra la secuencia de actividades a seguir para el registro del proyecto, el cual puede cumplirse en periodos de tiempo que van de uno a dos años. Un documento inicial es la **nota de idea de proyecto** o PIN (*project idea note*) y aunque no es obligatorio, es conveniente elaborarlo, ya que le permitirá al desarrollador recibir comentarios de parte de las instancias del MDL y la autoridad ambiental respecto de la viabilidad del proyecto.

El PDD es el documento principal en el proceso de registro de un proyecto MDL, y contiene, entre otros, la descripción técnica, una cuantificación de la reducción de emisiones de GEI, una justificación de la adicionalidad del proyecto, la metodología para la determinación de línea de base y el plan de monitoreo. La **adicionalidad** es un criterio de elegibilidad muy importante que ayuda a determinar si la implementación de dicho proyecto conlleva a un nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por debajo del nivel de emisiones de GEI que hubiera existido en el escenario más probable, si no se hubiera implementado dicho proyecto.

En términos prácticos, la **adicionalidad** ayuda a diferenciar aquellos proyectos que hubieran ocurrido con o sin bonos de carbono (proyectos no adicionales), de aquellos en los que, en ausencia del ingreso por bonos de carbono, el escenario hubiera sido distinto y hubiera implicado un nivel de emisiones de GEI mayor al que se obtendría a través de la implementación del proyecto (proyectos adicionales).



**Figura 4.4. Ciclo de proyecto MDL.**

**Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.**

En lo que se refiere a la consulta pública, éste es un requisito obligatorio y consiste en dar a conocer a la comunidad donde se desarrolla el proyecto, información sobre la naturaleza de éste, y los impactos ambientales del mismo. Los resultados de este proceso deberán formar parte del diseño final establecido en el PDD.

Habiéndose revisado el PDD, la SEMARNAT, como autoridad ambiental nacional, emite una carta de aprobación para avalar que el proyecto contribuye al desarrollo sostenible del país.

La validación, por otro lado, es el proceso de evaluación independiente de la actividad del proyecto, en la que una entidad acreditada constata que el proyecto se ajusta a los requisitos que establece el MDL y a las decisiones y normas de la junta ejecutiva. Para ello se analiza el PDD y se realizan visitas al sitio en donde se desarrollará el proyecto MDL, para asegurarse que se cumplirán los requisitos exigidos y que todo lo especificado en el PDD se encuentra debidamente sustentado con documentación.

Una vez validado el proyecto y en conjunto con la SEMARNAT, el desarrollador procede a hacer la solicitud de registro ante el MDL, con lo que ya se pueden iniciar las obras del mismo.

La etapa de monitoreo y verificación consiste en que una entidad independiente acreditada, vigile sistemáticamente el desempeño del pro-

yecto mediante la medición y el registro de los indicadores clave del proyecto. Una vez verificada que la reducción de emisiones se hubiere producido, la entidad acreditada certifica ante la junta ejecutiva del MDL esa reducción y es posible la emisión de certificados (CER) para un determinado periodo, los cuales podrán venderse en mercados de valores específicos para obtener ingresos por el equivalente a las emisiones que dejan de generarse. Como dato de referencia (2012), el precio de los CER rondó entre los tres y cuatro dólares.

Realizar el proceso completo de MDL tiene un costo aproximado que va de los 100 mil a los 200 mil dólares, el cual depende del tamaño del proyecto.

Como comentario final cabe mencionar que la fecha de vigencia del protocolo de Kioto se cumplió en diciembre de 2012, y aunque se acordó una extensión, a esta fecha (2015) las reglas del próximo periodo aún son inciertas.

### **Esquemas de financiamiento para proyectos de conversión de RSU a energía**

Como ya se mencionó, al municipio le compete la responsabilidad del manejo, transporte y confinamiento de los RSU, por lo que le corresponderá a éste buscar las fuentes de financiamiento para capital de inversión en nuevos proyectos.

Existen diferentes esquemas para financiar un proyecto de este tipo: a) recursos propios, b) emisión de bonos para atraer recursos de inversionistas privados, c) préstamos bancarios o de la banca de desarrollo, y d) a través de donaciones de organizaciones que promueven proyectos de mejora del medioambiente.

En Estados Unidos, una opción bastante exitosa para el desarrollo de plantas *waste to energy* en las cuales el gobierno local es dueño, ha sido la emisión de bonos de diferentes modalidades y plazos [92], garantizados por el propio gobierno y pagaderos a los inversionistas, ya sea a través de la recaudación de impuestos, o mediante los ingresos del proyecto por *tipping fees* y venta de electricidad. Normalmente, la emisión de bonos de este tipo se acompaña con incentivos fiscales tales como la exención de impuestos. En este tipo de financiamiento se asume que existe un riesgo bajo en los proyectos.

Habría que explorar si éste puede ser un mecanismo de financiamiento viable para México, ya que sólo hay tres proyectos desarrollados para rellenos sanitarios y todavía ninguno en plantas de incineración, por lo que el parámetro de percepción de riesgo podría jugar un papel importante.

El financiamiento a través de préstamos de instituciones bancarias o banca de desarrollo podría ser de mayor interés para este tipo de proyectos, por lo que a continuación se describen con mayor detalle, las fuentes de financiamiento posibles.

Una vez concluidos todos los análisis de costo–beneficio del proyecto es necesario presentarlo a consideración de la Unidad de Inversiones de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y obtener el registro en la cartera de proyectos, con el objeto que el proyecto sea elegible para acceder a recursos federales, pudiendo ser éste a fondo perdido. Un siguiente paso corresponde a la negociación con la banca de desarrollo, de los términos mediante los cuales se puede estructurar jurídicamente y financieramente un proyecto que permita su bancabilidad y la participación de la inversión privada. Como regla general, todo proyecto deberá ofrecer certeza a los organismos de financiamiento públicos o privados, nacionales o internacionales, para que se otorguen los recursos para diseñar y construir el proyecto.

Son varias las instancias a las que se puede acudir para solicitar préstamos, garantías y otros apoyos financieros para el desarrollo de este tipo de proyectos. En agosto de 2011, la OLADE [93] publicó un reporte completo que describe los mecanismos financieros disponibles para el desarrollo de proyectos de energías renovables en México. La tabla 4.3 tomada de dicho reporte, resume las organizaciones y las características de los mecanismos financieros.

## Financiamiento de BANOBRAS

El Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS) [94] es una institución de banca de desarrollo que tiene por objeto financiar o refinanciar proyectos de inversión pública o privada en infraestructura y servicios públicos, y da asistencia técnica a gobiernos estatales, municipales y sus respectivos organismos.

Cuenta dentro de sus líneas de apoyo establecidas con el tema de residuos sólidos, por lo que son claramente candidatos a préstamos, los proyectos de generación de electricidad con energías renovables que se asocien con rellenos sanitarios y plantas de incineración.

Como punto central de sus programas está el Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), que otorga apoyos recuperables y no recuperables para fomentar la construcción, financiamiento y transferencia de proyectos de infraestructura. Puede financiar hasta el 50% de los costos de estudios de factibilidad, así como apoyar al municipio en la elaboración de la solicitud formal y llenado de formatos de la SEMARNAT y la SHCP. Asimismo asume riesgos que el mercado no está dispuesto a tomar, de manera que se estimule la participación del sector privado en la infraestructura.

Uno de los productos financieros que ofrece BANOBRAS, que está enfocado a cubrir de la mejor manera las necesidades inherentes al desarrollo de la infraestructura y servicios públicos, así como a mejorar la calidad crediticia de sus clientes, es la garantía financiera, la cual es un accesorio de crédito que garantiza a un acreedor, el pago oportuno de su capital y/o intereses respecto a un crédito que haya otorgado.



**Tabla 4.3.** Mecanismos financieros disponibles para el desarrollo de proyectos de energías renovables en México [93].

| Organización                       | Nombre del programa/<br>mecanismo             | Tipo de mecanismo | Fase del proyecto financiable | Cobertura geográfica    | Sitio web                                                                            |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| BANOBRAS                           | Estructuración de proyectos                   | Préstamo          | Construcción                  | Todo el país            | <a href="http://www.banobras.gob.mx">www.banobras.gob.mx</a>                         |
| NAFIN                              | Programa de Apoyo a Proyectos Sustentables    | Préstamo          | Construcción                  | Todo el país            | <a href="http://www.nafin.com">www.nafin.com</a>                                     |
| Banco Mundial                      | Corporación Financiera Internacional          | Préstamo          | Construcción                  | Todo el país            | <a href="http://www.ifc.org">www.ifc.org</a>                                         |
| BANOBRAS                           | Fondo Nacional de Infraestructura             | Préstamo          | Estudios, construcción        | Todo el país            | <a href="http://www.fonadin.gob.mx">www.fonadin.gob.mx</a>                           |
| Banco de América del Norte         | Programas Ambientales Fronterizos             | Préstamo          | Estudios, construcción        | Frontera norte del país | <a href="http://www.nadb.org">www.nadb.org</a>                                       |
| BANOBRAS                           | Garantías Financieras                         | Garantía          | Construcción                  | Todo el país            | <a href="http://www.banobras.gob.mx">www.banobras.gob.mx</a>                         |
| NAFIN                              | Garantías Financieras                         | Garantía          | Construcción                  | Todo el país            | <a href="http://www.nafin.com">www.nafin.com</a>                                     |
| FONADIN                            | Garantías Financieras                         | Garantía          | Construcción, operación       | Todo el país            | <a href="http://www.fonadin.gob.mx">www.fonadin.gob.mx</a>                           |
| BANCOMEXT                          | FOMECAR                                       | Préstamo          | Construcción, operación       | Todo el país            | <a href="http://www.bancomext.gob.mx">www.bancomext.gob.mx</a>                       |
| Banco Interamericano de Desarrollo | Clean Technology Fund/Climate Investment Fund | Préstamo          | Estudios, construcción        | Todo el país            | <a href="http://www.climateinvestment-funds.org">www.climateinvestment-funds.org</a> |

Los beneficios que obtendrán los acreedores que contraten la garantía financiera de BANOBRAS son los siguientes:

- Reducción de sus requerimientos de capital y reservas.
- Disminución de la severidad de la pérdida en caso de incumplimiento.
- Induce una mejor calificación de calidad crediticia del financiamiento garantizado.
- Permite que el cliente acceda a mejores condiciones financieras, principalmente una disminución en las tasas de interés.

Por otro lado, gracias a las reformas instrumentadas en los años 2006–2007, las cuales permiten que los recursos del **Fondo de Aportaciones para la Infraestructura Social** (FAIS) puedan afectarse por los municipios hasta en un 25% como fuente de pago o garantía para cubrir el pago de sus obligaciones, BANOBRAS instrumentó el esquema crediticio BANOBRAS-FAIS.

Este esquema permite, a los municipios de una misma entidad federativa, acceder a recursos monetarios a un costo que no podrían obtener de forma aislada. El esquema de financiamiento consiste en otorgar un

crédito hasta por el 25% de los recursos económicos que reciba el municipio de la federación con motivo del FAIS, a una tasa de interés fija y a un plazo hasta por tres años.

Otro esquema diseñado para favorecer la asociación público-privada es el programa PRORESOL (Programa de Residuos Sólidos Municipales) que se presenta en la figura 4.5. Este programa otorga apoyos financieros no recuperables, en donde el FONADIN aporta el 50% de la inversión en sociedad con el privado. Esta aportación es no recuperable y disminuye el costo del servicio prestado por el privado.

Las ventajas del PRORESOL son:

- ✓ La iniciativa privada y el FONADIN aportan el 100% de la inversión en infraestructura.
- ✓ Los municipios rediseñan su estructura organizacional, volviéndose más eficaces en la prestación de los servicios relacionados con el manejo de los residuos sólidos.
- ✓ Tienen la posibilidad de desarrollar un esquema tarifario que les permita fortalecer sus ingresos.
- ✓ La empresa que prestará el servicio se elige con base en la oferta más económica.

El proceso a seguir tiene un lapso de duración entre 6 y 8 meses, y consta de los siguientes puntos:

- ✓ Solicitud
- ✓ Visita para el llenado de la justificación económica.
- ✓ FONADIN revisa y presenta a la unidad de inversiones la justificación económica.
- ✓ FONADIN presenta a su comité la solicitud de apoyo no recuperable para el proyecto.
- ✓ FONADIN proporciona asistencia legal para la elaboración de las bases de licitación.
- ✓ Presentación de propuestas y fallo.

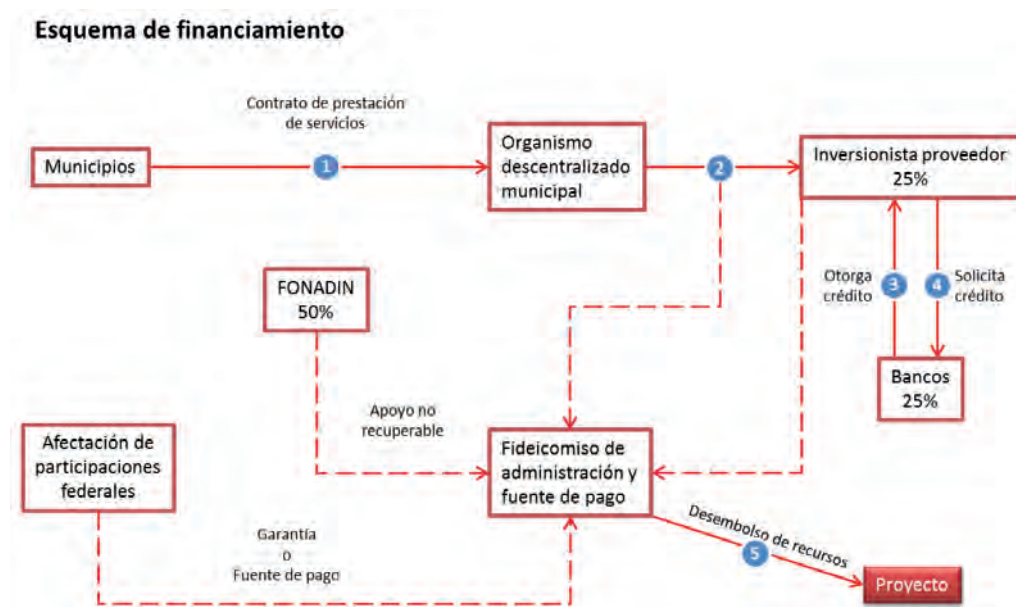


Figura 4.5. Esquema de financiamiento PRORESOL.

## Mecanismos de apoyo

Son básicamente dos los mecanismos de apoyo existentes para este tipo de proyectos. El primero es gestionado por el Banco Mundial y recibe el nombre de Fondo Global para el Medio Ambiente [95] (GEF por sus siglas en inglés), y el otro es el **Mecanismo de Desarrollo Limpio** (MDL).

El GEF reúne a 182 gobiernos en una sociedad con instituciones internacionales, ONG, y el sector privado, para desarrollar temas ambientales de interés mundial. El GEF provee donaciones para cubrir los costos adicionales, asociados con la transformación de un proyecto con beneficios nacionales en otro que contemple adicionalmente beneficios globales medioambientales. El área de trabajo en la que se encuadraría un proyecto de conversión de energía de RSU sería el de **cambio climático**.

En México, uno de los casos exitosos de apoyo del GEF para proyectos de energías renovables es el proyecto de **Bioenergía de Nuevo León**, el cual recibió una donación de 6.53 millones de dólares para efectos demostrativos de la producción de energía eléctrica a partir de biogás de desechos sólidos municipales, en el relleno sanitario de Monterrey, Nuevo León.

## Mecanismo de desarrollo limpio

Como se mencionó en el capítulo 1, en México se tienen registrados a la fecha (2015) 17 proyectos en el portal del **Mecanismo de Desarrollo Limpio** de las Naciones Unidas (UNFCCC) que comercializan bonos de carbono.

Con el fin de facilitar el acceso a estos mercados, en México se cuenta con la asistencia de dos organismos más que en principio podrían detonar la participación de proyectos mexicanos, especialmente de energías renovables, en el MDL: el Fondo Mexicano de Carbono [90] y la iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático del Banco Interamericano de Desarrollo o SECCI (*Sustainable Energy and Climate Change Initiative*) [96]. Ambas organizaciones brindan asistencia financiera para la elaboración del PDD, validación y registro para obtener bonos de carbono.

El FOMECAR es administrado por BANCOMEXT y llega a otorgar aportaciones monetarias a fondo perdido a proyectos de esta

naturaleza. BANCOMEXT también apoya en la cobertura de los costos de registro ante la ONU de proyectos MDL, siempre y cuando los beneficiarios se comprometan a reembolsar la asistencia financiera, más una comisión de éxito, una vez que generen bonos de carbono.

## Causas de fracasos en proyectos *waste to energy*

En el capítulo 3 se hizo un recuento del estatus de la tecnología de plantas WTE, mencionando la experiencia de empresas internacionales en el desarrollo de proyectos. SNC-Lavalin [97] menciona que no todos los proyectos desarrollados han sido exitosos y resume las causas de los fracasos en la siguiente lista:

- Prometer más de lo que se puede lograr con el objetivo de generar interés.
- Integración de grupos de trabajo sin experiencia en el tema.
- Falta de participación de la comunidad.
- Ignorar los plazos necesarios para obtener permisos.
- Falta de capital para el desarrollo completo del proyecto.
- Emplear una mentalidad de desarrollar el proyecto “a toda prisa”, sin considerar que toma años desde las discusiones iniciales hasta el inicio de operaciones, y que dentro de los proyectos de energía, las plantas WTE representan un alto riesgo para el capital de inversión.

- Creencia por parte de los municipios y compañías transportistas que se les debe pagar por sus RSU.
- Limitaciones de las compañías de ingeniería, procura y construcción en el acceso a los detalles de la tecnología.

Por su parte, *SCS Engineers* [98] presenta una tabla en la que se presentan 10 preguntas que el municipio o dueño deben hacer acerca de la tecnología que se pudiera estar ofertando, la cual es sumamente útil en el caso de que se presenten nuevas tecnologías o compañías a ofertar sus servicios.

#### **1. Realmente, ¿la tecnología trabaja?**

- Verificar experiencia operativa.
  - Tener en cuenta que las plantas piloto no son totalmente representativas.
  - Verificar si es una transferencia tecnológica de Europa y Asia.
- Verificar procesos de escalamiento.
- Verificar la necesidad de preprocesamiento de los RSU.
- Verificar los índices de confiabilidad y tiempos de mantenimiento requeridos.
- Existencia de subproductos.
- Existencia de reportes de terceros sobre la tecnología.

#### **2. Averiguar sobre la fortaleza de la empresa verificando:**

- Hoja de balance financiero.
- Currículo empresarial y del personal técnico.
- Existencia de patentes y áreas dedicadas a investigación y desarrollo.
- Plantas en operación actual.
- Averiguar si la empresa construye y opera.
- Capacidad para ofrecer garantías de operación de largo plazo.
- Acceso a capital en el caso de reparaciones.

#### **3. Averiguar si la tecnología es congruente con el plan de gestión de RSU:**

- Toma todo el volumen de RSU o sólo parte de ellos.
- Capacidad de la planta.
- ¿Qué especificación de RSU de entrada se requiere?
- ¿Cómo afecta la ubicación de la planta?
- Necesidad de estaciones de transferencia.

#### **4. Posibilidad de suministro de RSU a la planta:**

- ¿Se tiene suficiente RSU?
- ¿Qué otros residuales hay disponibles?
- Desvío de RSU de rellenos sanitarios.
- Autoridad legal sobre los RSU.

#### **5. Necesidades propias del sitio:**

- Disponibilidad de terreno.
  - Suministro del terreno por el municipio o por el desarrollador.
- Otros suministros requeridos.
  - Líneas eléctricas, agua, drenaje.
  - ¿Es la capacidad de suministros suficiente?
  - ¿Quién paga?
- Postura de los vecinos.
  - Tráfico, ruido, emisiones, estética.

#### **6. ¿Cuáles son los permisos requeridos?**

- Típicamente involucran varias dependencias y es un proceso lento.
- Impacto ambiental, uso de suelo, suministro de agua y disposición de residuales, etc.

**7. ¿Qué mercados están disponibles para la energía y subproductos?**

- Electricidad, calor, combustibles, composta.
- Tomar en cuenta los precios de la energía.
- Considerar la existencia de mercados para cenizas residuales.
- Considerar la posibilidad de recuperar metales de cenizas y de rellenos sanitarios.

**8. ¿Cuáles son los costos?**

- Existencia de costos de referencia.
- Posibilidad de adaptar costos de referencia de plantas WTE y otras plantas industriales.
- Costos para confinar desechos.
- Costos de operación y mantenimiento.

**9. Riesgos financieros:**

- ¿Existen compromisos financieros de la comunidad?
  - ¿Está el contribuyente en riesgo, en caso de fracaso del proyecto?
- ¿Cómo se financia la planta?
  - Préstamos, donaciones, inversión privada directa.
- Fondos adicionales por sobrecostos.
- Es primordial un asesor financiero con amplia experiencia.

**10. ¿Qué pasa si todo falla?**

- Plan de contingencia para problemas mayores o fallas.
  - Municipio debe disponer de los RSU.
  - ¿En qué lapso de tiempo?
    - √ Tiempo para establecer otra opción de confinamiento.
  - ¿Y a qué costo?
    - √ Puede pagar más por confinamiento.
    - √ Costos de transportación.
- Incluir fondos en el paquete financiero para contingencias.
- Incluir seguros y garantías.



## Capítulo 5. Evaluación tecno-económica de proyectos de conversión de biogás de rellenos sanitarios a energía eléctrica

### Evaluación técnica de un proyecto de inversión

Como se mencionó en el capítulo anterior, la evaluación técnica de un proyecto de inversión implica en primer término, la preparación o formulación de un estudio preliminar, en donde se involucra plantear el objetivo y las metas. Con base en ello se definen los alcances que involucran las razones por las cuales se sustenta la instalación de una planta de conversión de RSU a energía eléctrica y se selecciona la tecnología.

Una vez definido lo anterior se procede a presentar la evaluación preliminar tanto técnica como económica del proyecto. Esto implica realizar estudios de mercado, capacidad, localización, ingeniería y administración del proyecto. Estos estudios preliminares muestran información general de la viabilidad del mismo y se basa en información existente, sin incurrir en gastos mayores.

Si el estudio preliminar muestra viabilidad del proyecto y se acepta, se procede al desarrollo del estudio de prefactibilidad, el cual se basa en estudios con mayor detalle. Aquí se requiere de fuentes secundarias, del conocimiento de la tecnología planteada, de investigación de campo y estudios de gabinete, entre otros.

Finalmente, el estudio de factibilidad del proyecto muestra la viabilidad del mismo. La información que entrega este estudio permite tomar la decisión de implementar o no el proyecto.

Generalmente, los proyectos que se formulen deben ser sostenibles técnica y económicamente, y sus estudios deben considerar toda implicación a través del ciclo de vida del proyecto, desde que surge la idea hasta el cierre y desmantelamiento del mismo.

### Tecnologías para uso del biogás de rellenos sanitarios

El biogás de un relleno sanitario (BGRS) puede tener varias aplicaciones, las cuales dependerán mucho de su calidad. El BGRS se clasifica en combustible de grado bajo, medio y alto, de acuerdo con el **manual para la preparación de generación de energía a partir de rellenos sanitarios**, elaborado para el Banco Mundial [99]. Su

pretratamiento y procesamiento dependerá del uso que se le asigne.

El combustible de grado medio y bajo tiene un poder calorífico entre 16.0 MJ/m<sup>3</sup> y 24.0 MJ/m<sup>3</sup>. El de alto grado tiene un poder calorífico aproximado de 37.0 MJ/m<sup>3</sup>, y puede sustituir al gas natural en tuberías de distribución.

### Generación de energía eléctrica

La tabla 5.1 resume las condiciones para cada una de las tecnologías, así como sus costos típicos. En la tabla 5.2 se resumen las ventajas y desventajas de las tres tecnologías más usadas en rellenos sanitarios.

### Evaluación técnica de proyectos de conversión de biogás a energía eléctrica

Para evaluar la viabilidad de un proyecto de generación con biogás de rellenos sanitarios es necesario conocer la naturaleza y características del combustible, el cual es la base para su diseño. El conocimiento integral del sistema, desde el manejo de los residuos sólidos hasta la recolección del gas, resulta en un proyecto exitoso, así como la seguridad para manejar oportunamente los riesgos económicos del proyecto.

### Factores que impactan en la viabilidad de un sistema de generación eléctrica

Antes de tomar la decisión de instalar una planta de generación usando el gas de un relleno sanitario, deben tomarse en cuenta

**Tabla 5.1.** Información típica de tecnologías de conversión de BGRS.

| Tecnología                    | Rango típico de flujos (ft <sup>3</sup> /min) | Tamaño sugerido de la planta | Eficiencia eléctrica neta |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Microturbinas                 | < 100                                         | < 100 kW                     | 25%-30%                   |
| Motores de combustión interna | 150 a 5,000                                   | 0.5 MW a 12 MW               | 32%-40%                   |
| Turbinas de gas               | 4,000 a 20,000                                | 3 MW a 18 MW                 | 26%-32%                   |

**Tabla 5.2.** Ventajas y desventajas de las tecnologías de conversión de BGRS.

| Tecnología                  | Ventajas                                                                                                                                                                                                                                    | Desventajas                                                                                             |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Motor de combustión interna | – Costos de inversión relativamente bajos, alta eficiencia y tamaño reducido. Es la tecnología más usada a nivel mundial.                                                                                                                   | – Costos de O & M relativamente altos.                                                                  |
| Turbinas de gas             | – Son más resistentes a la corrosión o daños.<br>– Producen menos emisiones de NOx.<br>– Bajos costos de O & M.                                                                                                                             | – Causa altas pérdidas por cargas parásitas debido a la compresión que requiere del gas.                |
| Microturbina                | – Aplicación en sitios de baja producción.<br>– Funciona con gas relativamente pobre.<br>– Emite bajos NOx.<br>– Muy funcional para agregar o remover unidades.<br>– Interconexión relativamente fácil por su baja capacidad de generación. | – Costos de inversión más altos.<br>– Costos de O & M más altos.<br>– Limitada a muy bajas capacidades. |

factores que impactan de forma importante en el rendimiento técnico y por consiguiente en el aspecto económico. Entre los factores de mayor impacto que se han detectado destacan los siguientes:

- Disponibilidad de generación del biogás.
- Tecnología usada para su recolección y uso.
- Mercado confiable para consumo de la energía.
- Precio de venta (en México, generalmente es el precio de la tarifa que sustituye).
- Costos de inversión y costos de O & M.

#### a) Disponibilidad del gas

En la generación del BGRS influyen varios factores físicos, químicos y microbiológicos, que ocurren de forma natural en el residuo almacenado. Un déficit en la producción del gas conllevaría a pro-

blemas técnicos. Los factores que afectan la producción son: la cantidad de residuos disponibles, las características de los mismos, y el entorno del sitio que controla el proceso de descomposición mediante el cual se produce el combustible.

#### b) Captación del gas

Las fallas que generalmente ocurren en el sistema de captación pueden derivarse de una deficiente instalación por las condiciones del sitio, o bien por la deficiente operación y mantenimiento del mismo. Estas fallas resultan en una reducción en la cantidad del gas que se recolecta, repercutiendo en el rendimiento del proyecto.

### c) Mercado confiable para consumo de la energía

La rentabilidad de un proyecto se rige por sus ingresos, que deben superar en cierta medida los gastos proyectados a una tasa de descuento definida. Los ingresos son función del precio de venta del producto y subproductos, y para estos casos, ingresos por venta de bonos de carbono. Generalmente este tipo de proyectos logran su rentabilidad con los ingresos por venta de bonos, sin embargo, las negociaciones que se hagan deben estar bien fundamentadas y por períodos que garanticen la operatividad del proyecto, ya que existen casos en donde los proyectos se abandonan porque les cambian las reglas, dejándolo desamparado. Por otro lado, el precio de venta dependerá de la tarifa eléctrica que consuman los socios del proyecto.

Los costos de inversión, así como los de operación y mantenimiento son parámetros que pueden impactar en la rentabilidad económica del proyecto.

## Dimensionamiento del sistema de generación eléctrica

La producción del gas en el relleno depende de varios parámetros, los cuales se presentaron en el capítulo 2. La curva de generación de BGRS medida teóricamente con el modelo mexicano de biogás sirve de referencia, sin embargo, para proceder a diseñar un sistema de generación, el recurso debe evaluarse en campo. La evaluación del recurso es de primordial importancia en la prefactibilidad técnica, ya que de este valor se parte para determinar la capacidad instalada y de ahí se deriva la factibilidad económica.

## Aspectos económicos

En esta sección se aporta información sobre los pasos a seguir para llevar a cabo la evaluación económica financiera de proyectos de generación eléctrica usando gas de rellenos sanitarios.

Lo primero que debe hacerse es la evaluación económica preliminar, ante la alternativa de generar electricidad con gas de relleno sanitario. Esta primera estimación mostrará si el proyecto es adecuado y si tiene posibilidades de ser rentable. Existen herramientas de cálculo que pueden ser útiles en esta evaluación, como puede ser RETSCREEN [100] y LFGcost-Web (EPA) [101]. Si en este análisis el proyecto es viable se procede a llevar a cabo la evaluación

detallada, considerando costos específicos del proyecto reportados en cotizaciones, métodos de financiamiento específicos y tasas de interés.

Básicamente, la evaluación económica de un proyecto consiste en:

- Cuantificar los costos de inversión y O & M.
- Estimar las ventas de energía, los ingresos, incentivos, etc.
- Evaluar la factibilidad económica.
- Comparar con alternativas.
- Evaluar opciones de financiamiento.

## Costos de inversión y O & M

Los costos de inversión en un proyecto de generación eléctrica con biogás pueden incluir o no los costos de recolección de gas y los costos por el equipo para quema del gas que no se utilice. Dadas las condiciones de los rellenos sanitarios en México, este costo habrá que incluirlo dentro del análisis. Generalmente se excluyen esos costos, cuando se contemplan desde el diseño del relleno sanitario.

Los proyectos de inversión consideran la compra e instalación de equipos, los estudios de ingeniería, la instalación y puesta en marcha, y los gastos de operación y mantenimiento que cubren los gastos del proyecto generados anualmente. Los conceptos de que incurren en los costos del proyecto se relacionan a continuación, así como los parámetros que influyen en la economía del mismo. También se reportan en la tabla 5.3, los ran-

gos típicos para proyectos de generación eléctrica con las tecnologías más comunes.

### Costos de capital:

a) Costos del sistema de extracción de gas de relleno y del sistema de combustión

- construcción inicial.
- Pozos de extracción de gas.
- Tuberías colectoras principales y laterales.
- Equipo de bombeo de lixiviados.
- Manejo de condensado.
- Equipos de succión y de combustión (para el quemado).

Como referencia, el costo típico para el sistema de captación y quemado del gas en un campo de pozos de 40 acres (16 ha), diseñado para recolectar 600 ft<sup>3</sup>/min (17 m<sup>3</sup>/min), es de aproximadamente USD \$991,000 el cual es equivalente a USD \$24,000 por acre (USD\$59,300/ha). Este costo está reportado en el **manual de proyectos de desarrollo de LFGE de la EPA** de 2011 [102], a diferencia de lo que se reporta para el caso de Monterrey, Nuevo León en su tercera etapa [103], en el cual, para la extracción del biogás de alrededor de 40 ha, para una potencia de 4.24 MW, el costo reportado es de \$530,000 dólares. Para el relleno de Ciudad Juárez [104] con una potencia de 6.4 MW, el costo de captación del gas es de \$4.5 millones de dólares. Estos costos pueden ser tan variables como la cantidad de rellenos, ya que depende de las condiciones del relleno y de la cantidad de pozos que se instalen, entre otras variables.

b) Costos del proyecto de generación eléctrica

- Gestión del proyecto.
- Construcción de la planta obra (incluye tubería).
- Equipo de medición y registro de biogás.
- Equipo motogenerador que funciona con biogás.

- Subestación de la planta (interruptor principal, transformador elevador).
- Interconexión a red.
- Prueba de fuente.
- Ingeniería/contingencias.

### Costos anuales de O & M del sistema:

- Costos por materiales y partes.
- Reemplazo limitado de pozos y tubería.
- Mano de obra, utilidades.
- Costo de financiamiento.
- Impuestos y gastos administrativos.
- Otros costos vinculados con los procesos para gestión de venta de bonos de carbono, costos de inscripción, costos por monitoreo y verificación de la reducción de emisiones.

### Otros parámetros:

- Tasa de descuento (<12%).
- Vida útil (15 años).
- Valor de rescate (entre 20 y 30%).
- Factor de planta (90%).
- Potencia instalada (de acuerdo con la producción de gas).

**Tabla 5.3.** Costos típicos de tecnologías de generación eléctrica usando biogás de rellenos sanitarios.

Fuente :[102] *LFG Project Development Handbook, chapter 4*, (sitio web: <http://www.epa.gov/> )

| Tecnología                             | Rangos de capacidad óptima | Costos de capital típicos (USD/kW) | Costos de O&M típicos (USD/año) |
|----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Microturbina                           | < 1 MW                     | 5,500                              | \$380                           |
| Motor de combustión interna (pequeñas) | < 1 MW                     | 2,300 - 3,100                      | \$210                           |
| Motor de combustión interna (grandes)  | > 800 kW                   | 1,150-1,700                        | \$180                           |
| Turbinas de gas                        | > 3 MW                     | 1,400                              | \$130                           |

Dólares de 2010.

### Evaluación de los ingresos al proyecto por venta de electricidad y otros

Para cualquier proyecto de inversión, el precio de venta del producto es de fundamental importancia, ya que de éste depende su rentabilidad. En cualquier tipo de proyecto, el precio del producto se define en función de la oferta y la demanda, principalmente, porque hay otros factores que impactan en el precio. En México, el precio de la energía eléctrica está sujeto a esquemas tarifarios implementados por las instituciones competentes. Esta situación no da libertad a fijar el precio de la energía, ni por los egresos del proyecto, ni por la oferta y la demanda. Para implementar este tipo de proyectos, en otros muchos países se han aplicado esquemas de subsidios o planeamiento de financiamientos blandos, financiamientos a fondo perdido, pago especial por la energía renovable, ingresos adicionales por venta de bonos de carbono, etc.

Este tipo de sistemas de generación eléctrica puede implementarse para autoconsumo o para cogenerar, básicamente. Para ello, el precio de la energía que consuman los socios será el precio de la energía que entregue el sistema de generación con biogás. Con base en ello se calculan los ingresos de forma anual, durante la vida del proyecto. Para México, el incentivo adicional que están recibiendo estas tecnologías de generación es por la negociación de venta de bonos de carbono, por el equivalente a las emisiones evitadas por el metano generado en el relleno.

De igual forma en México, los socios que generalmente participan en este tipo proyectos son el municipio y empresas privadas. Esto implica tarifas de servicio de alumbrado público de bombeo y tarifas en media y alta tensión. Los precios de estas tarifas se pueden localizar en la página

de la CFE, en la sección de estadísticas [105]. Obviamente que el precio de la tarifa que paga el usuario a la CFE es el valor máximo que éste pagará al proyecto de generación con biogás. Las tarifas en alta tensión son horarias, por lo que para una evaluación más detallada se requiere del perfil de consumo del socio.

Para referencia del lector, la tabla 5.4 presenta las tarifas para servicios públicos (2011-2012). Las tarifas OM a H.MC son tarifas generales que se aplican en media tensión, de estas tarifas todas son horarias, excepto la OM.

Las tarifas OMF, HMF y HMCF son horarias en media tensión, con variantes en su aplicación.

### Evaluación de la factibilidad económica

Una vez que se cuente con los costos y los ingresos del proyecto, se procede a desarrollar la evaluación económica-financiera, la cual se puede realizar en programas financieros, tomando en cuenta los aspectos técnicos del sistema de generación. Se puede desarrollar una hoja cálculo en *Excel* que cuente con las funciones financieras necesarias para ello, y como ya se mencionó, hay



**Tabla 5.4.** Tarifas para servicios públicos (2011 - 2012).

| Consultar tarifas de: 2012  |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tarifa 5                    |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Cargos por energía (\$/kWh) |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Tensión                     | Dic./2011 | Ene.   | Feb.   | Mar.   | Abr.   | May.   | Jun.   | Jul.   | Ago.   | Sep.   | Oct.   | Nov.   | Dic.   |
| Media                       | 2.356     | 2.367  | 2.378  | 2.389  | 2.401  | 2.413  | 2.425  | 2.437  | 2.449  | 2.461  | 2.473  | 2.485  | 2.497  |
| Baja                        | 2.802     | 2.816  | 2.830  | 2.844  | 2.858  | 2.872  | 2.886  | 2.900  | 2.914  | 2.928  | 2.942  | 2.956  | 2.970  |
| Tarifa 5A                   |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Cargos por energía (\$/kWh) |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Tensión                     | Dic./2011 | Ene.   | Feb.   | Mar.   | Abr.   | May.   | Jun.   | Jul.   | Ago.   | Sep.   | Oct.   | Nov.   | Dic.   |
| Media                       | 1.946     | 1.955  | 1.964  | 1.973  | 1.983  | 1.993  | 2.003  | 2.013  | 2.023  | 2.033  | 2.043  | 2.053  | 2.063  |
| Baja                        | 2.317     | 2.328  | 2.339  | 2.350  | 2.361  | 2.372  | 2.383  | 2.395  | 2.407  | 2.419  | 2.431  | 2.443  | 2.455  |
| Tarifa 6                    |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Cargos                      |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Cargos                      | Dic./2011 | Ene.   | Feb.   | Mar.   | Abr.   | May.   | Jun.   | Jul.   | Ago.   | Sep.   | Oct.   | Nov.   | Dic.   |
| Fijo (\$)                   | 265.89    | 267.17 | 268.46 | 269.76 | 271.06 | 272.37 | 273.69 | 275.01 | 276.34 | 277.67 | 279.01 | 280.36 | 281.71 |
| Energía (\$/KWh)            | 1.461     | 1.468  | 1.475  | 1.482  | 1.489  | 1.496  | 1.503  | 1.510  | 1.517  | 1.524  | 1.531  | 1.538  |        |

*software* comercial como el RETSCREEN, u otros como el de la EPA LFGcost-Web (este último está limitado a socios).

Para la evaluación económica se determina el flujo de efectivo sobre una base anual, durante la vida del proyecto, a una tasa de descuento definida. Como referencia, para proyectos de generación eléctrica se considera de 10%, sin embargo, dependerá del tipo de proyecto y de los socios si consideran usar otro valor.

En los flujos de efectivo deben incluirse todas las consideraciones que implican al proyecto, como por ejemplo, los ingresos por negociación de bonos de carbono, así como los gastos administrativos y de gestión que implica la negociación misma.

Generalmente, el análisis se lleva a cabo en moneda constante, por lo que si existe un factor de escalamiento anual sobre el precio de las tarifas o sobre cualquier otro concepto, debe considerarse dentro de los flujos de efectivo del proyecto, para cuya evaluación también deben tomarse en cuenta las condiciones del financiamiento, período de préstamo, tasa de interés, impuestos, cargos moratorios, etc.

Los métodos más comunes para determinar la rentabilidad del proyecto son:

**Costo nivelado de generación (CNG):** Es un indicador económico que muestra el nivel de competitividad que tiene el proyecto ante diversas alternativas. A diferencia de los otros métodos de evaluación económica de proyectos, el costo nivelado sólo requiere conocer los gastos asociados y la producción de energía durante su vida de operación, no se necesita conocer sus ingresos. Es el método más usado en el ámbito energético. El CNG representa el precio mínimo de venta para que el proyecto sea rentable, aunque considerar un precio de venta menor que el valor obtenido del CNG implicará que el proyecto no tendrá sustentabilidad económica

**Tasa interna de retorno (TIR):** La tasa interna de rendimiento representa, en términos económicos, el porcentaje o la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, en cualquier punto del tiempo de la vida de un proyecto, el cual

será rentable si la TIR es mayor o por lo menos igual a la tasa de descuento con la que se evaluó el proyecto. Para que éste sea rentable, el valor de la TIR debe ser igual o mayor que la tasa de descuento considerada para evaluarlo.

**Valor presente neto (VPN):** El valor presente neto (VPN) de un flujo de efectivo consiste en determinar la equivalencia en el momento actual de los flujos de efectivo que se estén analizando a la tasa de descuento considerada *i*. El valor de VPN debe ser mayor que cero para que el proyecto se considere rentable.

**Período de recuperación (PR):** Es la cantidad de tiempo (en años) que requiere el proyecto para pagarse, cuanto más corto sea el tiempo es mejor. El período de recuperación descontado debe ser menor o igual al período de vida útil considerado para el proyecto.

**Relación beneficio costo (R B/C):** Este método se usa para expresar la diferencia neta entre los beneficios y costos de un proyecto de generación eléctrica, en función del valor presente neto. Si la relación beneficio costo de un proyecto es mayor o al menos igual a uno (1.0), el proyecto se considera rentable.

## Comparación de alternativas

Siempre es recomendable evaluar diversas alternativas tomando en cuenta, además de los conceptos económicos y técnicos, los sociales y los ambientales. Estos dos últimos tienen influencia positiva en proyectos de generación eléctrica en rellenos sanitarios, ya que al canalizar el gas a energía útil se está evitando un problema grave de contaminación y se obtienen beneficios económicos.

## Evaluación de opciones de financiamiento

Actualmente en México se cuenta con esquemas de financiamiento que pueden ser aplicables a este tipo de proyectos y que se describieron en el capítulo 4. BANOBRAS, NAFIN y BID, entre otras, son instituciones que pueden aportar financiamiento, al igual que la industria privada, que ha invertido en este tipo de proyectos, como es el caso de la planta en Aguascalientes. Cabe destacar que la evaluación de las opciones de financiamiento debe verse reflejada en la evaluación económica del proyecto. De existir diversas opciones de financiamiento, se seleccionará la que ofrezca mayor ventaja económica.

## Capítulo 6. Evaluación tecno-económica de proyectos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos a energía eléctrica

### Tecnologías para convertir residuos sólidos urbanos

Como ya se mencionó en el triángulo de gestión sustentable (figura 1.1, capítulo 1), las tecnologías de conversión térmica de los residuos sólidos urbanos (RSU) con recuperación de energía están catalogadas por arriba de las tecnologías de relleno sanitario, por las ventajas que aporta en términos de reducir el volumen de los residuos, liberar la necesidad de espacios en rellenos sanitarios hasta en un 90%, reducir el nivel de contaminación que conlleva el flujo de residuos, así como la recuperación de metales.

Las tecnologías de conversión térmica de RSU a energía se agrupan generalmente en dos categorías [véase capítulo 3]: combustión convencional y tratamiento térmico avanzado. Las primeras se refieren a la incineración *mass burn* e incineración de combustible pretratado RDF, siendo las más usadas a nivel mundial las de tipo *mass burn*. Las tecnologías de tratamiento térmico avanzado incluyen: gasificación, pirólisis y gasificación con arco de plasma.

El proceso de selección de la tecnología empieza con la evaluación de las opciones posibles, tomando en cuenta la cantidad y calidad de los residuos, el mercado de la energía, los aspectos ambientales y sociales locales, entre otros. En cuanto a la tecnología debe tomarse en cuenta el rendimiento térmico, la experiencia que tenga la tecnología a nivel internacional, sus costos de capital de operación y mantenimiento, nivel de desarrollo, etc.

Tomar la decisión de instalar una planta de incineración no es una tarea fácil, ya que el proceso es largo, del orden de cinco años en promedio, desde que se inician las discusiones hasta que se arranca la planta, e implica altos costos. Bajo esta situación, cuando se plantea la integración de una planta de conversión eléctrica al sistema de gestión de los RSU son necesarios argumentos bien fundamentados que abran la posibilidad de su aceptación. Para ello debe considerarse lo siguiente:

- Establecer un equipo con experiencia en el desarrollo de proyectos *WTE*.
- La evaluación de los beneficios del proyecto y su rentabilidad económica.
- La evaluación de las opciones tecnológicas disponibles y la

selección de los proveedores potenciales.

- Presentar un plan para el control de las emisiones gaseosas y el tratamiento de residuales sólidos y líquidos, de acuerdo con la normatividad ambiental federal y de la zona, así como su monitoreo.
- Cumplir con los permisos de las instancias competentes.
- La selección de emplazamiento final se basa en la evaluación técnica, económica y ambiental detallada.

### Factores que deben considerarse en el diseño de una planta de conversión de RSM a energía

En los capítulos 3 y 4 se hace un recuento detallado de los criterios para adoptar una tecnología de incineración con recuperación de energía y los riesgos que pueden presentarse durante su construcción y operación, que alteran la confiabilidad y rendimiento de la misma, los cuales se pueden resumir en:

- Disponibilidad de los residuos.
- Variación en el poder calorífico del residuo.
- Disponibilidad del mercado y el precio de la energía y de los subproductos.
- Las condiciones de las instalaciones del sitio.
- Cumplimiento de las normas ambientales (a corto y largo plazo).
- Tratamiento de residuos sólidos y líquidos, y disponibilidad para confinamiento.
- Estimación de costos y cronograma del proyecto.
- Problemas sociales internos durante la construcción y operación.

- Modificaciones en las leyes (federales, estatales, y locales).
- Impacto a largo plazo del medioambiente y riesgos para la salud.
- Circunstancias imprevistas (fuerza mayor).
- Rendimiento a largo plazo.

### Evaluación técnica de una planta de conversión de residuos a energía

La evaluación técnica que aquí se describe se refiere exclusivamente a la tecnología de incineración *mass burn* con recuperación de energía eléctrica.

La evaluación técnica de una planta de incineración de residuos con recuperación de energía consiste en desarrollar la ingeniería conceptual de la planta. Para ello es necesaria la información que se relaciona a continuación:

- Condiciones del sitio, temperatura media, altitud y humedad relativa.
- Cantidad firme de residuos disponibles.
- Muestreos periódicos en distintas estaciones del año para definir:
  - Características físicas de los RSU.
  - Análisis elemental y último de los RSU.
  - Poder calorífico del RSU.
- Condiciones de operación de la planta.
- Selección de los equipos que integran el tren de tratamiento (caldera de parrilla, equipo de limpieza del gas de combustión, sistema de enfriamiento para el ciclo de vapor de la turbina de vapor, entre otros).
- Espacios disponibles.
- Ubicación con respecto a líneas de transmisión.

Esta información es básica para determinar el balance termodinámico del sistema de generación. Con esta evaluación se determina la capacidad de la planta, el rendimiento de los diversos equipos y el global, así como las condiciones de operación de todo proceso.

Para la determinación de los conceptos de la ingeniería básica se requiere conocer los balances de masa y energía de todos los procesos llevados a cabo en la planta. Esta tarea suele realizarse con ayuda de *software* especializado, ya que es sumamente complejo hacer el cálculo de forma manual. Thermoflow® es un paquete de

*software* especializado en donde se integran esquemas de plantas de generación eléctrica complejas, que incluye módulos para la simulación de plantas WTE. Este *software* dimensiona los equipos principales y los de apoyo, entre los que se incluyen: sistemas de seguridad, arreglos de tubería e instrumentación, bombas, calentadores, ventiladores, sistemas de limpieza de gases, entre otros. Además cuenta con bases de datos de equipos ofertados por el mercado de proveedores actualizadas anualmente. El paquete de *software* entrega resultados para el planteamiento de ingeniería conceptual y básica de plantas de generación. Sin embargo, para algunos procesos se requiere del uso de otras herramientas o metodologías para llevar a cabo cálculos más precisos y adecuados al caso específico, como los balances de masa y energía de sistemas de control de emisiones. Aquí es importante señalar la importancia de delimitar las capacidades de los paquetes de cálculo y considerar la experiencia y capacidad del equipo consultor dedicado a esta tarea.

Con la información de la ingeniería básica se determinan los términos de referencia para su posterior licitación, la cual dependerá de la modalidad de generación que más convenga y de los esquemas de negocio planteados.

Generalmente, la eficiencia que ofrecen los sistemas de generación eléctrica tipo *mass burn* es del orden del 25% al 28%.

Otros factores que deben revisarse en el estudio de factibilidad son los siguientes:

- Cómo se integra el proceso de incineración en el esquema de gestión local de RSU, en cuanto a revisión de las

prácticas actuales y a la modificación de éstas. Especialmente en términos de procesos de reciclaje y compostaje de RSU previos a su incineración.

- Considerar tendencias y realizar un pronóstico sobre crecimiento o disminución de la disponibilidad de residuales.
- Considerar la incorporación de residuales de manejo especial (residuales industriales).
- Contemplar el factor de crecimiento de la demanda eléctrica en los usuarios.
- Plantear quién comprará la energía en el período de vida del proyecto.
- Definir el precio de venta de la energía.
- Identificar los apoyos políticos y de las autoridades competentes en materia regulatoria hacia el proyecto.

### Esquemas de negocio

Un aspecto muy importante en un proyecto de inversión es el planteamiento de los esquemas de negocio posibles. Debe quedar fundamentado, sobre todo para las consideraciones económicas y también técnicas, quién se hará cargo del proyecto.

La planta puede ser operada por empleados públicos o por contratistas privados. Para cubrir este aspecto debe considerarse lo siguiente:

El personal que se ocupe de la planta debe contar con un mínimo de conocimientos, para poder enfrentar y superar con éxito las variantes que puedan ocurrir durante la operación de la planta.

Si la planta se administra por el municipio, éste gozará de todos los beneficios económicos y del suministro eléctrico que ofrece la planta.

### Aspectos económicos

La evaluación económica y financiera de proyectos de conversión de residuos a energía (plantas de incineración) implica los mismos conceptos básicos que para la evaluación de rellenos sanitarios, así como la misma metodología. La diferencia se enfoca en el momento de cuantificar los costos de inversión, así como los de operación y mantenimiento, al igual que otros parámetros como es el concepto del *tipping fee* (tarifa de confinamiento) que aporta al municipio por costos evitados de disposición de sus residuos.

La evaluación económica preliminar de un proyecto de inversión proporciona la información suficiente para desistir o continuar con las gestiones para implementar el proyecto que se plantea. Si en este análisis preliminar el proyecto es viable se procede con las gestiones y estudios con más detalle.

El cálculo de la evaluación económica puede hacerse con herramientas comerciales o apoyarse con hojas de cálculo elaboradas en *Excel*, el cual cuenta con las funciones financieras suficientes para evaluar la rentabilidad de un proyecto.

La información necesaria para llevar a cabo la evaluación se engloba en los siguientes rubros:

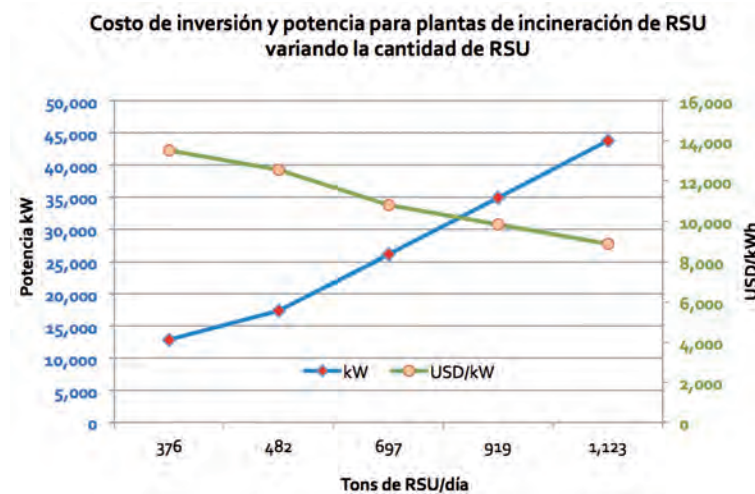
- Cuantificar los costos de inversión y O & M.
- Definir los parámetros base, tales como vida útil, tasa de descuento, tarifa de confinamiento, bonos de carbono, precio de venta de la electricidad y otros.
- Determinar los ingresos al proyecto en función de las ventas de la energía, así como de ingresos adicionales que le aplique.
- Evaluar la factibilidad económica, incluyendo un análisis de sensibilidad sobre las variables de mayor incertidumbre.
- Comparar alternativas.
- Evaluar opciones de financiamiento.



## Costos de inversión y O & M

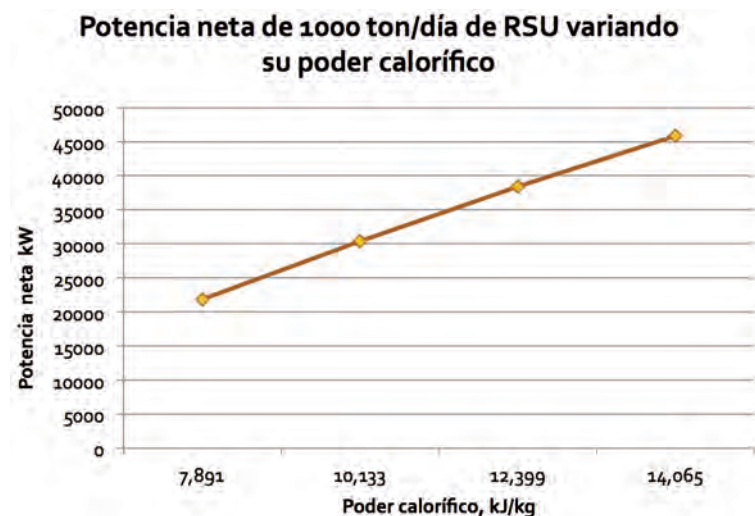
### Costos de inversión

La tecnología de incineración de RSU con recuperación de energía ha seguido un proceso de ajustes en el equipamiento necesario para cumplir con una normatividad en materia de emisiones cada vez más exigente. Estos ajustes se traducen en mayores costos de inversión, dejando a la tecnología en una situación apretada en lo que se refiere a sus índices de rentabilidad.



**Figura 6.1. Costos de inversión para plantas de incineración variando la cantidad de RSU.**

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.



**Figura 6.2. Variación de la potencia neta de una planta de 1000 ton/día con el poder calorífico del RSU.**

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Por la naturaleza y el origen de los RSU, su poder calorífico es muy sensible a la capacidad y potencia de la instalación, condición que impacta mucho en el costo de inversión de la planta. La economía de escala referente a la capacidad y distribución de trenes de incineración y turbogenerador es otro factor que impacta fuertemente en los costos de inversión de ésta.

Los costos de inversión para estas plantas son del orden de los 8,500 a 14,000 dólares/kW. En la actualidad es posible el acceso a estos indicadores en fuentes confiables de instituciones internacionales como la EPA (Environmental Protection Agency), la Unión Europea, la IEA (International Energy Agency), así como de firmas consultoras especializadas en el tema, entre otros. En la figura 6.1 se reportan curvas de costos de inversión de plantas, en función de la cantidad de residuos a procesar por día, así como la tendencia de incremento de la potencia con respecto al flujo de alimentación de RSU con un poder calorífico inferior de 12,399 kJ/kg. Por otra parte, la figura 6.2 ejemplifica el rango de variación de la potencia eléctrica neta entregada por una planta de 1,000 ton/día, ante una variación en el poder calorífico del RSU.

Por otro lado, la tabla 6.1 muestra los conceptos de inversión para una planta de incineración.

### Costos anuales de O & M del sistema

Los gastos de operación y mantenimiento que cubren los gastos generados anualmente del proyecto son los siguientes:

- Costos fijos
- Costos de administración y salarios

**Tabla 6.1.** Conceptos de inversión para una planta de incineración de RSU con recuperación de energía.

|                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Equipo principal</b>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• caldera de parrilla</li> <li>• turbina de vapor</li> <li>• sistema de calentamiento de agua: calentadores y deareador</li> <li>• sistema de enfriamiento: aerocondensador o torre húmeda u algún otro medio</li> <li>• condensador</li> <li>• sistema de limpieza de gases: reductor catalítico selectivo (control de NOx), desulfurador (control de SOx) y filtro de mangas (control de partículas), sistema de monitoreo continuo de emisiones</li> <li>• chimenea</li> <li>• sistema de control distribuido</li> <li>• equipo de transmisión y generación de voltaje</li> </ul> |
| <b>Equipo auxiliar</b>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• bombas</li> <li>• motores</li> <li>• tanques</li> <li>• intercambiadores de calor auxiliares</li> <li>• manejo de ceniza</li> <li>• manejo de combustible</li> <li>• instrumentación general de la planta</li> <li>• equipo en bajo y medio voltaje</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Obra civil</b>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• acondicionamiento del terreno</li> <li>• excavación y relleno</li> <li>• manejo de obras de concreto</li> <li>• caminos y estacionamientos</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Obra mecánica</b>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• transporte y aparejos en sitio</li> <li>• armado y montaje de equipos</li> <li>• tubería</li> <li>• escaleras, pasillos, plataformas, etc.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Obra eléctrica</b>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• controles</li> <li>• armado y cableado</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Edificios y estructuras</b>                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Estudios de ingeniería y puesta en marcha</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Costos indirectos del contratista</b>         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Costos indirectos del dueño</b>               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

- Costos variables
  - Costos por insumos
  - Costos de manejo y desecho de agua
  - Costos por disposición de residuos
- Costos de mantenimiento
  - Costos para mantener la maquinaria (materiales y partes)
  - Costos para mantener los edificios
- Impuestos y gastos administrativos
- **Otros costos** vinculados con los procesos para gestión de venta de bonos de carbono, costos de inscripción, costos por monitoreo y verificación de la reducción de emisiones.

#### Otros parámetros

- Tasa de descuento ( <10% )
- Vida útil (25 años)
- Valor de rescate nulo
- Factor de planta (90%)
- Potencia instalada (de acuerdo con la cantidad y calidad de los RSU)
- Tarifa de confinamiento (125 a 250 pesos mex/ ton de RSU)

### Ingresos del proyecto

Los ingresos del proyecto estarán en función del precio de venta de la energía. El precio por kWh vendido es de vital importancia, ya que de éste depende la rentabilidad del proyecto. En México, este precio se define en función de la tarifa que pague el usuario o socio que consumirá la energía, con un precio menor al pagado a la CFE. Este margen es aproximadamente del 10%. En otros países como Estados Unidos, Alemania, Japón, España, Italia, entre otros, se otorgan esquemas de subsidio o financiamientos blandos que favorecen la rentabilidad del proyecto.

### Evaluación de la factibilidad económica

Con los costos e ingresos que se incurren en el proyecto se forman los flujos de efectivo del mismo, los cuales serán la base para el cálculo de los indicadores de rentabilidad. Estos flujos se determinan en base anual durante el período de vida útil de la planta, a una tasa

de descuento definida. Como referencia, el valor de la tasa de descuento para proyectos de generación eléctrica se considera del 10%, aunque no es fija, ya que dependerá de lo que esperan los socios del proyecto. En los flujos de efectivo deben incluirse todas las consideraciones que impactan al proyecto, como por ejemplo, los ingresos por tarifa de confinamiento y bonos de carbono, así como los gastos administrativos y de gestión que implica la negociación misma.

La metodología de evaluación es la misma que se usa para evaluar cualquier proyecto de inversión, y los indicadores a determinar son reconocidos internacionalmente. El cálculo de estos indicadores puede realizarse con calculadoras financieras o directamente en Excel, en una hoja previamente elaborada con la información del proyecto.

Generalmente, el análisis se lleva a cabo en moneda constante, por lo que si existe un factor de escalamiento anual sobre el precio de las tarifas o sobre cualquier otro concepto, debe considerarse dentro de los flujos de efectivo del proyecto, en cuya evaluación deben considerarse las condiciones del financiamiento, período de préstamo, tasa de interés, impuestos, cargos moratorios y otros especificados por las instituciones crediticias.

Los métodos más comunes para determinar la rentabilidad de proyecto son los siguientes:

**Costo nivelado de generación (CNG):** El costo nivelado es un indicador económico que muestra el nivel de competitividad que tiene el proyecto ante diversas alternativas. A diferencia de los otros métodos de evaluación económica de proyectos, el costo nivelado sólo requiere conocer los gastos asociados y la producción de energía durante su vida de

operación, no se necesita conocer sus ingresos. Es el método más usado en el ámbito energético.

**Tasa interna de retorno (TIR):** La tasa interna de rendimiento representa, en términos económicos, el porcentaje o la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, en cualquier punto del tiempo de la vida de un proyecto, el cual será rentable si la TIR es mayor o por lo menos igual a la tasa de descuento con la que se evalúo el proyecto.

**Valor presente neto (VPN):** Consiste en determinar la equivalencia en el momento actual de los flujos de efectivo que se estén analizando, a la tasa de descuento considerada i.

**Período de recuperación (PR):** Es la cantidad de tiempo (en años) que requiere el proyecto para pagarse, cuanto más corto sea el periodo es mejor.

**Anualidad equivalente (AE):** Los ingresos totales del proyecto menos los gastos, incluidos los de operación y mantenimiento, así como los costos de amortización de capital. Es el ingreso equivalente del proyecto generado en un año.

## Comparación de alternativas

Ésta siempre es necesaria cuando se evalúan proyectos de inversión. Dada la naturaleza de los combustibles y el alto costo de los equipos de limpieza que se integran en este tipo de plantas, en los estudios se deben recalcar los efectos ambientales que se reducen al evitar la disposición de los RSM en rellenos sanitarios.

También se debe hacer hincapié en que este tipo de plantas se están instalando en lugares que ya no disponen de espacio para el confinamiento de los residuos y que su instalación da solución a un problema agudo de las zonas urbanas, por lo que se deduce que no se esperan rendimientos altos para tomar la decisión de su instalación.

## Evaluación de opciones de financiamiento

Se aplican los mismos esquemas de financiamiento que para los rellenos sanitarios. En el país, las instituciones que puedan plantear esquemas de financiamiento para estas plantas de generación están descritas en el capítulo 4. La industria privada también puede tener

participación para invertir en ello. La evaluación de las opciones de financiamiento debe verse reflejada en la evaluación económica del proyecto. De existir opciones de financiamiento diversas, se seleccionará la que ofrezca mayor ventaja económica al mismo.

## Capítulo 7. Ejemplos de instalaciones en el país

### Relleno sanitario del municipio de Salinas Victoria, N.L.

Bioenergía de Nuevo León, S. A. de C. V. (BENLESA) desarrolló el primer proyecto en México y Latinoamérica de energía renovable, utilizando como combustible el biogás generado por el relleno sanitario del municipio de Salinas Victoria, Nuevo León, el cual es propiedad estatal [106, 107].

BENLESA es el producto de la alianza estratégica entre el Gobierno del Estado de Nuevo León, a través del Sistema para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIMEPRODE) y las empresas privadas Bioeléctrica de Monterrey, S. A. de C. V., empresa subsidiaria de Sistemas de Energía Internacional, S.A. de C. V. (SEISA).

La planta se inauguró en 2003 con una capacidad de 7.42 MW, con una inversión privada de 5.7 millones de dólares y un donativo del Banco Mundial de 5.1 millones de dólares. Actualmente ha ampliado su capacidad instalada bruta de generación a 16.96 MW (neta 16.0 MW), la cual se utiliza para el alumbrado público de los municipios del área metropolitana, edificios del Gobierno del Estado, Servicios de Agua, Drenaje de Monterrey, Paseo Santa Lucía, DIF y otras oficinas de gobierno, así como las líneas I y II del Metro.

La instalación del relleno sanitario cubre un área de 212 Ha, 140 de las cuales cuentan con una red de captación de biogás, cuya composición es de aproximadamente 55% metano y 45% CO<sub>2</sub>. El paquete de generación cuenta con 16 motores de combustión interna de 1.06 MW marca GE Jenbacher, modelo JGC 320 GS-L.L.

El principal beneficio económico para las dependencias que toman la energía consiste en un ahorro del 10% en su facturación eléctrica. Para ello se estableció una Sociedad de Propósito Específico con dependencias que se benefician del permiso de cogeneración No. E/217/COG/2002, por parte de la Comisión Reguladora de Energía (CRE). El título del permiso se ha modificado a través de los años, para incluir la ampliación de la capacidad de generación e incorporar nuevos socios.

Dado que las tarifas eléctricas de alumbrado público son las más altas,

la energía eléctrica generada durante la noche es aprovechada para estos fines, utilizando para esto la red del sistema eléctrico nacional de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Durante el día, la energía es utilizada para satisfacer necesidades de energía del resto de los socios.

Hay beneficios ambientales importantes, especialmente por el abatimiento de gases de efecto de invernadero. En mayo de 2007, el Banco Mundial firmó con BENLESA un contrato de reducción de emisiones equivalentes a 1,000,000 de toneladas de CO<sub>2</sub> por el proyecto de ampliación, lo cual equivale a retirar 90 mil automóviles de circulación. El Gobierno de Dinamarca, a través del *Danish Carbon Fund*, es el comprador de los bonos de carbón, con lo que BENLESA está amortizando la inversión realizada. En total, con la ampliación de la capacidad neta a 16 MW, se podrán abatir 530,000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, equivalentes a retirar 200,000 automóviles de circulación.

La planta se diseñó para operar durante los próximos 25 a 30 años, dependiendo de la vida del relleno sanitario con un esquema modular, de manera que los equipos se pueden remover e instalar en otras locaciones según se requiera.

Las figuras 7.1 y 7.2 muestran una fotografía de la instalación y un diagrama esquemático del proceso, respectivamente.

### Relleno sanitario de San Nicolás, Aguascalientes [108]

Como un proyecto para sustituir el basurero de Cumbres, el municipio de Aguascalientes





**Figura 7.1. Fotografía del paquete de generación (cortesía BENLESA).**



**Figura 7.2. Representación gráfica del proceso (cortesía BENLESA).**

inició la operación del relleno sanitario de San Nicolás en 1998, una primera celda para confinamiento de RSU, especificada para cumplir con la norma NOM 083-94.

Durante los primeros años de operación se vio la factibilidad de registrar el proyecto ante el Mecanismo de Desarrollo Limpio, el cual inició a partir de la firma del Protocolo de Kioto en 1997, y es así que surgen los primeros acercamientos de las empresas *Biogas Technology* y *ENER-G Natural Power* con el municipio para proyectar, en una primera etapa, la destrucción de la molécula  $\text{CH}_4$  contenida en el biogás mediante su quema, obteniendo beneficios por la venta de bonos de carbono, y en una segunda etapa la generación de electricidad. Las negociaciones para la primera etapa cristalizaron en 2006, con el registro del primer proyecto mexicano ante el MDL.

Actualmente, el relleno sanitario cuenta con cinco celdas de confinamiento, cuatro de las cuales ya están cerradas y sólo se mantiene una de ellas en operación. El municipio es dueño de todo el terreno y se encarga de los trabajos de clausura de las celdas, manejar lixi-

viados, y darle la cobertura y mantenimiento diario. Por otro lado, las empresas *Biogas Technology* y *ENER-G Natural Power* han puesto el 100% del capital de inversión para hacer el registro ante el MDL, sistema de captura de gas, fabricación e instalación de los quemadores y la construcción de la planta de generación eléctrica. Se tiene firmado un contrato, avalado por el cabildo y el congreso estatal por 20 años, para la operación, mantenimiento, producción de electricidad y derechos del gas. De acuerdo al contrato, el municipio de Aguascalientes recibe una regalía de las utilidades logradas tanto por venta de bonos de carbono, como por la generación de energía verde y a la fecha, ha recibido más de 1.7 millones de dólares. Al 31 de agosto de 2011 se han generado y certificado 400,536 bonos.

El proyecto de generación eléctrica surgió hasta 2009, año en que se tramitaron los permisos ante la CRE, la interconexión con la CFE y los convenios para el porteo de electricidad a la planta de NISSAN en Aguascalientes, empresa asociada junto con el municipio de Aguascalientes y *ENER-G Natural Power* en la “Sociedad de Autoabastecimiento de Energía Verde de Aguascalientes”, y que actualmente toma el 100% de la generación eléctrica para su planta de fabricación de automóviles. En dicha empresa no sólo se obtiene el beneficio de publicitar la manufactura de vehículos con energía verde, sino que también se generan ahorros.

El paquete generador consta de dos motogeneradores Caterpillar de 1.35 MW cada uno, para un total de 2.7 MW. La inversión aproximada ha sido de \$7.0 MDD, y se cuenta ya con la infraestructura para conectar un tercer generador. Se espera que los 2.7 MW pro-



**Figura 7.3. Fotografía del área de tratamiento de biogás y generación eléctrica (cortesía ENER-G Natural Power).**

duzcan 90,000 bonos de carbono anuales. Actualmente se certifica la reducción de emisiones y se obtienen beneficios económicos en efectivo para el municipio de Aguascalientes que han dado sustentabilidad a este proyecto. Las figuras 7.3 y 7.4 muestran fotografías de la instalación.

### **Relleno sanitario de Ciudad Juárez, Chihuahua [109]**

El relleno sanitario de Ciudad Juárez fue abierto en 1994. Cuenta con una macrocelda de 32 Ha con 30 m de profundidad, en la que se han confinado aproximadamente 10 millones de toneladas de RSU.

Las empresas involucradas en el proyecto son Gases de Metano (subsidiaria de Biogás de Juárez), encargada de la extracción de gas metano; Transformadora de Energía Eléctrica de Juárez (también subsidiaria de Biogás de Juárez), encargada de la generación y venta de energía eléctrica, y la Comisión Federal de Electricidad

La instalación se concluyó en abril de 2007, obteniéndose el registro ante el MDL en noviembre de ese mismo año, y se comenzaron a generar bonos de carbono bajo el protocolo de Kioto a partir de 1 de diciembre del mismo año.

La instalación cuenta con tres unidades CATERPILLAR G3520C con una capacidad de 4.5MW, comenzando operaciones el 15 de junio de 2011, para cubrir necesidades de autoabastecimiento y alumbrado público municipal de Ciudad Juárez y Nuevo Casas Grandes, Chihuahua.



**Figura 7.4. Cabezal de captación de biogás en el relleno sanitario.**

A la fecha se ha realizado una inversión de 220 millones de pesos y se tenía contemplada una futura ampliación de la planta con una capacidad de generación adicional de 3.5 MW. Las figuras 7.5 y 7.6 ilustran la instalación.



**Figura 7.5. Fotografía de la instalación (cortesía Biogás de Juárez).**



**Figura 7.6. Fotografía de los motogeneradores (cortesía Biogás de Juárez).**

## Fuentes

- [1] SEMARNAT. Base de datos estadísticos BADESNIARN 2012.
- [2] The Municipal Solid Waste “Crisis” in Retrospect: A Success Story for Market-Based Mechanisms. Peter S. Menell. Twenty Years of Market-Based Instruments for Environmental Protection: Has the Promise Been Realized?, Donald Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, August 23-24, 2003 (U.C. Berkeley).
- [3] Municipal Solid Waste Management in Third World Cities: Lessons learned and a proposal for improvement. M. Medina. Human Settlement Development Vol III. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Developed under the Auspices of the UNESCO. EOLSS Online.
- [4] Italian “Triangle of death” linked to waste crisis. Kathryn Senior and Alfredo Mazza. The Lancet Journal. Volume 5, No. 9. 1/sept/2004.
- [5] Federal Department of Foreign Affairs. Presence Switzerland.
- <http://www.swissworld.org/en/environment/wastemanagement/landfills/>.
- [6] Landfill Bans: Handle with care. David Burrows. Waste Management World. Volume 12, Issue 1. 01/03/2011
- [7] Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. European Commission August 2006.
- [8] Waste to Energy Facilities to Receive 10 Cents/kWh in China. Waste Management World. 11 April 2012. link
- [9] Megacities. Waste Management World. March-April 2012.
- [10] Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive). European Commission. 2008.
- [11] Manual para determinar la Factibilidad de Reducción y Reuso de Residuos Sólidos Municipales Secretaría de Desarrollo Social. Link
- [12] SEMARNAT. Base de datos estadísticos BADESNIARN 2012.
- [13] Instituto de Investigaciones Eléctricas. Informes bajo el convenio CFE/I/SC/13294. Estudios sobre la factibilidad técnica y económica de generación de electricidad vía incineración de basura municipal en los estados de Puebla, Morelos, Guanajuato, Valle de Mexicali y la Ciudad de Morelia. 2008.
- [14] Norma Mexicana NMX-AA-015-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo -Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo. Gestión Ambiental Mexicana. Cultura Ecológica, A.C. Fecha de aprobación y publicación: Marzo 18, 1985.
- [15] Norma Mexicana NMX-AA-022-1985 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo Residuos Sólidos Municipales - Selección y Cuantificación de Subproductos. Gestión Ambiental Mexicana. Cultura Ecológica, A.C. Fecha de aprobación y publicación: Marzo 18, 1985.
- [16] Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Última Reforma DOF 30-05-2012.
- [17] Reglamento de la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Última Reforma DOF 30-11-2006.
- [18] Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2013-2018. SEMARNAT.
- [19] NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Diario Oficial, 20 Octubre 2004.
- [20] NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental - Incineración de Residuos, Especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Diario Oficial, 1 Octubre 2004.



- [21] NOM-085-SEMARNAT-2011. Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición. Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión. Diario Oficial, 02 Febrero 2012.
- [22] PROYECTO de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, Diario Oficial de la Federación 03/09/2009.
- [23] NOM-001-SEMARNAT-1996 Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 6 Enero 1997.
- [24] Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. Diario Oficial de la Federación 28/11/2008. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAERFTE.pdf>
- [25] Solid Waste Management (Volume II: Regional Overviews and Information Sources). CalRecovery, Inc. y UNEP International Environmental Technology Centre (IETC). December 2005
- [26] Guía para el Aprovechamiento o Quema del Biogás en Rellenos Sanitarios. Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América - Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza México - USA (COCEF) - Asociación Internacional de Administración de Ciudades y Condados (ICMA)-Latinoamérica. 2011.
- [27] ¿Quién gana con la basura?. Partido Verde. Mayo 16, 2011 <http://www.partidoverde.org.mx/pvem/2011/05/%c2%bfquien-gana-con-la-basura-partido-verde/>
- [28] Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas 1998. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- [29] United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/2860.php>
- [30] Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. Anabell Rosas Domínguez. Instituto Nacional de Ecología. Gaceta Ecológica 66. 2003.
- [31] Exige PVEM frenar la instalación de incineradoras de basura en México. Boletín 150/08. Sitio Oficial del Partido Verde Ecologista de México. 19/11/2008. link
- [32] Operan 53 incineradores de residuos peligrosos en México, Denuncia Greenpeace. Boletín informativo No a la incineración. 06/09/2006. link
- [33] IIE. Información recopilada de comunicaciones verbales a través de interacción con personal relacionado con el tema de rellenos sanitarios.
- [34] Portal Latinoamericano de Residuos Sólidos. Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRESOL). <http://www.giresol.org/>.
- [35] Alternativas de Rellenos Sanitarios. - Guía de toma de decisión. Manfred van Afferden, Anne Hansen, Orlando Quintero, Luis Angel Barrera Morteo, Verguinia Petkova, Mintcho Iliev, Sandra Spies, Günther Wehenpohl. Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (Agencia de Cooperación Técnica Alemana) y Gobierno del Estado de México Secretaría de Ecología Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos. Noviembre 2002.
- [36] Guía para el Desarrollo, Presentación y Evaluación de Proyectos Ejecutivos para Rellenos Sanitarios. Claudia P. Hernández Barrios, Günther Wehenpohl, Jorge Sánchez Gómez, Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (Agencia de Cooperación Técnica Alemana) y Gobierno del Estado de México Secretaría de Ecología Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos, 2003.
- [37] Guía para la elaboración de programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Günther Wehenpohl, GTZ, Claudia Patricia Hernández Barrios, Consultora de la GTZ. SEMARNAT – GTZ. 2006. ISBN: 970-9983-01-6



- [38] Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. José Antonio Medina Roos. Isabel Jiménez Yanes. SEMARNAT. Dic. 2001. ISBN: 968-817-498-X.
- [39] Guía para la Licitación y Concesión de Obras y Servicios en la Gestión Integral de Residuos Sólidos en México. Waldo Toledo Soto, Pablo Heredia Cantillana, Marcos Rodríguez Salinas. SEMARNAT - GTZ. Abril de 2007.
- [40] Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues George Tchobanoglous, Hilary Theisen and Samuel Vigil. Editorial. McGraw-Hill (January 1, 1993).
- [41] Energy Information Administration. Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2003. Comparison of global warming potentials from the IPCC's second and third assessment reports; <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrrpt/global.html>
- [42] Methane Generation in Landfills Nickolas Themelis and Priscilla Ulloa, Renewable Energy 32 (2007) 1243–1257.
- [43] Landfill Gas Energy Project Development. United States Environmental Protection Agency. EPA430-F-02-011. May 2002.
- [44] Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook. EPA 430-B-96-0004. September 1996.
- [45] Interactive Conversion Tool. Landfill Methane Outreach Program. EPA. Link.
- [46] LFG Energy Project Development Handbook. Chapter 1. Landfill Gas Energy Basics, EPA. Link.
- [47] Method 2E - Landfill Gas Production Flow Rate. US Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttn/emc/methods/method2e.html>.
- [48] Mexico Landfill Gas Model 2.0 [Modelo de Biogás Mexicano 2.0]. Environmental Protection Agency.
- [49] USEPA. International Landfill Models. <http://www.epa.gov/lmop/international/tools.html#a04>.
- [50] Landfill Gas Energy. A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs USEPA 2012.
- [51] USEPA. Wastes. Basic Information <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/wte/basic.htm>
- [52] Waste-to-Energy Facilities Provide Significant Economic Benefits. White Paper. The Solid Waste Association of North America (SWANA). January 9, 2012. Link.
- [53] Positioning WTE for Growth in the U.S. – An International Perspective –Mark Weidman. Ponencia presentada en NAWTEC 2012. Portland, Ma. April 2012.
- [54] CURRENT STATUS OF GLOBAL WTE. Nickolas J. Themelis. Proceedings of the 20th Annual North American Waste-to-Energy Conference. NAWTEC20-7061. April 23-25, 2012, Portland, Maine, USA
- [55] Waste-to-Energy using Refuse-Derived Fuel. Floyd Hasselriis, Patrick F. Mahoney. Capítulo de libro a publicarse 2012.
- [56] STEAM. Waste to Energy Installations. Chapter 29. The Babcock & Wilcox Company. 41<sup>st</sup> Edition 2011.
- [57] Fuel for the Fire. Harvey Gershman. Waste 360. March 18, 2010. Link
- [58] The resurgence of Waste to Energy and Conversion Technologies: Where's the risk. Harvey Gershman. Waste Advantage Magazine. Vol. 1 No. 12. December 2010.
- [59] Prevención y Control Integrado de la Contaminación (IPPC). Documento de Referencia sobre Mejores Técnicas Disponibles para Incineración de Residuos. Comisión Europea. Agosto de 2006.
- [60] WASTE TO ENERGY. A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices. Prepared by Stantec Consulting for Environmental Quality Branch. March 2011.
- [61] Energy from Waste: A good practice guide. The Chartered Institution of Wastes Management. ISBN: 0-902944-54-1. Nov. 2003.

- [62] Meeting the Future: Evaluating the Potential of Waste Processing Technologies to Contribute to the Solid Waste Authority's System (A White Paper). Gershman, Brickner & Bratton, Inc. September 2, 2009.
- [63] Municipal solid waste to energy conversion processes. Economic, technical, and renewable comparisons. Gary C. Young. Wiley 2010. ISBN 978-0-470-53967-5.
- [64] Advanced Conversion Technologies. Bettina Kamuk, Ramboll Waste-to-Energy. Ponencia presentada en NAWTEC 2012. Portland, Ma. April 2012.
- [65] St. Lucie officials decide to terminate Geoplasma contract. Laurie K Blanford. TCPalm. April 17 2012. Link
- [66] Tecnología de Arco de Plasma para Residuos Sólidos Urbanos: ¿Una tecnología probada o una incineradora camuflada? ¿Estará protegida la salud y el medio ambiente de Florida? Greenactivon for Health and Environmental Justice Global Alliance for Incinerators Alternatives. 10 de Marzo de 2008.link
- [67] 50 MW Plasma Gasification Plant to be the First of Many in UK. Waste Management World. August 2012. Link
- [68] Anaerobic Digestion: The Waste Conversion Technology profile. 1st Annual Anaerobic Digestion Conference and Expo 16th-17th May 2012.
- [69] Memorándum informativo "Emissions from Large and Small MWC Units at MACT Compliance. Aug 10, 2007. Office of Air Quality Planning and Standards. EPA.
- [70] NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental - Incineración de Residuos, Especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Diario Oficial, 1 Octubre 2004.
- [71] The Impact on Health of Emissions to Air from Municipal Waste Incinerators. United Kingdom Health Protection Agency. September 2009.
- [72] Comparison of Air Emissions from Waste-to-Energy Facilities to Fossil Fuel Power Plants. SWANA, September 2006. Prepared for: SWANA Applied Research Foundation Year 5 Waste-To-Energy Group Subscribers link
- [73] Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste Incineration. The World Bank. 1999. Washington, D.C.
- [74] Estudio de Factibilidad Técnico Económico para Generación de Energía Eléctrica a Partir de la Basura. Ing. José Luis Arvizu Fernández, M. en C. María Consolación Medrano Vaca, Dr. Hipólito Romero Tehuitzil, Dr. Jorge M. Huacuz Villamar. IIE/01/14/12844/I 001/04F/DC. Enero 2006.
- [75] Breaking Ground for a New 3,000 Ton per Day Waste To Energy Facility. Raymond Schauer y Leah K. Richter. Proceedings of the 20<sup>th</sup> Annual North American Waste-to-Energy Conference NAWTEC20-7040. Portland, Ma. April 2012.
- [76] EFW Project –Principles of the Municipal Procurement for the EFW Facility in Durham Region. Matthew L. Gaskell, Mirka Januszkiewicz. NAWTEC19-May 17, 2011
- [77] Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de diciembre de 1975. TEXTO VIGENTE: Última reforma publicada DOF 01-06-2011
- [78] Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 31 de mayo de 1993. TEXTO VIGENTE: Última reforma publicada DOF 24-08-2012.
- [79] Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook. EPA 430-B-96-0004. September 1996
- [80] Trámites principales para el desarrollo de proyectos a partir de fuentes renovables de energía. Portal *web* de la Comisión Reguladora de Energía, Agosto 2012.
- [81] Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988. Texto vigente: Última reforma publicada DOF 04-06-2012. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>
- [82] Portal de trámites SEMARNAT. [http://tramites.semarnat.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=126](http://tramites.semarnat.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=126)

- [83] Portal de Trámites y Servicios CONAGUA. <http://www.conagua.gob.mx/Default.aspx>
- [84] Portal de la CRE. Sección de Electricidad. [http://www.cre.gob.mx/pagina\\_a.aspx?id=23](http://www.cre.gob.mx/pagina_a.aspx?id=23)
- [85] Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE). Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre de 2008. TEXTO VIGENTE: Última reforma publicada DOF 12-01-2012.
- [86] Guía para el Desarrollo de Proyectos de Generación de Electricidad con Energía Renovable en y para Los Municipios. Odón de Buen. Reporte USAID. Mayo 2010.
- [87] Resolución por la que la Comisión Reguladora de Energía expide las Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente. Secretaría de Energía. Diario Oficial de la Federación 22 de mayo 2012.
- [88] Portal de Trámites de la COFEMER. <http://www.cofemer.gob.mx/>.
- [89] Clean Development Mechanism. Portal *web*. <http://cdm.unfccc.int/>
- [90] Fondo Mexicano de Carbono. Página *web*. <http://cdm.unfccc.int/>
- [91] Finanzas Carbono. Plataforma para financiamiento de Carbono para América Latina. <http://finanzascarbono.org/>
- [92] The Economic Development Benefits of Waste-To-Energy Systems. Jeremy O'Brien. SWANA. NAWTEC 2012. Portland, Ma. April 2012.
- [93] Caso MÉXICO. Informe Final. Producto 3: Mecanismos Financieros. OLADE Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe. Agosto 2011.
- [94] Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos. Portal Web. <http://www.banobras.gob.mx/Paginas/Banobras.aspx>
- [95] Global Environmental Facility. Portal *web*. <http://www.thegef.org/gef/>.
- [96] Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático. Portal del Banco Interamericano de Desarrollo. <http://www.iadb.org/es/temas/cambio-climatico/secci,1482.html>.
- [97] WTE Project Failure Causes. Marty Olsen. Waste Conversion: Getting Your Project off the Ground webinar. 22/08/2012.
- [98] Ask The Right Questions First (about that new Waste Conversion Technology). Bruce J. Clark and Marc Rogoff. Waste Conversion: Getting Your Project off the Ground webinar. 22/08/2012.
- [99] Joint UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Programm (ESMAP). Manual para la preparación de proyectos de generación de energía a partir de gas de rellenos sanitarios en América Latina y el Caribe. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/preparacion.pdf>
- [100] RETScreen International Renewable Energy Project Analysis *Software*. <http://gcmd.gsfc.nasa.gov/records/RETScreen.html>
- [101] Página *web*: EPA Home, Landfill Methane Outreach Program, Publications/Tools, *Software* Tools; LFGcost–Web–Landfill Gas Energy Cost Model. <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/index.html>
- [102] Página *web*: EPA Home, Landfill Methane Outreach Program, Publications/Tools; Project Development Handbook; Chapter 4. Project Economics and Financing , 2010 <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>
- [103] Gas de Relleno Sanitario para Generar Energía Eléctrica en Monterrey. Presentación de José Ramón Vega Galaz. Taller: Producción y Aprovechamiento de Biometano a partir de Residuos Orgánicos: SEISA; CINVESTAV, Saltillo, Coahuila, 10-Junio-2011, diapositiva 20.
- [104] Producción de Energía Eléctrica en el Relleno Sanitario de Ciudad Juárez. Generación 6.4 MW. Presentado en el Foro: Soluciones para el Desarrollo de Energía Renovable y Eficiencia Energética En Regiones Fronterizas. Mexicali, B.C.; junio 2011. Página web [http://www.energiabc.gob.mx/files/public/downloads/foro\\_soluciones/07%20Proyectos%20Energie%CC%81ticos%20-%20Estado%20de%20Chihuahua.pdf](http://www.energiabc.gob.mx/files/public/downloads/foro_soluciones/07%20Proyectos%20Energie%CC%81ticos%20-%20Estado%20de%20Chihuahua.pdf)

[105] Tarifas. Página *web* CFE, Principal: <http://www.cfe.gob.mx/Paginas/Home.aspx>

Tu negocio: <http://www.cfe.gob.mx/Negocio/Paginas/Negocio.aspx>

Conoce tu tarifa: <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifas/Paginas/Tarifas.aspx>

[106] Monterrey Biogas Project: Lessons Learned and Expansion Strategy. 10th Annual LMOP Conference and Project Expo. January 23 2007, Baltimore, MA.

[107] Información proporcionada por el Ing. Francisco Miguel Calderón González, Gerente de Energías Renovables y Cogeneración. SEISA. Agosto 2012.

[108] Información proporcionada por el Ing. Alejandro Martí. Operations Manager, Latin America Biogas Technology, S.A. de C.V.

[109] Información proporcionada por el Ing. Héctor Rangel. Biogás de Juárez. Agosto 2012.



#### **Unidad de Electrificación**

Río Atoyac No. 97-3er. piso, sala 309,  
Cuauhtémoc, 06598, Ciudad de México, D. F.  
[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)



#### **Gerencia de Energías Renovables**

Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490,  
Cuernavaca, Morelos.  
[www.iie.org.mx](http://www.iie.org.mx)



Avenida Revolución No. 1877,  
Álvaro Obregón, Loreto, 01090,  
Ciudad de México, D. F.  
[www.conuee.gob.mx](http://www.conuee.gob.mx)

Se agradece a la CONUEE por su  
apoyo económico para la impresión de  
este documento



