



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Viabilidad económica del aprovechamiento
del biogás de un relleno sanitario

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Industrial

PRESENTA:

Daniel de la Rosa Urbalejo

DIRECTOR

Dr. José Luis Fernández Zayas



México D.F. 2008

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Viabilidad Económica del aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario

Estudiante:

Daniel de la Rosa Urbalejo

Jurado

Dr. José Luis Fernández Zayas

Mtro. Norberto Chargoy del Valle

Ing. Gustavo Becerra Muñoz

Mtra. Silvina Hernández García

Ing. Armando Maldonado Susano

México D.F. 2008

Agradecimientos

A mi director de tesis: Dr. José Luis Fernández Zayas profesor e investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo recibido durante la elaboración del presente trabajo.

A los lectores de esta tesis: Mtro. Norberto Chargoy del Valle, Ing. Gustavo Becerra Muñoz, Mtra. Silvina Hernández García y al Ing. Armando Maldonado Susano, por sus comentarios que enriquecieron el contenido de este trabajo.

A toda mi familia, por darme su amor y apoyo incondicionales.

A mi querida abuela Ma. Ignacia Méndez Regalado, que en paz descansa, por tu amor tan entregado que siempre me brindaste.

A Karlita, por tu amor, el cual ha marcado una gran diferencia en mi vida.

A todos mis amigos y las personas que siempre me han permitido compartir tantos momentos tan gratos.

Índice

	Página
Prefacio.	5
Objetivo e hipótesis.	6
Capítulo I: Introducción y antecedentes.	7
1.1 Evolución de las principales fuentes energéticas.	8
1.2 Bioenergía.	13
1.2.1 Impacto ambiental.	14
1.2.2 Beneficios sociales.	15
1.2.3 Situación en México.	15
1.3 Residuos sólidos urbanos	16
1.3.1 Impactos ambientales de los rellenos sanitarios.	16
1.3.2 Análisis de experiencias internacionales.	18
1.3.3 Marco legal.	19
1.3.4 Incentivos fiscales.	21
1.3.5 Bonos de carbono	22
Capítulo II: Descripción del proceso de transformación.	23
2.1 Descripción del proceso de conversión de basura a energía.	24
2.1.1 Características del relleno sanitario.	24
2.1.2 Supuestos para la evaluación del potencial del metano (CH ₄).	26
2.1.3 Estimación empírica de la producción promedio anual de CH ₄ del Bordo Poniente	26
Capítulo III: Cálculo de las principales variables.	31
3.1 Diseño de la instalación.	32
3.1.2 Sistema de aprovechamiento.	32
3.1.3 Sistema de microturbinas de biogás para rellenos sanitarios.	34
3.1.4 Viabilidad económica.	35
3.1.5 Cálculo de costos.	35
3.1.6 Precio medio del kWh.	37
Capítulo IV: Obtención de resultados.	38
4.1 Costos totales.	39
4.2 Ingresos por venta de energía eléctrica.	39
4.3 Ingresos por venta de bonos de carbono.	39
4.4 Valor actual neto.	40
Conclusiones y recomendaciones.	42
Bibliografía.	43

Prefacio

Se hace una descripción de la situación energética actual a nivel internacional, la problemática referente a los patrones vigentes de producción y consumo de energía, continuando con el análisis del impacto ambiental del biogás proveniente de rellenos sanitarios para finalmente proponer una solución para mitigar este impacto a través del uso del biogás para la generación de energía eléctrica

Se muestran las características del relleno sanitario a estudiar y se define el proceso de conversión de basura a energía eléctrica, continuando con el cálculo de las principales variables que afectan la instalación del proyecto con sus respectivos costos, para finalmente mostrar si es viable el proyecto.

Objetivo.

Mostrar que desde un punto de vista social, ambiental y económico, la presente propuesta puede ser una opción muy atractiva para la solución del problema del manejo de los residuos sólidos urbanos.

Se delimitará el área de estudio a las tres primeras etapas del Bordo Poniente para después dejar un antecedente que la cuarta etapa tiene un mayor potencial si se utilizara una metodología similar.

Hipótesis

Viabilidad económica del potencial energético del biogás producido por el relleno sanitario Bordo Poniente para su aprovechamiento y transformación en energía eléctrica.

Capítulo I

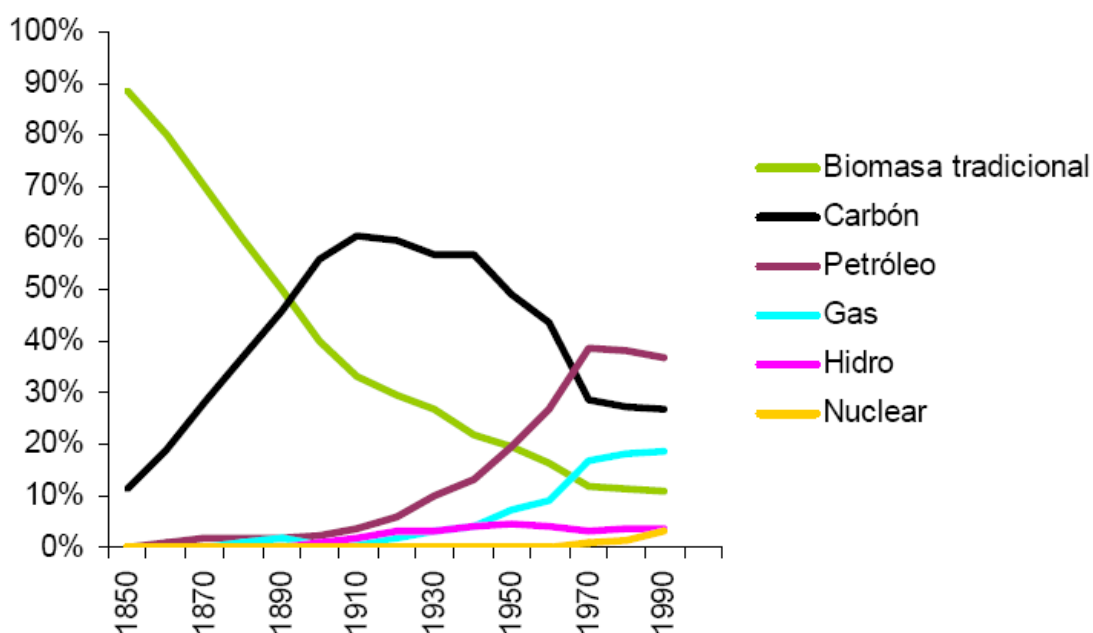
Introducción y antecedentes

1.1 Evolución de las principales fuentes energéticas

Las necesidades pasadas, presentes y futuras de energía son determinadas y conducidas por tres factores principales: el crecimiento de la población, el desarrollo económico y el progreso tecnológico.

La *figura 1* muestra la evolución de las fuentes de energía primaria ¹ a nivel mundial. En ella puede verse la sustitución paulatina de la biomasa tradicional por los combustibles fósiles.

Figura 1 Evolución de las fuentes de energía primaria a nivel mundial, 1850 – 2000.



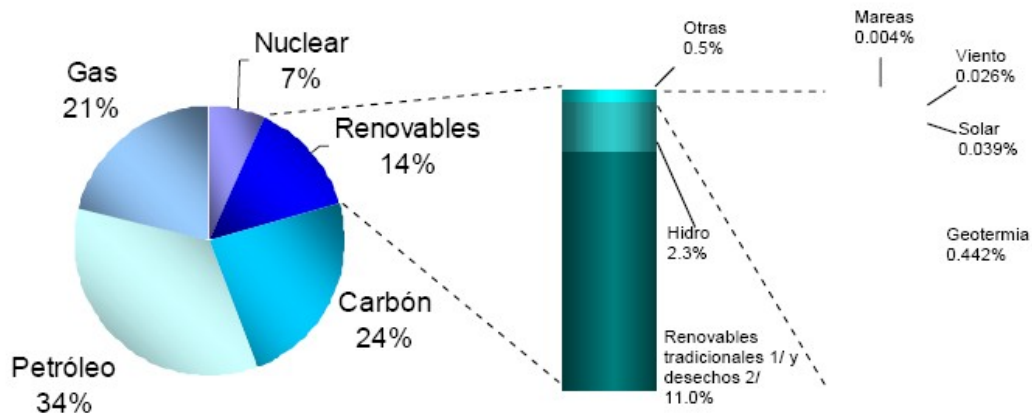
FUENTE: Elaborado con base en Nakicenovic, Grübler y Mc Donald, 1998.

El carbón se inició como el energético predominante a principios del siglo XX, cubriendo cerca de las dos terceras partes de los requerimientos energéticos globales en la época de la Primera Guerra Mundial. En la misma figura también se observa el declive gradual del carbón a favor del petróleo y también el surgimiento de otras fuentes energéticas como el gas natural, el fortalecimiento de la hidroelectricidad y a partir del periodo de posguerra, el surgimiento de la energía nuclear. Sin embargo, a pesar del surgimiento de otras fuentes energéticas primarias, continuamos viviendo una era en donde el patrón de energía está dominado por los recursos fósiles, principalmente el petróleo.

¹ Energía primaria: es aquel recurso energético en estado natural que, a través de su extracción, refinación y transportación, puede convertirse en una energía o combustible económicamente utilizable. Son energías primarias el carbón, la hidroelectricidad, la energía nuclear, el petróleo crudo, el gas natural, la geotermia y el bagazo de caña, entre otros.

De constituir casi el 90% de la oferta energética mundial en 1850, los energéticos renovables formaron únicamente el 14% de esta oferta en el año 2000, como se muestra en la *figura 2*.

Figura 2 Estructura de la oferta mundial de energía primaria, 2000.



FUENTE: ISES, 2002

1/ incluye leña y carbón vegetal

2/ incluye residuos agrícolas y desechos sólidos municipales

Este aumento tan acentuado de las fuentes fósiles, que en conjunto representaron el 79% de la oferta mundial energética primaria en el año 2000, no fue fruto de la casualidad. El crecimiento de la población mundial se dio junto con importantes cambios en la organización de los procesos productivos debidos a la industrialización, a lo que se aunaron los procesos de urbanización y las crecientes necesidades de transporte de personas, de insumos y de mercancías. Esto determinó el surgimiento de nuevas y mayores necesidades energéticas que las fuentes tradicionales como la leña, ya no podían cubrir a un nivel masivo. Así, se hizo cada vez más necesario recurrir a fuentes fácilmente transportables y con mayor densidad energética ², por lo que el carbón y el petróleo cubrieron ese nuevo papel.

En la *figura 2* puede verse que el 11% de la oferta mundial de energía renovable, se compuso de biomasa tradicional y desechos; el 2.3% de hidroelectricidad y el 0.5% de otras fuentes como la geotermia, la energía solar, el viento y las mareas.

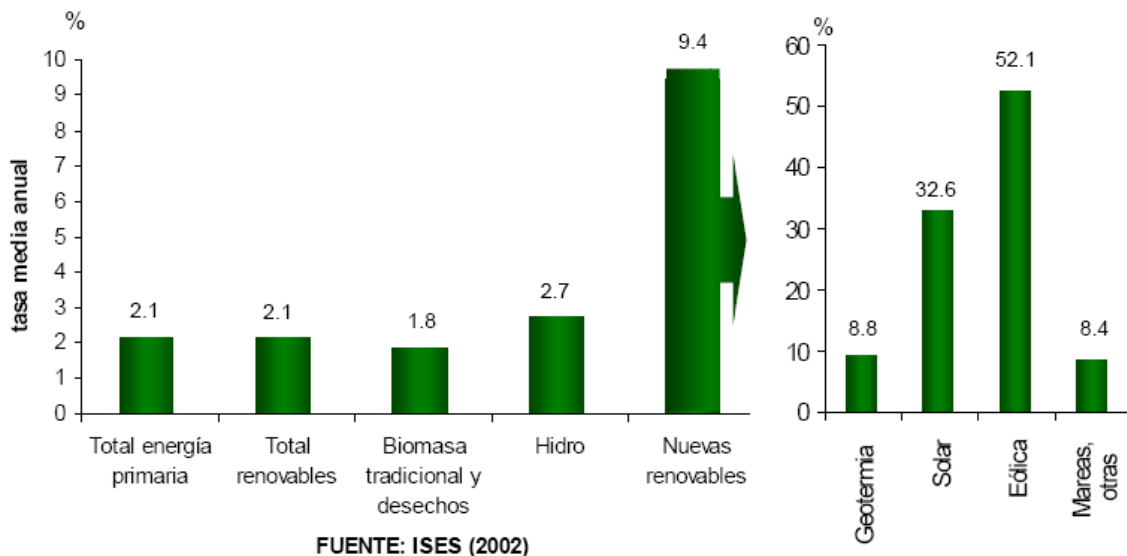
² Para comprender mejor el concepto de densidad energética, la comparación entre el petróleo, el carbón y la leña, muestra que el petróleo tiene una densidad energética mayor, al presentar una equivalencia de 42.983 MJ por kilogramo, mientras que para el mismo peso, el carbón tiene 25.284 MJ y la leña 14.486 MJ. Esto quiere decir que, para producir la misma cantidad de energía, se requiere una menor cantidad de petróleo en comparación con la leña y el carbón.

Así también puede verse la permanencia de las fuentes renovables en el panorama energético mundial, el cual es un factor que no puede descartarse y que incluso ofrece un gran potencial de crecimiento, como se verá posteriormente.

Junto con la permanencia de las fuentes renovables a las que se refiere la *figura 2*, el progreso científico y tecnológico ha determinado la aparición en el mapa energético de nuevas formas de aprovechamiento de energías renovables, que ciento cincuenta años antes hubieran sido impensables, como las celdas solares, los sistemas eólicos o los biocombustibles. Esto aunado al surgimiento de ciertos nichos económicos favorables para su utilización, a la identificación de regiones con un alto potencial de aprovechamiento y a la creciente aceptación de la opinión pública de sus ventajas ambientales sobre las energías convencionales, le ha conferido a las fuentes renovables una importancia creciente.

En la *figura 3* se muestra la tasa anual de crecimiento de las energías renovables durante las últimas tres décadas. Puede observarse que las fuentes renovables tradicionales utilizadas muestran un crecimiento moderado, destacando que las nuevas fuentes (geotermia, solar, eólica y otras) crecieron en promedio a 9.4% cada año.

Figura 3 Crecimiento anual de la oferta renovable, 1971-2000



Es necesario considerar que la actual era del petróleo, junto con todos sus beneficios, también ha traído numerosas consecuencias no siempre positivas; en primer lugar, destaca la división en países vendedores y compradores, cuya correlación de fuerzas ha sufrido profundos cambios desde principios del siglo XX. El control total del mercado internacional por las “Siete Hermanas” terminó con la creación de la OPEP en 1960 y a partir de entonces el mercado fue controlado por los vendedores, situación que alcanzó su punto más crítico con el embargo petrolero de 1973, revelando la gran dependencia del mercado mundial respecto a los suministros del Medio Oriente. Esta situación no ha podido ser contrarrestada ni siquiera con el surgimiento de nuevos productores en otras regiones del mundo durante los años setenta y ochenta.

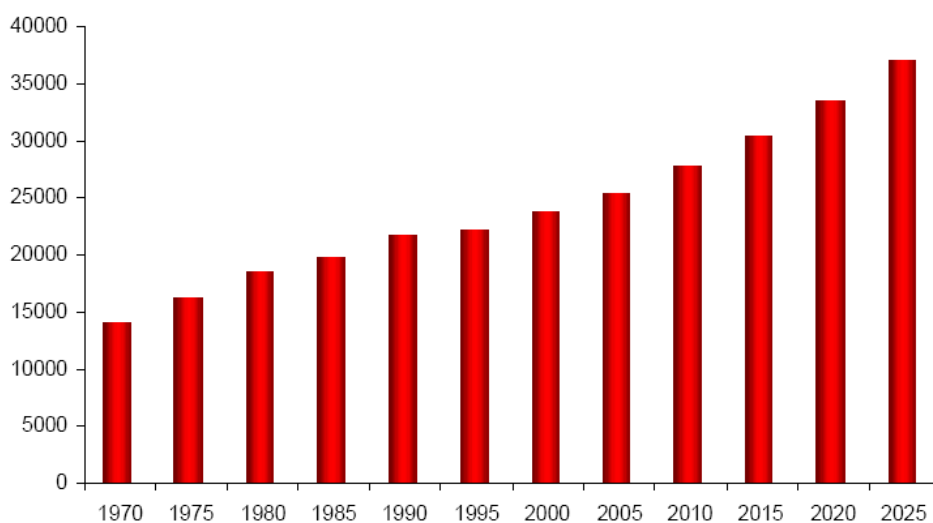
En segundo lugar, la petrolización de las economías de la gran mayoría de los países exportadores de petróleo genera una gran vulnerabilidad respecto a las fluctuaciones de los precios en el mercado petrolero internacional.

En tercer lugar, el hecho de que el petróleo no es un recurso renovable, y que los países con la mayor relación reservas-producción están concentrados en la región del Medio Oriente, genera una gran incertidumbre en el panorama global por los riesgos políticos que esto implica para las principales potencias mundiales.

En cuarto lugar, la dependencia casi total que el sector transporte aun mantiene respecto al petróleo, sus requerimientos crecientes de energía y la incertidumbre sobre la sustitución a mediano plazo del motor de combustión interna o de los combustibles fósiles en ese sector es otra consecuencia de la era del petróleo.

Finalmente, un aspecto que ha cobrado gran relevancia a nivel mundial es el referente a las afecciones que los recursos energéticos fósiles generan sobre el ambiente y sobre la salud humana. A este respecto deben señalarse dos sectores que generan emisiones masivas a la atmósfera; el primero de ellos es la generación termoeléctrica, altamente dependiente del carbón, el petróleo y el gas natural, y el segundo sector que más emisiones genera es el transporte, que además de depender mayoritariamente de combustibles provenientes del petróleo, añade el carácter ubicuo y disperso de los vehículos automotores, lo que hace que sus emisiones sean difíciles de controlar.

Figura 4. Emisiones de CO₂ por producción y uso de energía, 1970-2025 (millones de toneladas)



FUENTE: EIA, 2004

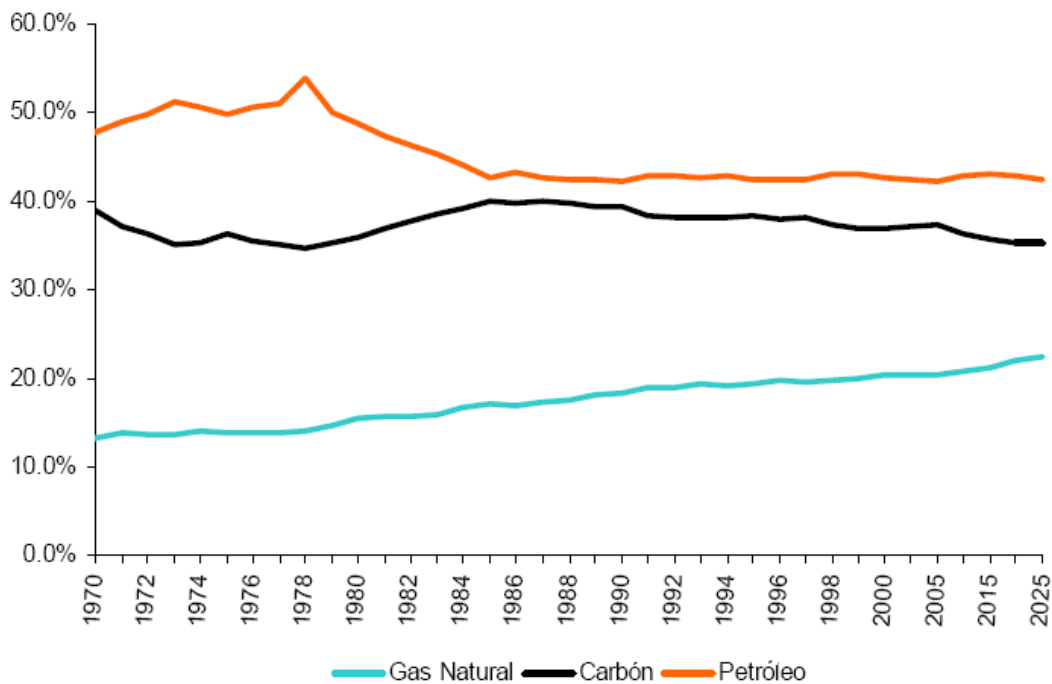
La gravedad de esta situación queda manifiesta si se analizan las emisiones de (CO₂), uno de los principales gases generadores del efecto invernadero, ocasionadas por la producción y el uso de energía fósil y cuyo volumen se muestra en la *figura 4*.

Como puede observarse, entre 1970 y el año 2000, las emisiones mundiales de CO₂ crecieron en 1.7% anual, mientras que se prevé que entre 2000 y 2025 la tasa de crecimiento será de 1.8% anual.

El aumento previsto en las emisiones de CO₂ provendrá principalmente del consumo energético de los países en desarrollo, dado su crecimiento poblacional más alto que en los países desarrollados, un mayor nivel esperado de vida y el aumento de las industrias intensivas en energía.

Otro aspecto importante que se debe considerar en esta problemática es el de las emisiones de CO₂ por tipo de combustible fósil. De acuerdo con la *figura 5*, el petróleo y el carbón seguirán siendo los combustibles con mayor participación en el volumen total de emisiones, siendo esta situación producida en gran parte por el consumo de los países en desarrollo, especialmente, por los mayores requerimientos para generación eléctrica.

Figura 5. Emisiones de CO₂ por combustibles fósiles 1970-2005 (Participación porcentual)



FUENTE: EIA, 2004

Si la evidencia de la relación entre la quema de combustibles fósiles y la emisión de gases de invernadero es tan tangible, surge entonces la interrogante sobre si la dependencia respecto a ellos debe ser mantenida en el futuro. A este respecto, es fundamental que los gobiernos comiencen a visualizar los años que le queda a la era de los combustibles fósiles como una transición hacia otras formas de energía y en este contexto las fuentes renovables pueden ser un instrumento idóneo.

Bajo estas condiciones, las acciones públicas encaminadas hacia una transición a las energías renovables son conducidas por tres factores importantes:

- a) Las restricciones ambientales surgidas recientemente y la mayor comprensión de los temas en este campo.
- b) El atractivo de las oportunidades económicas y ambientales que se abrirán durante la transición hacia la energía renovable.
- c) La necesidad de reducir los riesgos derivados de la condición de las instalaciones energéticas como blancos de ataques terroristas en determinados países, así como por fallas en las tecnologías energéticas de las cuales dependen grandes sectores de la población, como es el caso de las instalaciones de generación y distribución eléctrica.

1.2 Bioenergía

La biomasa es la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal (incluyendo los desechos orgánicos) que puede ser capturada y usada como una fuente de energía química almacenada.

La bioenergía resulta cuando los combustibles de origen biológico son usados para fines energéticos. Los productos secundarios en estado sólido, líquido y gaseoso son a menudo utilizados como portadores de energía y más tarde empleados para proveer bioenergía, bioelectricidad, o biocombustibles. Los biocombustibles se refieren específicamente a los combustibles obtenidos de la biomasa y que se usan principalmente en los sectores de generación de electricidad, de transporte y de vivienda.

En cuanto a sus características generales, la bioenergía tiene ventajas en cuanto a la densidad energética, la cualidad de ser transportable y que en sí misma es una forma de almacenamiento de energía.

La bioenergía puede proveer una amplia variedad de servicios (calefacción, alumbrado, confort, entretenimiento, etc.) a través de su uso para la producción de combustibles que son flexibles en el sentido de adaptarse a las diferentes necesidades de energía.

Su composición química es similar a la de los combustibles fósiles, los cuales se originaron a partir de la biomasa hace millones de años, lo que además de su uso energético, crea la posibilidad de originar a partir de la biomasa, lo que se denomina como biomateriales que pueden virtualmente sustituir a todos los productos que actualmente se derivan de la industria petroquímica. Finalmente, el recurso disponible de la biomasa surge de una amplia variedad de fuentes.

El potencial de la bioenergía es tan significativo que la Unión Europea lo ha identificado como una contribución importante para alcanzar su objetivo del 12% de la producción total de energía mediante fuentes renovables, así como la meta ambiciosa de reemplazar por biocombustibles el 20% de los combustibles usados en el transporte para el año 2020.

Actualmente, la bioenergía en estado sólido representa un 45% de la energía primaria renovable en los países miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). A nivel global, cerca de 84 TWh de electricidad fueron generados por medio de bioenergía en 2002, correspondiendo aproximadamente la mitad a los Estados Unidos de América, 11.3 TWh a Japón y 8.5 TWh a Finlandia. Asimismo, en este mismo año, fueron producidos 565 PJ para generación de calor a partir de la bioenergía (incluyendo cogeneración), 245 PJ de energía en forma de gases y 227 PJ de biocombustibles.

Dado que la bioenergía puede sustituir en cierta forma a la infraestructura de producción de los combustibles fósiles, se estima que la contribución de la biomasa para el suministro de energía en el mundo se incrementará de 59 a 145 EJ para 2005 y de 94 a 200 EJ en el 2050. La cantidad total de energía de residuos potencialmente cosechables como los forestales, cultivos agrícolas y desechos animales es considerable y cubre una gran proporción del suministro de energía en algunas zonas rurales.

1.2.1 Impacto ambiental

El mayor beneficio ambiental derivado del uso de la bioenergía para desplazar a los combustibles fósiles es la reducción en las emisiones locales, un mejor aprovechamiento de los recursos limitados, mejorar la biodiversidad, y la protección del hábitat natural y de los paisajes.

A pesar de estas ventajas, bajo ciertas circunstancias, el uso de estos combustibles puede tener impactos ambientales negativos, como por ejemplo, la emisión de aldehídos producto del uso del etanol. Además algunas cuestiones todavía deben ser resueltas mediante el análisis detallado de ciclos de vida que demuestren si los balances energéticos son positivos para ciertos proyectos.

La producción continua de plantaciones de bosques y plantaciones energéticas podría reducir los niveles de fertilidad de los suelos, disminuir el flujo en el suministro de agua, así como conducir al incremento en el uso de agroquímicos. Para evitar lo anterior, debería practicarse el reciclaje de nutrientes a través del esparcimiento de las cenizas de la combustión y los métodos de cultivo sustentables.

La recolección y transporte de la biomasa resulta con frecuencia en el incremento en el uso de vehículos, y en consecuencia, en mayores emisiones de gases en la atmósfera junto con un mayor uso y desgaste del sistema carretero. La reducción de las distancias entre los centros de producción de la biomasa y las plantas de conversión minimizaría los impactos del transporte.

Un desafío mayor consiste en administrar en forma sustentable el recurso de la biomasa, de tal forma que se pueda garantizar a futuro el suministro de bioenergía y biomateriales con un mínimo de requerimientos de suministro de agua, agroquímicos, fertilizantes o combustibles fósiles.

1.2.2 Beneficios sociales

A pesar de que los beneficios ambientales de las energías renovables, incluyendo a la bioenergía, son ampliamente aceptados, los beneficios socioeconómicos no están muy bien entendidos. Los beneficios sociales de las modernas aplicaciones de la biomasa están relacionados con el mejoramiento en la calidad de vida; disminución en la emisión de contaminantes nocivos para la salud humana; oportunidades locales de empleo; satisfacción por el dominio de la comunidad y cohesión social.

En general, los sistemas de energías renovables requieren de más fuerza de trabajo que los sistemas a base de combustibles fósiles y en una mayor proporción se requiere mano de obra más especializada. Operar, mantener en funcionamiento y proveer el combustible en una planta bioenergética, a menudo genera oportunidades de empleo, principalmente en áreas rurales. Las fuentes de empleo generadas en proyectos bioenergéticos difieren de los generados en proyectos eólicos, hidráulicos y solares en que las actividades principales se desarrollan durante la manufactura de las plantas, su instalación y mantenimiento. Proporcionar el suministro del combustible de la biomasa y su transporte a la planta de conversión es un componente esencial adicional de la bioenergía.

1.2.3 Situación en México

¿Por qué se debe desarrollar bioenergía en un país como México, el cual es productor de petróleo? El uso de biomasa como principal fuente de energía ha caído en México desde 1965, cuando su uso constituía el 15.3% del total de fuentes de energía primarias. En el año 2005 el uso de biomasa representó sólo el 5.3% del total de fuentes de energía primarias. Mientras tanto, el uso de hidrocarburos se ha mantenido estable representando en promedio un 87.7% del total de las fuentes de energía primarias.

Existen varias razones para incrementar el uso de bioenergéticos en México. Por una parte, el aumento en la dependencia de los combustibles fósiles es ya un problema. En 2007, las reservas probadas de hidrocarburos están estimadas para producir anualmente gas y petróleo en 9.6 y 8.9 años más respectivamente. El promedio anual de emisiones de CO₂ calculado para México es de 4.3%, uno de los más altos en el mundo.

Por otra parte, los bioenergéticos tienen el potencial de llegar a ser una pieza fundamental en un sistema de energía sustentable, contribuyendo no sólo con la estrategia de diversificación de fuentes de energía del país, sino también con el impulso para la adquisición de nueva tecnología para producción de energía. Puede también contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, con la generación de nuevos empleos en áreas rurales y el mejoramiento en la distribución de la riqueza. Más aún, favorecerán la no dependencia de importaciones de energéticos, principalmente gasolina y diesel, lo cual es importante por razones económicas y de seguridad nacional.

El potencial de bioenergía producida a nivel mundial es de entre 94,000 y 325,000 PJ/año. La última cifra representa el 78% del total del consumo de energía primaria usada en 2004. En el mismo año las fuentes bioenergéticas producidas a nivel mundial representaron el 11% del consumo de energía global. En México, una estimación moderada del potencial bioenergético se calcula en 3,035 PJ/año, mientras que una estimación alta es de 4,550 PJ/año ³. Estas cifras representan el 46% y el 68% de la energía proporcionada por las fuentes primarias en México durante el año 2005, respectivamente.

Un primer e importante paso para resolver el problema de la diversificación de la energía, ya ha sido dado por el Congreso mexicano en abril de 2007, al promover la “Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos”, la cual se espera que apruebe y se publique lo más pronto posible, ya que aún se encuentra en el proceso de evaluación por parte del poder Ejecutivo. Esta ley tendrá como objetivo fundamental el proveer un marco legal para la promoción del uso de biocombustibles a nivel nacional. Otra iniciativa de ley, la cual tiene un alcance más amplio, es la “Ley de Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía”, la cual fue aprobada por la Cámara de Diputados en diciembre de 2005. Sin embargo esta iniciativa está siendo revisada por la Cámara de Senadores y desde entonces no ha sido ratificada. Esta ley podría establecer un marco legal para promover masivamente el uso de fuentes de energía renovable, particularmente en el sector eléctrico nacional.

1.3 Residuos sólidos urbanos

1.3.1 Impactos ambientales de los rellenos sanitarios.

El depósito de desechos en rellenos sanitarios puede generar problemas ambientales como contaminación de agua, olores desagradables, explosiones, asfixia, daño de áreas verdes y emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente son utilizados diferentes métodos para evaluar estos problemas a fin de encontrar soluciones para ellos.

³ Ghilardi A, Riegelhaupt E, Saldaña R. “Los Recursos Bioenergéticos en México”, Ciudad de México Mundiprensa; 2005.

El biogás de los rellenos sanitarios es un subproducto de la descomposición orgánica de los desechos y es producido mediante la degradación hecha por microorganismos de la parte orgánica de los mismos. Un ejemplo de la conversión de la biomasa en energía puede verse en los rellenos sanitarios que producen una cantidad de biogas aproximada de 0.35 m³/kg de residuos sólidos municipales ⁴.

El biogás es generado bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Las condiciones aeróbicas ocurren inmediatamente después de depositar los residuos, producidas por el aire atrapado proveniente de la atmósfera. La fase aeróbica tiene una duración muy corta y produce un gas principalmente compuesto por CO₂. Cuando se agota el oxígeno, continúa la degradación de larga duración bajo condiciones anaeróbicas, de modo que se produzca un gas con gran valor energético, que es típicamente 55% CH₄, 45% CO₂ y el resto se trata de una serie de compuesto orgánicos volátiles. La mayor parte del CH₄ y CO₂ se genera dentro de los 20 años de cerrado el relleno sanitario, mientras que las emisiones pueden continuar hasta por 50 años o más ⁵.

Existen dos posibles soluciones al problema de las emisiones de biogás. Una es su extracción y quema, el cual es un método frecuentemente utilizado para reducir la presión dentro del relleno sanitario así como los olores desagradables. La otra solución es reusar el biogás con otros propósitos, debido a que su energía química total es suficiente para mantener la operación de una turbina de gas, esto hace evidente que se trata de una fuente valiosa de energía. De hecho, puede ser utilizado como complemento o fuente principal de combustible para incrementar la producción de energía eléctrica, combustible para vehículos, o incluso como un suministro de calor y de CO₂ para invernaderos y diversos procesos industriales.

El uso del biogás como fuente de combustible es una opción viable desde el punto de vista ambiental, ya que contribuye con la reducción del uso de combustibles fósiles y mitiga el efecto invernadero. Particularmente las emisiones de CH₄, uno de los dos gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, es casi 21 veces más peligroso que el efecto invernadero producido por el monóxido de carbono CO ⁵. Los rellenos sanitarios son la principal fuente de emisiones antropogénicas de CH₄, y se estima que representan del 3 al 19 % de las emisiones antropogénicas de CH₄ a nivel mundial. La recuperación del biogás para su uso como recurso energético es ahora un área de vital interés, ya que es una solución creativa problemas como la contaminación ambiental y la escasez de energía.

⁴ Desideri U, Di Maria F, Leonardi D, Proietti S. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. *Energy Convers Manage* 2003; 44:1969–81.

⁵ Zamorano M, Pérez J, Pavés I, Ramos A. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain 2005; 910-921.

Los desechos orgánicos sólidos en áreas urbanas representan una fuente considerable de energía. Los desechos sólidos municipales y su manejo en los Estados Unidos representan un buen ejemplo. De las 208 millones de toneladas recolectadas en 1995 aproximadamente sólo el 14% fueron no combustibles o no fermentables. El tratamiento de estos desechos en los Estados Unidos y en otras partes se efectúa por recuperación, combustión o relleno sanitario, pero sólo una pequeña parte es procesada mediante plantas incineradoras de desechos municipales principalmente en los países miembros de la OCDE ⁶.

El costo en la generación de electricidad a través de los desechos sólidos municipales y otras fuentes de biomasa es razonablemente aceptable cuando se compara con el de la energía eólica; y es mucho menor que el de las aplicaciones solares ⁶.

1.3.2 Análisis de experiencias internacionales

Un estudio presentado por la Universidad de Perugia, Italia, muestra que la concentración de CH₄ puede ser del 50% por volumen. Esto significa que el poder calorífico del biogás producido por el relleno sanitario puede estar por encima de los 18,000 kJ/m³.

El sistema de extracción se realizó mediante un sistema de 72 pozos en un área de 415,000 m³, la cual alberga una cantidad de residuos de 160,000 ton/año.

Los resultados experimentales muestran que el poder calorífico total del relleno sanitario estudiado es de aproximadamente 15,800 kJ/m³. Esta cantidad de energía puede producir una cantidad de electricidad aproximadamente de 49 GWh/año, operando por 3 años.

Otros resultados muestran que para el biogás con una concentración por encima del 40% de CH₄ el poder calorífico es de 17,000 kJ/m³, entre 40% y 20 % es de 12,000 kJ/m³ y por debajo de 20% el poder calorífico equivaldría a 7,000 kJ/m³.

Otro estudio presentado por la Universidad de Granada, España, muestra los resultados del potencial energético de un relleno sanitario localizado en la misma ciudad, el cual se realizó previo a su instalación en el otoño de 2003.

El relleno sanitario analizado es un ejemplo de cómo recuperar la energía, en este caso particular, el biogás generado se reutilizó para producir energía eléctrica. Los resultados basados en modelos empíricos y teóricos muestran que el biogás presenta una concentración de 45% de CH₄ y un flujo que oscila entre 250 y 550 m³/h. En la actualidad se utiliza para producir una cantidad aproximada de electricidad de 4,500,000 kWh/año. El proyecto se estima que tenga un periodo de explotación de 7 años.

⁶ Islas, J. Manzini, F. Masera, O. A prospective study of bioenergy use in Mexico. CIE, UNAM. Energy 32 2007; 2306-2320.

1.3.3 Marco legal

Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003⁷

7. Características constructivas y operativas del sitio de disposición final

7.1 Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final. Una vez que los volúmenes y la edad de los residuos propicien la generación de biogás y de no disponerse de sistemas para su aprovechamiento conveniente, se procederá a su quema ya sea a través de pozos individuales o mediante el establecimiento de una red con quemadores centrales.

c) Informe mensual de actividades.

7.11.1 Monitoreo de biogás

Se debe elaborar un programa de monitoreo de biogás que tenga como objetivo, conocer el grado de estabilización de los residuos para proteger la integridad del sitio de disposición final y detectar migraciones fuera del predio. Dicho programa debe especificar los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás.

La **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**⁸ y su Reglamento en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, señalan que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y regiones del país, y que la Secretaría de Desarrollo Social expedirá, en coordinación con la Secretaría de Salud en lo referente a la salud humana, las normas oficiales mexicanas correspondientes, especificando los niveles permisibles de emisión e inmisión por contaminante y por fuente de contaminación, de acuerdo con el reglamento respectivo.

El **Programa Nacional para la Protección del Medio Ambiente 1990-1994**⁹ dicta que en materia de Protección al Ambiente se cuente con los conocimientos científicos y técnicos que permitan incorporar en los procesos productivos, tecnologías que reduzcan al mínimo el impacto sobre el medio ambiente, así como definir e incluir criterios ecológicos para regular y optimizar las actividades productivas.

⁷http://transparencia.nl.gob.mx/AdministracionParaestatal/OrganismosD/SIMEPRODESO/SIMEPRODE_F01_05_10_08.doc

⁸ <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>

⁹ <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/194/dpnpm.html>

Ley del servicio público de energía eléctrica ¹⁰

Artículo 1

Corresponde exclusivamente a la Nación, generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público, en los términos del Artículo 27 Constitucional. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará, a través de la Comisión Federal de Electricidad, los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.

Artículo 2

Todos los actos relacionados con el servicio público de energía eléctrica son de orden público.

Artículo 3

No se considera servicio público:

- I.- La generación de energía eléctrica para autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción;
- II.- La generación de energía eléctrica que realicen los productores independientes para su venta a la Comisión Federal de Electricidad.
- III.- La generación de energía eléctrica para su exportación, derivada de cogeneración, producción independiente y pequeña producción.

Artículo 36

La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, considerando los criterios y lineamientos de la política energética nacional y oyendo la opinión de la Comisión Federal de Electricidad, otorgará permisos de autoabastecimiento, de cogeneración, de producción independiente, de pequeña producción o de importación o exportación de energía eléctrica, según se trate, en las condiciones señaladas para cada caso:

III.- De Producción Independiente para generar energía eléctrica destinada a su venta a la Comisión Federal de electricidad, quedando ésta legalmente obligada a adquirirla en los términos y condiciones económicas que se convengan. Estos permisos podrán ser otorgados cuando se satisfagan los siguientes requisitos:

- a) Que los solicitantes sean personas físicas o personas morales constituidas conforme a las leyes mexicanas y con domicilio en el territorio nacional, y que cumplan con los requisitos establecidos en la legislación aplicable;

¹⁰ [http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/22121975\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/22121975(1).pdf)

- b) Que los proyectos motivo de la solicitud estén incluidos en la planeación y programas respectivos de la Comisión Federal de Electricidad o sean equivalentes. La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, conforme a lo previsto en la fracción III del Artículo 3º., podrá otorgar permiso respecto de proyectos no incluidos en dicha planeación y programas, cuando la producción de energía eléctrica de tales proyectos haya sido comprometida para su exportación; y
- c) Que los solicitantes se obliguen a vender su producción de energía eléctrica exclusivamente a la Comisión Federal de Electricidad, mediante convenios a largo plazo, en los términos del Artículo 36-Bis o, previo permiso de la Secretaría en los términos de esta Ley, a exportar total o parcialmente dicha producción.

IV.- De pequeña producción de energía eléctrica, siempre que se satisfaga los siguientes requisitos:

- a) Que los solicitantes sean personas físicas de nacionalidad mexicana o personas morales constituidas conforme a las leyes mexicanas y con domicilio en el territorio nacional, y que cumplan con los requisitos establecidos en la legislación aplicable.
- b) Que los solicitantes destinen la totalidad de la energía para su venta a la Comisión Federal de Electricidad. En este caso, la capacidad total del proyecto, en un área determinada por la Secretaría, no podrá exceder de 30 MW; y
- c) Alternativamente a lo indicado en el inciso b) y como una modalidad del autoabastecimiento a que se refiere la fracción I, que 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.

1.3.4 Incentivos Fiscales ¹¹

El primero de diciembre de 2004 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la modificación a la **Ley de Impuesto sobre la Renta**.

De acuerdo a lo que establece la nueva fracción XII del Artículo 40, los contribuyentes del ISR que inviertan en maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables, pueden deducir 100% de la inversión en un solo ejercicio.

Con el fin de que estas inversiones no se hagan con el único fin de reducir la base gravable del impuesto, se contempla como obligación el que la maquinaria y equipo que se adquiriera se mantenga en operación durante un periodo mínimo de cinco años.

¹¹<http://www.coparmex.org.mx/upload/comisionesDocs/2006-05-30%20Energ%C3%ADas%20renovables%20en%20m%C3%A9xico1.ppt#281,24,Incentivos Fiscales>

1.3.5 Bonos de Carbono

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional que se ha aplicado para mitigar las emisiones contaminantes causantes del calentamiento global. Constituyen una manera de reducir las emisiones de efecto invernadero a escala industrial limitando el total de emisiones anuales y dejando que el mercado asigne un valor monetario, incentivando económicamente a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido. Los bonos pueden ser intercambiados entre empresas y se pueden comprar o vender en los mercados internacionales. También pueden ser usados para financiar esquemas de reducción de carbono entre socios comerciales alrededor del mundo ¹².

¹² http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_credit

Capítulo II

Descripción del proceso de transformación

2.1 Descripción del proceso de conversión de basura a energía

2.1.1 Características del relleno sanitario

El Bordo Poniente está localizado en terrenos que forman parte de la zona federal de Texcoco (*figura 6*) y recibe los desechos de aproximadamente 20 millones de habitantes. El Bordo Poniente mide 600 hectáreas, 472 de relleno sanitario y 128 de una barrera ecológica; 249 hectáreas ya están cerradas, pues en ellas operaron las etapas uno, dos y tres del depósito de basura. Este sitio almacena actualmente 60 millones de toneladas de desperdicios y cada día se depositan aproximadamente 12,000 toneladas de basura ¹³.

Figura 6. Localización de Bordo Poniente



¹³ http://www.obras.df.gob.mx/servicios_urbanos/residuos/rec_trans_sel_final.html

Según la Secretaría de Obras del Gobierno del Distrito Federal, en los domicilios se producen por día 5,672 toneladas, 1,869 toneladas en los comercios, 1,249 toneladas en los mercados, 1,829 en servicios y 450 toneladas en la Central de Abasto.

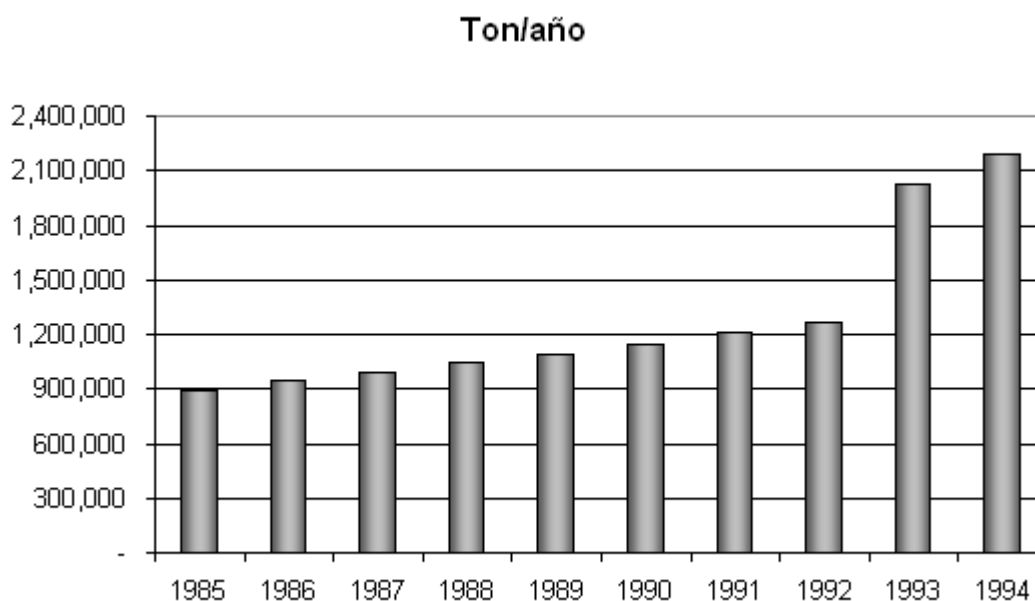
Cabe mencionar que aproximadamente el 98% de los residuos depositados son generados por el Distrito Federal y el resto en los municipios de Ecatepec, Nezahualcóyotl, Chinconcuac, Chalco, Ixtapaluca, Atenco y Texcoco, Estado de México.

Residuos acumulados en toneladas

- Etapas I 1985-1992 (3 millones 323 mil)
- Etapas II 1986-1991 (3 millones 659 mil)
- Etapas III 1992-1994 (5 millones 819 mil)
- Etapas IV 1995-a la fecha (47 millones)

Durante su periodo de máxima actividad, un total de 12,801,000 toneladas de residuos fueron depositados en las etapas I, II y III. Un claro incremento de producción de residuos puede ser observado en la *figura 7*, la cual muestra la cantidad depositada en el relleno sanitario de 1985 a 1994. Este comportamiento es típico de estas décadas y está dentro de la tasa promedio de generación de residuos ¹⁴.

Figura 7. Cantidad anual depositada de residuos en las etapas I, II y III.



¹⁴ Zamorano M, Pérez J, Pavés I, Ramos A. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain 2005; 910-921.

2.1.2 Supuestos para la evaluación del potencial de metano (CH₄)

Los desechos depositados en los rellenos sanitarios producen una cantidad de biogás de aproximadamente 0.350 m³/kg de desecho sólido urbano. Este gas está compuesto principalmente de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Dependiendo de las características y edad de los desechos y de las características y condiciones ambientales del depósito; la concentración de metano puede estar por arriba del 50% por volumen. Esto significa que el poder calorífico del biogás producido por un relleno sanitario puede estar por arriba de 18,000 kJ/m³¹⁵.

Experimentalmente se ha obtenido¹⁵ un poder calorífico promedio de 17,000 kJ/m³ de biogás con una concentración de CH₄ mayor al 40% por volumen. Para una concentración de CH₄ entre 20% y 40% por volumen se obtiene un poder calorífico promedio de 12,000 kJ/m³ y para una concentración de CH₄ menor a 20% por volumen se obtuvo un poder calorífico promedio de 7,000 kJ/m³.

2.1.3 Estimación empírica de la producción promedio anual de metano de Bordo Poniente

Debido a que las tres primeras etapas de Bordo Poniente ya se encuentran cerradas, estas producen CH₄ en condiciones anaeróbicas y por lo tanto se obtendría un biogás con un mayor poder calorífico.

Sumando la cantidad de residuos de las tres primeras etapas se obtienen:

12,801,000 toneladas.

Calculando un promedio anual de esta cantidad de residuos se obtiene:

$(12,801,000 \text{ ton}) / (10 \text{ años}) = 1,280,100 \text{ ton/año}$.

De acuerdo a información del informe 2006 sobre la “Situación actual en el manejo de residuos sólidos urbanos (RSU)”¹⁶, el 53% del total de estos, se compone de residuos orgánicos. Tomando este porcentaje para la generación de CH₄; la cantidad potencial de Bordo Poniente en las tres etapas que podría producirlo sería de 678,453 ton/año.

¹⁵ Desideri U, Di Maria F, Leonardi D, Proietti S. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. *Energy Convers Manage* 2003; 44:1969–81.

¹⁶http://sedesol2006.sedesol.gob.mx/subsecretarias/desarrollourbano/sancho/documentos/Alcances/Residuos_Solidos_Urbanos.pdf

Experimentalmente se obtuvo la cantidad de CH₄ producida por tonelada de residuos¹⁴, la cual es de 82.43 m³/ton. En caso de presentarse un escenario en el cual exista una concentración mayor de 40% de CH₄ por volumen, los resultados son:

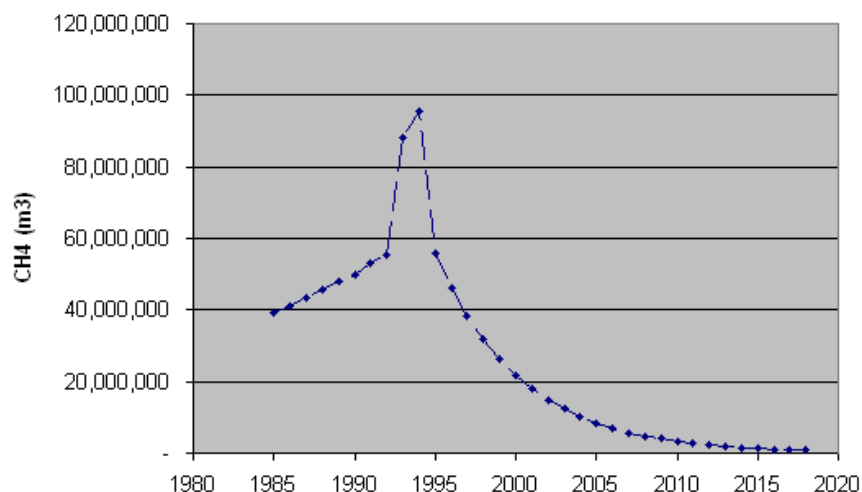
$(82.43 \text{ m}^3/\text{ton})(678,453 \text{ ton/año}) = 55.92488079 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. Como lo muestra la *tabla 1*.

Tabla 1. Cantidad potencial de residuos para producción de CH₄

Año	Residuos (ton/año)	CH ₄ (m ³ /año)
1985	892,701	73,585,369
1986	943,232	77,750,579
1987	993,762	81,915,789
1988	1,044,292	86,080,998
1989	1,094,822	90,246,208
1990	1,145,353	94,411,417
1991	1,212,726	99,965,030
1992	1,263,257	104,130,240
1993	2,021,211	166,608,384
1994	2,189,645	180,492,416
Total	12,801,000	1,055,186,430
Promedio	1,280,100	105,518,643
53%	678,453	55,924,881

Una vez que se conoce la producción y el poder calorífico promedio del CH₄ se obtiene: $(55,924,880.79 \text{ m}^3/\text{año}) (17,000,000 \text{ J/m}^3) = 0.950722973 \times 10^{15} \text{ J/año}$ (1 hr /3600s) = **264.08 GWh/año**, que representa el promedio anual durante el periodo 1985 – 1994.

Figura 8. Producción anual de CH₄ con 53% de los residuos.



La mayor parte de CH₄ y CO₂ se generan dentro de los 20 años de completado el residuo sanitario, mientras que las emisiones pueden continuar durante 50 años o más¹⁴.

En la *figura 8*, se muestra la producción anual de CH₄ tomando únicamente el promedio del periodo 1985 – 1994 y un 53% de los residuos que representan la parte orgánica de los desechos.

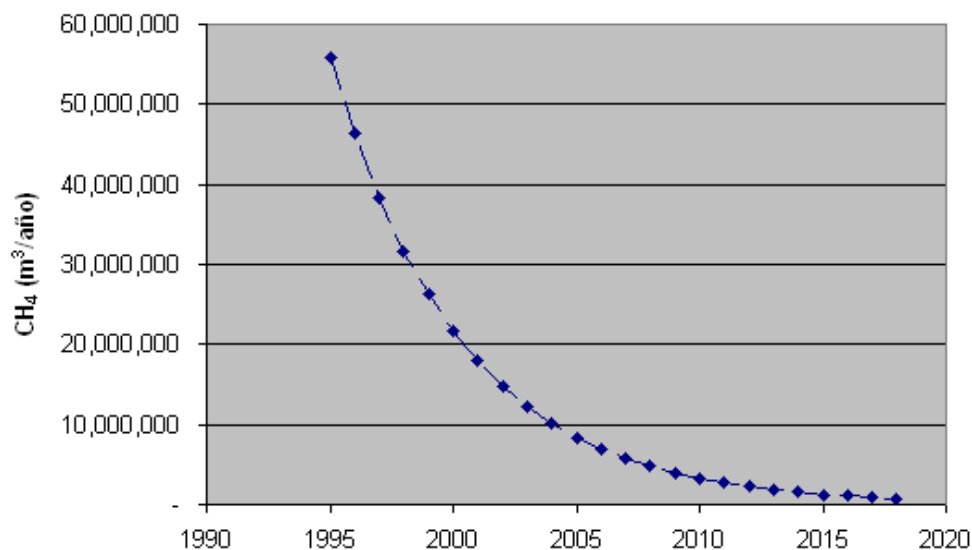
Haciendo un análisis del comportamiento de la producción de CH₄ con un porcentaje de degradación anual de los residuos de 17.26 %¹⁴ y a partir del cierre de las etapas I, II y III, se obtiene la producción de energía anual como lo muestra la *tabla 2* y gráficamente la producción de CH₄ en la *figura 9*:

Tabla 2. Energía anual obtenida a partir de la producción de CH₄ de 1995 – 2018.

Año	Residuos (ton/año)	CH ₄ (m ³ /año)	Energía (GWh/año)
1995 *	678,453	55,924,881	264.09
1996	561,352	46,272,246	218.51
1997	464,463	38,285,657	180.79
1998	384,296	31,677,552	149.59
1999	317,967	26,210,007	123.77
2000	263,086	21,686,160	102.41
2001	217,677	17,943,128	84.73
2002	180,106	14,846,144	70.11
2003	149,020	12,283,700	58.01
2004	123,299	10,163,533	47.99
2005	102,018	8,409,307	39.71
2006	84,409	6,957,861	32.86
2007	69,840	5,756,934	27.19
2008	57,786	4,763,287	22.49
2009	47,812	3,941,144	18.61
2010	39,560	3,260,903	15.40
2011	32,732	2,698,071	12.74
2012	27,082	2,232,384	10.54
2013	22,408	1,847,074	8.72
2014	18,540	1,528,269	7.22
2015	15,340	1,264,490	5.97
2016	12,692	1,046,239	4.94
2017	10,502	865,658	4.09
2018	8,689	716,246	3.38

* Promedio anual de producción de CH₄ durante el periodo 1985 -1994.

Figura 9. Producción de CH₄ de 1995 – 2018.

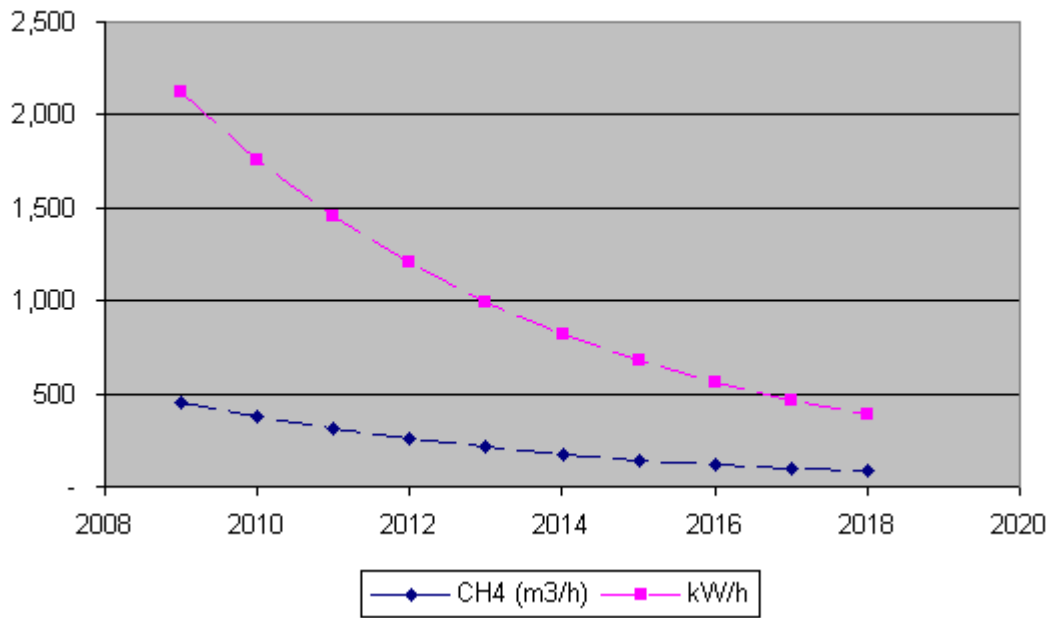


La *tabla 3* muestra el CH₄ disponible para un periodo asociado al potencial de explotación y su respectiva gráfica es la *figura 10*. La vida útil del proyecto depende de la vida útil del sistema de microturbinas, la cual generalmente es de 5 años, es por ello que se está tomando el periodo que comprende de 2009 – 2018 (al sexto año se cambiaría el sistema de microturbinas).

Tabla 3. CH₄ disponible y potencial de explotación durante 2010 – 2018.

Año	CH ₄ (m³/h)	kW/h
2009	450	2,125
2010	372	1,758
2011	308	1,454
2012	255	1,203
2013	211	996
2014	174	824
2015	144	682
2016	119	564
2017	99	467
2018	82	386

Figura 10. CH₄ disponible y potencial de explotación durante 2010 – 2018.



Capítulo III

Cálculo de las principales variables

Las tres primeras etapas del Bordo Poniente pueden producir en promedio 221 m³/h de CH₄. Esto permite una producción promedio de energía eléctrica de 9,161,336 kWh/año. Con el fin de obtener un aprovechamiento óptimo del biogás, la mejor alternativa es centralizar el gas del relleno en un solo lugar. La siguiente sección describe los elementos empleados para extraer el biogás del relleno.

3.1 Diseño de la instalación.

El cálculo del costo total está basado en el diseño seleccionado para la extracción y aprovechamiento del biogás. La siguiente sección describe brevemente los componentes de la instalación.

3.1.2 Sistema de aprovechamiento.

Incluye principalmente una red de aproximadamente 268 pozos verticales de extracción de gas con sus respectivas bombas (Autopumps[®]), como se muestra en la *figura 11*, 3,216 m lineales de tubería de polietileno de alta densidad y un sistema de generación de electricidad de 800 kW por medio de microturbinas.

El número de pozos verticales se calculó de acuerdo a la relación superficie – número de pozos de las experiencias internacionales antes mencionadas en el Capítulo I.

Figura 11. Pozo vertical de extracción con su respectiva bomba (Autopumps[®])



La razón por la que se seleccionaron las bombas Autopump® para la extracción de biogás, es que de acuerdo a la experiencia obtenida en un relleno sanitario en la ciudad de Campbellton, Florida, se evitará con estas bombas la reducción del desempeño de extracción, ya que presentan características de prevención para la inundación en los pozos debida a la condensación del vapor de dióxido de sulfuro, el cual además es muy corrosivo¹⁷.

Las actividades de control para este sistema consisten en un ajuste periódico del flujo de biogás proveniente de los pozos mediante equipo de monitoreo. La planta de extracción está equipada con compresores, lo cuales crean una presión de succión en el sistema, necesario para la extracción del biogás.

Las microturbinas (*figura 12*) son un nuevo tipo de turbinas de combustión que pueden ser usadas en aplicaciones de generación de energía estacionaria. Fueron originalmente desarrolladas en la industria aeroespacial para producir energía auxiliar a la aeronave. Tienen normalmente el tamaño de un refrigerador (*figura 18*) y pueden generar electricidad en un rango que comprende de los 25 a los 500 kW. Se caracterizan además por que pueden trasladarse con facilidad si es que fuera necesario llevarlas a otro relleno sanitario¹⁸.

Figura 12. Microturbinas



¹⁷http://www.qedenv.com/Equipment_Applications/Landfill_Leachate_and_Condensate_Pumping/Case_Study_-_Landfill_Gas_Well_Dewatering/

¹⁸ http://www.swana.org/pdf/swana_pdf_699.pdf

Un sistema de microturbinas que utiliza biogás proveniente de rellenos sanitarios generalmente tiene los siguientes componentes: compresor de biogás, equipo de pretratamiento (para humedad, siloxanos¹⁹ y partículas que se desean remover), microturbinas, centro de control de motores, interruptores, transformador.

La aplicación comercial de las microturbinas de biogás proveniente de rellenos sanitarios comenzó a principios de 2001. Para el verano de 2003, se estima que se usaron alrededor de 100 microturbinas operando en rellenos sanitarios de Estados Unidos de América y en todo el mundo. Los sistemas de microturbinas tienen una vida útil de aproximadamente 5 años²⁰.

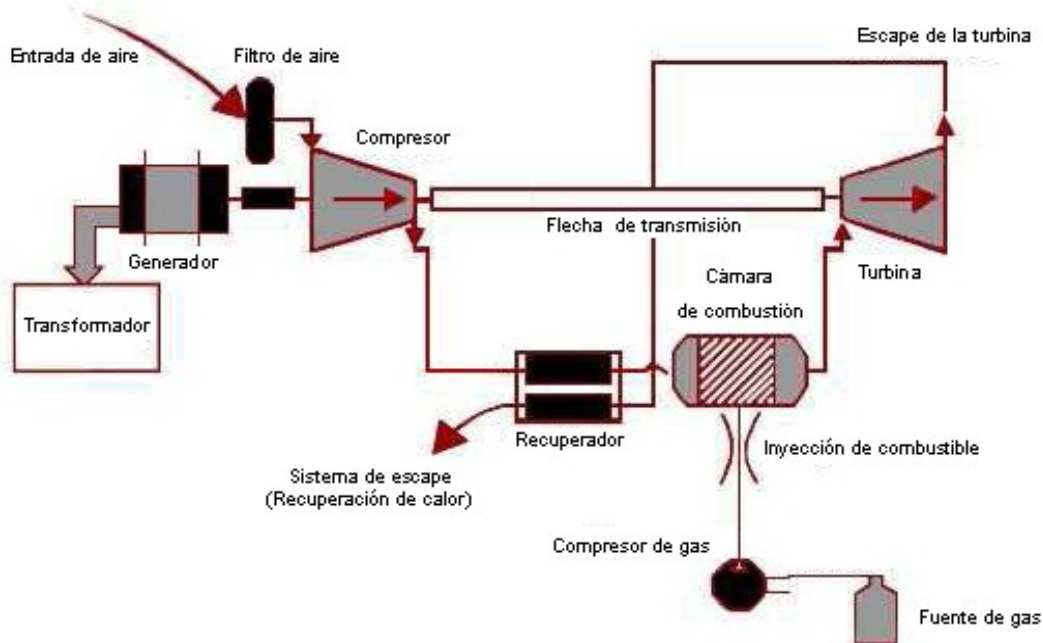
3.1.3 Sistema de microturbinas de biogás para rellenos sanitarios

Dentro de la microturbina, el aire es comprimido y mezclado con el combustible y quemado bajo condiciones constantes de presión.

Los gases calientes resultantes del proceso de combustión son expandidos a través de la turbina, la cual impulsa el generador eléctrico. Las microturbinas están equipadas con recuperadores que toman algo del calor proveniente de los gases de escape y lo transfieren a la entrada de aire que se utiliza para la combustión en la turbina.

Un esquema mostrado en la *figura 13* y un corte transversal en la *figura 14*, ilustran los componentes de un sistema de generación por microturbina.

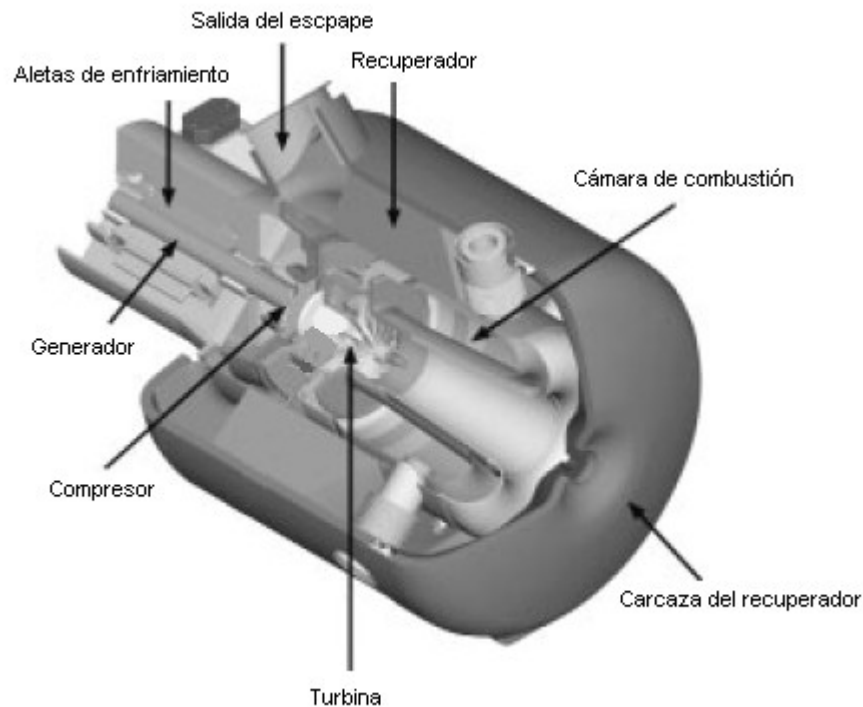
Figura 13. Proceso esquemático de una microturbina.



¹⁹ Son productos químicos en los que los átomos de silicio y oxígeno se adhieren a los hidrocarburos. Son abrasivos y pueden dañar los componentes de la microturbina si no se eliminan a través de los sistemas de pretratamiento de gas mediante carbón activado.

²⁰ http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/microturbine_landfill.pdf

Figura 14. Corte transversal de una microturbina.



3.1.4 Viabilidad económica

La viabilidad económica del aprovechamiento del biogás depende principalmente de los siguientes factores: el costo del terreno, la calidad del biogás, así como la selección del equipo. El criterio económico utilizado para la generación de electricidad mediante biogás está basado en un análisis de valor actual neto. Los principales costos se dividen en: costo del terreno, costo total del equipo e instalación, costos anuales de operación y mantenimiento. El beneficio es el ingreso de las ventas por generación de electricidad y venta de bonos de carbono.

3.1.5 Cálculo de costos

El costo total del terreno se calcula, tomando como precio \$ 11 MN por m² para una superficie de 249 hectáreas, de \$ 27, 390, 000 MN. Es muy importante aclarar que este costo puede variar si se consigue el apoyo de los gobiernos municipales y estatales al involucrarlos en el proyecto, inclusive puede darse el caso de no pagar por el terreno, ya que se trasformaría un pasivo (el problema de la basura) en un capital (beneficio social y ambiental).

El costo total de 3,216 m lineales de tubería de polietileno de alta densidad es de \$ 463,865 MN. Los pozos deben tener una profundidad de 12 m y el costo por m de tubería es de aproximadamente \$ 144.50 MN ²¹,

El costo total de las bombas de extracción es de \$ 802, 535 MN. Cada bomba (Autopump ®) tiene un costo de \$ 1,500 USD ²² y se necesita una por cada pozo de extracción (268 pozos).

El costo total por instalación del sistema de microturbinas (incluyendo el equipo de pretratamiento del combustible) se calcula para los siguientes rangos:

* \$ 4,000 - \$ 5,000 USD por kW para los sistemas más pequeños (30 kW).

* \$ 2,000 - \$ 2,500 USD por kW para los sistemas más grandes (a partir de los 200 kW) ²³.

Para este estudio los costos por la instalación del sistema se calculan en \$ 22,000,000 MN, ya que se necesitará un sistema de 800 kW, debido a que se desea obtener una $\eta_{\text{global}} = 0.765$, con un poder calorífico superior (HHV) de 17 000 kJ/m³ y un flujo másico de 0.06149 m³/s durante 10 años ²⁴.

El costo por operación y mantenimiento del sistema de microturbinas es aproximadamente de \$ 0.02 USD por kWh ²³. A continuación se muestra en la *tabla 4* con los costos por operación y mantenimiento anualizados. Se aprecia cómo disminuyen anualmente los costos en términos del agotamiento esperado del CH₄.

Tabla 4. Costos por operación y mantenimiento en función del agotamiento del CH₄

Año	\$ O y M
2009	372,219
2010	307,974
2011	254,818
2012	210,836
2013	174,446
2014	144,337
2015	119,424
2016	98,811
2017	81,757
2018	67,627
Total	1,832,249

²¹ <http://www.quiminet.com>

²² <http://cee.com/products/remediation/AutoPump/autopumps.pdf>

²³ http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/microturbine_landfill.pdf

²⁴ Çengel, Y, Boles, M, “Termodinámica”, Mc. Graw Hill, México 2007, pág. 80.

3.1.6 Precio medio del kWh.

Tomando el comportamiento histórico del precio medio del kWh para el sector de vivienda de 1996 a 2005²⁵, se pronosticaron los precios mediante el método de “regresión lineal” (figura 15), para el periodo de 2009 a 2017 obteniendo la tabla 5.

Figura 15. Gráfica del precio medio del kWh para el sector vivienda 1996 - 2005.

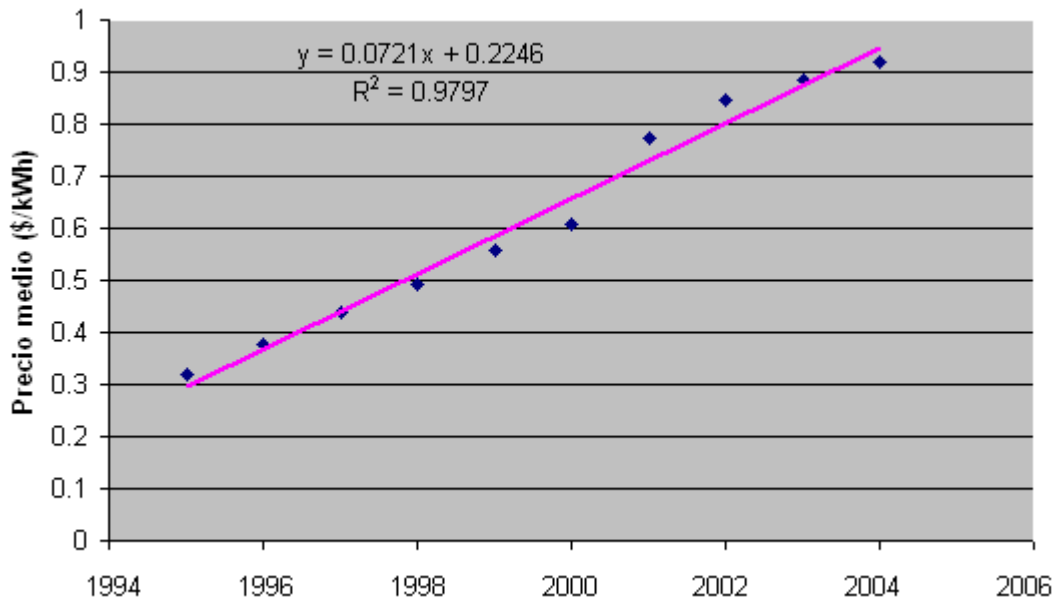


Tabla 5. Precio medio del kWh.

Año	Precio medio (\$/kWh)
2009	1.234
2010	1.3061
2011	1.3782
2012	1.4503
2013	1.5224
2014	1.5945
2015	1.6666
2016	1.7387
2017	1.8108
2018	1.8829

²⁵ <http://www.cfe.gov.mx/es/LaEmpresa/informacionpublica/art7/inforelevpregfrec/pregfrec13a/>

Capítulo IV

Obtención de resultados

4.1 Costos totales

La *tabla 6* muestra los costos totales calculados en el capítulo III.

Tabla 6. Costos totales

Características	Costo (\$)
Terreno 249 hectáreas	27,390,000
Sistema de microturbinas	22,000,000
Operación y Mantenimiento	1,832,249
Tuberías	463,865
Bombas	802,535
Total	52,488,650

4.2 Ingresos por venta de energía eléctrica.

Tomando el precio medio del kWh calculado por el método de regresión lineal expuesto en el capítulo III, la *tabla 7* muestra el ingreso anual por venta de energía eléctrica.

Tabla 7. Ingreso anual por venta de energía eléctrica.

Año	kWh	\$/kWh	\$	\$/kW año
2009	2125	1.234	2,621.68	22,965,921.67
2010	1758	1.3061	2,295.92	20,112,250.31
2011	1454	1.3782	2,004.51	17,559,494.05
2012	1203	1.4503	1,745.30	15,288,790.02
2013	996	1.5224	1,515.85	13,278,822.36
2014	824	1.5945	1,313.61	11,507,230.85
2015	682	1.6666	1,136.03	9,951,606.53
2016	564	1.7387	980.61	8,590,174.57
2017	467	1.8108	845.00	7,402,243.00
2018	386	1.8829	726.80	6,366,762.74
Total			133,023,296.10	

4.3 Ingresos por venta de bonos de carbono

La certificación de reducción de CH₄ y CO₂, se traducirá en bonos de carbono que serán vendidos en el mercado internacional a países altamente industrializados, comprometidos por el Protocolo de Kioto a disminuir la emisión de gases.

²⁶ <http://www.presidencia.gob.mx/prensa/ultimasnoticias/?contenido=29305>

Un bono de carbón es la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero, en este caso CH₄ y CO₂, a los cuales se da un valor comercial que, en el mercado de Certificados de Reducción de Emisiones, se cotiza entre los 4 y los 12 USD por bono, es decir, por tonelada de biogás quemada ²⁶.

Para el cálculo de la *tabla 8* se tomaron en cuenta la densidad del biogás que es de: $\rho = 1.26 \text{ kg/m}^3$ ²⁷, de modo que fuera posible obtener el número de toneladas anuales de CH₄, ya que se conocía el volumen producido anualmente, tal y como se expuso en el capítulo II.

Para el precio de los bonos se tomó en cuenta un promedio de 8 USD por bono con un tipo de cambio promedio de 11 MN por cada USD.

Tabla 8. Ingresos por venta de bonos de carbono.

Año	CH ₄ (ton/año)	Bonos de carbono (\$/año)
2009	4,965.84	436,994.04
2010	4,108.74	361,568.87
2011	3,399.57	299,162.08
2012	2,812.80	247,526.71
2013	2,327.31	204,803.60
2014	1,925.62	169,454.50
2015	1,593.26	140,206.65
2016	1,318.26	116,006.98
2017	1,090.73	95,984.18
2018	902.47	79,417.31
Total	24,444.60	2,151,124.92

4.4 Valor actual neto

Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros. El método, además, descuenta una determinada tasa o tipo de interés igual para todo el período considerado.

La fórmula que nos permite calcular el Valor Presente Neto²⁸ es:

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{I_n - E_n}{(1 + i)^n}$$

²⁷ Desideri U, Di Maria F, Leonardi D, Proietti S. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. *Energy Convers Manage* 2003; 44:1969–81.

²⁸ http://es.wikipedia.org/wiki/Valor_actual_net

I_n representa los ingresos y E_n representa los egresos. E_n se toma como valor negativo ya que representa los desembolsos de dinero. N es el número de períodos considerado (el primer período lleva el número 0, no el 1). El valor $I_n - E_n$ indica los flujos de caja estimados de cada período. El tipo de interés es i , en este caso 20% que es una tasa promedio de interés.

Aplicando el valor actual neto (VAN) o valor presente neto (VPN), se observa que el VAN > 0 , como se observa en la *tabla 9*, lo que significa que la inversión producirá ganancias y por lo tanto el proyecto sería rentable.

Tabla 9. Valor presente neto del proyecto a 10 años.

		$i = 0.2$		
Año	Periodo	$I - E$ (flujo de caja)	$(1+i)^n$	$I - E/(1+i)^n$
2009	0	-27,625,704	1	-27,625,704
2010	1	20,165,845	1.149	17,555,388
2011	2	17,603,838	1.246	14,131,333
2012	3	15,325,480	1.320	11,614,542
2013	4	13,309,180	1.380	9,646,223
2014	5	11,532,349	1.431	8,059,118
2015	6	9,972,389	1.476	6,757,400
2016	7	8,607,370	1.516	5,678,746
2017	8	7,416,471	1.552	4,779,129
2018	9	6,378,553	1.585	4,024,595
		VAN		54,620,770

Conclusiones y recomendaciones

Al comparar el resultado arrojado por el VAN a 10 años, con los costos totales, la diferencia es de \$ 2,132,120 MN, cifra que representa una pequeña ganancia desde el punto de vista de los inversionistas. Sin embargo; como ha sido el enfoque de este trabajo al plantear su objetivo, no sólo se busca un beneficio económico sino también ambiental y social, cuestiones que definitivamente se han conseguido mostrar.

Como se pudo observar, una variable que impacta al cálculo de los costos totales es el precio del terreno. Es tan determinante este costo que de él depende en gran medida la viabilidad económica del proyecto. Es por ello que se debe buscar la manera de poder involucrar a los gobiernos estatales y municipales de modo que se vea que este tipo de proyectos presentan beneficios relacionados con el mejoramiento en la calidad de vida; disminución en la emisión de contaminantes nocivos para la salud humana; oportunidades locales de empleo; satisfacción por el dominio de la comunidad y cohesión social; así también, lo que para estos gobiernos representa un pasivo, puede ser transformado en un capital.

A manera de ejercicio, se varía el precio del terreno a la mitad o inclusive sin costo alguno, para obtener la *tabla 10*:

Tabla 10. Impacto del precio del m² del terreno sobre la rentabilidad del proyecto (cifras en MN)

Precio (\$/m ²)	Costo total	VAN	Diferencia
11	52,488,650	54,620,770	2,132,120
5.5	38,793,650	82,010,770	43,217,120
0	25,098,650	82,010,770	56,912,120

Al ver el comportamiento de esta muestra que representan las primeras tres etapas del Bordo Poniente, puede vislumbrarse el gran potencial que representan los desechos depositados en la cuarta etapa, al darle un enfoque puramente económico.

Los resultados obtenidos muestran que el aprovechamiento del biogás producido por el Bordo Poniente es una opción muy atractiva para el manejo de los residuos urbanos. Además, el uso de este biogás como fuente de combustible, es desde un punto de vista ambiental, una opción viable, ya que fomenta el uso de energías renovables y reduce el efecto invernadero producido por las emisiones de CH₄ y CO₂.

Estos resultados indican que es esencial para el actual sistema energético, tomar una dirección hacia el desarrollo de un uso cada vez más grande de bioenergía como un sustituto de los combustibles de origen fósil para alcanzar una sustentabilidad ambiental. Por lo tanto, si los recursos bioenergéticos nacionales no son desarrollados en un tiempo adecuado, México podría perder la oportunidad de diversificar el sistema energético del país. Al mismo tiempo, no se crearán fuentes de empleo y permanecerán por mucho tiempo más los problemas asociados con el subdesarrollo de las áreas rurales y los de naturaleza social asociados con la pobreza. El uso de la bioenergía permitiría a México promover estrategias de desarrollo sustentable, particularmente en el sector rural.

Bibliografía

Desideri U, Di Maria F, Leonardi D, Proietti S. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. *Energy Convers Manage* 2003; 44:1969–81.

Zamorano M, Pérez J, Pavés I, Ramos A. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain 2005; 910-921.

Islas, J. Manzini, F. Masera, O. A prospective study of bioenergy use in Mexico. CIE, UNAM. *Energy* 32 2007; 2306-2320.

Ghilardi A, Riegelhaupt E, Saldaña R. “Los Recursos Bioenergéticos en México”, Ciudad de México Mundiprensa; 2005.

http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf

http://transparencia.nl.gob.mx/AdministracionParaestatal/OrganismosD/SIMEPRODESO/SIMEPRODE_F01_05_10_08.doc

<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>

<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/194/dpnpma.html>

[http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/22121975\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/22121975(1).pdf)

<http://www.coparmex.org.mx/upload/comisionesDocs/2006-05-30%20Energ%C3%ADas%20renovables%20en%20m%C3%A9xico1.ppt#281,24,Incentivos Fiscales>

http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_credit

http://www.obras.df.gob.mx/servicios_urbanos/residuos/rec_trans_sel_final.html

http://sedesol2006.sedesol.gob.mx/subsecretarias/desarrollourbano/sancho/documentos/Alcances/Residuos_Solidos_Urbanos.pdf

http://www.qedenv.com/Equipment_Applications/Landfill_Leachate_and_Condensate_Pumping/Case_Study_-_Landfill_Gas_Well_Dewatering/

http://www.swana.org/pdf/swana_pdf_699.pdf

Çengel, Y, Boles, M, “Termodinámica”, Mc. Graw Hill, México 2007

http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/microturbine_landfill.pdf

<http://www.quiminet.com>

<http://cee.com/products/remediation/AutoPump/autopumps.pdf>

<http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/informacionpublica/art7/inforelevpregfrec/pregfrec13a/>

<http://www.presidencia.gob.mx/prensa/ultimasnoticias/?contenido=29305>

http://es.wikipedia.org/wiki/Valor_actual_netto