UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS INPONETUR VIRILIS TOGA. 1948

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE ELECTROENERGÉTICA

TRABAJO DE DIPLOMA

GENERACIÓN UTILIZANDO BIOGÁS COMO FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA (RSU)

.

Autor: Frank Abel Guerén Sabino
Tutor: Dr. Carlos de León Benítez

Santa Clara

2009

"Año del 50 Aniversario del triunfo de la Revolución"

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA

”Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

GENERACIÓN UTILIZANDO BIOGÁS COMO FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA (RSU)

Autor: Frank Abel Guerén Sabino

E-mail: gueren@uclv.edu.cu

Tutores: Dr. Carlos de León Benítez

E-mail: charle@uclv.edu.cu

Santa Clara

2009

“Año del 50 Aniversario del triunfo de la Revolución

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicado sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

"La tierra no pertenece al hombre; el hombre pertenece a la tierra. Lo que el hombre haga a la tierra, se lo hace a sí mismo"

Jefe Indio, Seattle, 1854

DEDICATORIA

A mi madre, no solo por darme la vida, sino por enseñarme a vivirla

A mi padre, por enseñarme cómo llegar a las estrellas si cursar caminos llanos

A mis abuelos, por la comprensión

A mis tios, los de aquí y los de allá

A mi hermano, por los “salves”

A Oliver Sosa, seguir tu ejemplo y “competir” contigo me ha hecho mejor

A Irialis, por todo, Por lo que viene.

A Basilio, por estar

A los Amigos que de una forma u otra me ayudaron a llegar hasta el final.

Al pueblo que me vió nacer, esta tesis es para el bienestar de todos

F.A.G.S.

Fue largo el camino pero vale la pena

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por supuesto

A mi hermano:

Ser tu ejemplo no es mi meta.

Todo lo cotrario;

Que tu seas el mio.

A Alvaro Hernández y Yunier García por los Matlab

A los Compañeros de Servivios Comunales Municipal de Ciego de Avila, La Empresa de Invetigaciones y Proyectos Hidráulicos(INRH) y el Instituto de Meteorología, por la ayuda y el buen trato.

Al Dr. Carlos de León Benítez por guiarme.

TAREA TÉCNICA

Desarrollar un método para evaluar el potencial energético de los RSU y aplicarlo al municipio de Ciego de Ávila para la inserción de Cuba en los Mecanismos de Desarrollo Limpio

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el estudio del potencial del municipio Ciego de Ávila para la aplicación de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) del protocolo de Kyoto, en el caso particular del comercio de emisiones de CO2 . Se hace una breve introducción al tema para profundizar en el mismo y ver su gran importancia para el desarrollo del país .Se expone la metodología para el cálculo de las emisiones de metano (CH4), como gas de efecto invernadero, que se emite a partir de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Además se realiza la estimación de los costos y beneficios del proyecto. Se selecciona el equipo de generación de energía eléctrica a poner en funcionamiento a partir del gas que se obtiene de los RSU en el municipio.

.

TABLA DE CONTENIDOS

Santa Clara ii

PENSAMIENTO i

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

TAREA TÉCNICA iv

RESUMEN v

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. Búsqueda Bibliográfica 4

1.1 Tecnologías para el procesamiento 4

1.2 Incineración 5

1.3 Pirólisis 6

1.4 Tecnología de Gasificación por medio de arco de plasma 7

1.5 Relleno sanitario. 8

1.5.1 Determinación del área y la capacidad del relleno. 9

1.5.2 Formas comunes para Rellenos Sanitarios 11

1.5.3 Factores que Influyen en la Generación de Gases de Relleno Sanitario (GRS) 13

CAPÍTULO 2. Modelos Predictivos 16

2.1 Caracterización de los modelos 16

2.2 Modelo de simulación EPA de primer orden para estimación de la generación de metano 18

2.2.1 Desarrollo del valor de Lo y k..... 19

2.2.3 Ventajas y desventajas 19

2.3 Análisis del Método Mexicano..... 20

2.3.1Consideraciones de ajustes para Lo 21

2.3.2 Desarrollo del valor de k 22

2.3.3 Eficiencia del sistema de recolección..... 23

2.3.4 Ventajas y desventajas 23

2.4 Análisis del método de Scholl Canyon 23

2.4.1 Desarrollo del valor de k 24

Tabla 2.1 Valores de k según precipitaciones anuales y condición del residuo 26

2.4.2 Consideraciones de ajustes para Lo 26

Tabla 2.3 Vida media de los residuos 28

2.4.3 Ventajas y desventajas 28

CAPÍTULO 3. Aplicación y Resultados del Modelo Scholl- Canyon 30

3.1 Datos de entrada para la aplicación del modelo Scholl-Canyon 30

3.2 Dimensiones de un Relleno Sanitario para las condiciones del municipio ……..30

3.3 Cálculo de generación de metano en las condiciones de Ciego de Ávila. ……..31

3.4 Beneficios medioambientales 33

3.5 Factores que Determinan la Selección de Utilización del GRS 34

3.6 Factores que Determinan la Selección de Generación de energía eléctrica 35

3.7 Selección del equipo a instalar 37

3.8 Costos del proyecto 40

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 42

Conclusiones 42

Recomendaciones 42

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

ANEXOS 45

Anexo I Hoja de cálculo para el caso máximo 45

Anexo II Hoja de cálculo para el caso mínimo 46

INTRODUCCIÓN

En el ambiente generalmente anaeróbico de los rellenos sanitarios, el metano se produce por descomposición bacteriana del material orgánico, tales como residuos de jardín, desechos de comida, del hogar y papel. El metano genera riesgo de explosión en concentración volumétrica igual o mayor de 5%, además de ser un poderoso gas de efecto invernadero. El biogás también contiene compuestos orgánicos volátiles que contribuyen a la formación de ozono en las capas inferiores de la atmósfera.

La estimación de la producción de emisiones contaminantes, en particular del biogás de rellenos sanitarios, plantea una expectativa ambiental y económica muy importante, que obliga a tener una aproximación, bien sea del impacto ambiental que generan, y/o del potencial técnico-económico que permita su valoración, mediante su recolección y utilización energética.

El comportamiento de la generación de biogás a partir de cada RSU y estimado por la simulación de los modelos en función del tiempo de disposición, representa el uso potencial para aplicaciones energéticas, lo que amplía la oferta de la canasta y acopia experiencia y desarrollo tecnológico sobre el uso de energías no convencionales.

Entre los beneficios de los proyectos de recuperación energética de biogás de los rellenos sanitarios, están: i) reducción de los riesgos de incumplimiento de la normatividad ambiental, ii) ingreso por venta del energético o de la energía recuperada, iii) generación de empleo, iv) reducción del riesgo de incendio, v) reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de la formación de ozono en las capas inferiores de la atmósfera y v) reemplazo de energéticos

convencionales. El beneficio global se centra en la eliminación de una fuente importante de calentamiento de la biosfera.

Los rellenos sanitarios se pueden describir como un inmenso biodigestor anaeróbico que genera metano; este gas tiene un potencial de calentamiento atmosférico (GWP) 21 veces superior al del CO2. Como ejemplo de otras fuentes de metano, están los cultivos de arroz, las plantas anaeróbicas de tratamiento de aguas residuales y el ganado bovino, y, en general, la descomposición anaeróbica de la materia orgánica.

Desde la óptica de desarrollo sostenible, el análisis de la cadena de producción, uso y disposición de bienes generadores de RSU debe incluir realidades y percepciones que afectan directa o indirectamente todos los estamentos sociales, políticos y económicos y debe aportar sus experiencias, objetivos y metas como base de discusión para una gestión ambientalmente amigable, gestión que debe ser receptiva también a los aportes multidisciplinarios y a la participación comunitaria. En este sentido, el diagnóstico de la situación de los RSU y las propuestas de mejoramiento del manejo integral de los RSU es transversal a todo el desarrollo socioeconómico de las comunidades, de los sectores productivos y de la gestión de las entidades gubernamentales, particularmente las asociadas al medio ambiente y al sector energético.

Las consideraciones que se deben estudiar para la implementación de un proyecto de captación y/o uso de biogás de rellenos sanitarios, están asociadas con la cadena productiva de la generación de RSU. En este sentido, deben evaluarse cuidadosamente todos los componentes tecnológicos -que van desde los entornos geográficos para la ubicación del relleno hasta la idiosincrasia de producción y consumo de bienes y servicios- para que se constituyan en un soporte sólido que sirva como insumo para el diseño de la ingeniería de proceso y la ingeniería de detalle de los proyectos. Esta dinámica ha generado una oferta tecnológica en continuo desarrollo, con particularidades y limitaciones según cada contexto. Es así como se han desarrollado experiencias exitosas, entre las cuales se pueden mencionar las de países como Estados Unidos, México, Chile, Italia, Holanda, España y los países nórdicos.

Esta tesis contiene una propuesta metodológica producto del análisis de la información disponible -conceptual y de trabajos desarrollados y en vías de desarrollo, mediante la utilización del modelo predictivo de estimación de generación de biogás Scholl Canyon, asi como la valorizacion energetica de los gases de Relleno Sanitario(GRS),para la inserción de Cuba en los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)

Objetivos Generales:

- Desarrollar un estudio de las potencialidades de generación de gas metano a partir de los Residuos Sólidos Urbanos.
- Desarrollar un esudio de las potencialidades de generación eléctrica a partir del gas de relleno sanitario y la posible inserción en el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto.

Objetivos específicos:

- Proponer un modelo para la evaluación del potencial de los RSU
- Evaluar las ventajas que representan los RSU para la inserción de Cuba en los MDL
- Evaluar la posibilidad de generación eléctrica a partir de los GRS

CAPÍTULO 1. Búsqueda Bibliográfica

Los RSU son considerados una fuente de energía renovable ya que son inherentes a la actividad humana. Su cantidad y composición son función de las características de la comunidad que los genera: capacidad económica, costumbres alimenticias, tipo de ciudad (industrial o agrícola), etc.

El aprovechamiento energético de los RSU es una práctica generalizada en todo el mundo. Son diversos los proyectos extendidos por todo el orbe para minimizar los efectos de los desechos humanos para el medio ambiente y a la vez obtener una ventaja energética.

En este capítulo se realizará un análisis de las técnicas más utilizadas para tratar los RSU y se propondrá las más factible para aplicar en nuestro país.

1.1 Tecnologías para el procesamiento

El mayor problema de los RSU es sin dudas el efecto ambiental que provocan debido a los gases que vierten a la atmósfera.

Existen cuatro técnicas que son las más utilizadas en el mundo para disminuir estas emisiones y a la vez obtener una ventaja energética

- Incineración
- Pirólisis
- Gasificación por medio de arco de plasma
- Rellenos Sanitarios

1.2 Incineración.

La incineración es uno de los procesos térmicos que pueden aplicarse en el tratamiento de los residuos sólidos urbanos para disminuir su cantidad y aprovechar la energía que contienen. Los aspectos medioambientales que causan mayor preocupación son las emisiones atmosféricas, especialmente las dioxinas , furanos, y las escorias y cenizas formadas. La heterogeneidad de los materiales a tratar y los niveles de emisión impuestos por las normas legales ha obligado a desarrollar o adaptar unas tecnologías específicas para este proceso. Los aspectos socioeconómicos ponen de manifiesto que se requieren elevadas inversiones, grandes costos de operación y, en general, una fuerte oposición popular [1].

La combustión de los residuos sólidos es un proceso complejo en el que, a los diferentes fenómenos de secado, deshidratación, gasificación, etc., se une la heterogeneidad de la alimentación. En este proceso es indispensable operar con un exceso de aire parea asegurar la combustión completa y para evitar que la temperatura sea demasiado elevada (T >1100ºC) y pueda ablandar y fundir las cenizas y escorias. La formación de óxidos de nitrógeno también se reduce cuando se controla la temperatura de la cámara. Para que la combustión sea completa es necesario conseguir un buen contacto entre los reactantes, es decir, entre el aire y los sólidos y que el tiempo de permanencia de cada uno de los materiales sea, en las condiciones de temperatura y presión parcial de oxígeno fijadas, superior al de conversión completa

Para asegurar la destrucción de las moléculas orgánicas complejas, que pueden salir con los gases de combustión, se someten estos gases a un proceso adicional en el cual la temperatura es superior a 850ºC durante un tiempo no inferior a 2 segundos y con un contenido de oxígeno superior al 6%. Estos gases se introducen en una caldera de recuperación para producción de vapor con el que pueda obtenerse energía eléctrica por medio de una turbina. En ocasiones se combinan con turbinas de gas para mejorar el rendimiento energético de la planta [1].

Las emisiones procedentes de una incineradora deben cumplir los límites que fijan las normas legales por lo que es preciso dotar a la instalación de una serie de técnicas capaces de destruir o retener los diferentes tipos de contaminantes. A medida que van disminuyendo los límites de las emisiones aumenta la complejidad del proceso de depuración. Independientemente de los niveles fijados es preciso disminuir la concentración de un conjunto de contaminantes [1].

1.3 Pirólisis.

En la actualidad los neumáticos usados representan un gran problema en los vertederos controlados. La raíz de dichos problemas es el carácter de no biodegradabilidad que tienen. La diferencia que presentan con respecto a las latas y plásticos se debe a que los neumáticos usados poseen como característica principal, la elasticidad, lo que provoca una imposibilidad de compactación, como consecuencia de ello, los neumáticos ocupan un gran espacio en los vertederos, y además éstos constituyen un foco de desarrollo de colonias de insectos y roedores, representando un serio riesgo de incendio de graves consecuencias medioambientales.

Un buen sistema de gestión medioambiental no implica sólo la eliminación de los residuos sino también la posibilidad de transformarlos en otros productos o bien volverlos a usar para el mismo fin. En este caso en concreto, la eliminación conlleva una serie de problemas, por lo que se tendrían que estudiar otras alternativas como la reutilización o valorización de las materias primas. Las alternativas que en la actualidad están en vigor en el mundo son el recauchutado, la trituración, la incineración (con problemas de contaminación).

En concreto la pirólisis de neumáticos es interesante ya que la composición de éstos: caucho, negro de humo y acero, nos permite obtener hidrocarburos ligeros a partir del caucho mediante la rotura de las cadenas poliméricas que lo conforman., además de realizar una separación del negro de humo (utilizado como combustible) y de hierro (para fabricación de nuevos neumáticos).

Este proceso presenta una serie de alternativas con relación a la reutilización de componentes que al mismo tiempo suponen un ahorro en materias primas y una

actitud más respetuosa con el medio ambiente.[2]

Algunas de estas alternativas son:

• Pirólisis en condiciones controladas.

• Reutilización de los líquidos y gases combustibles.

• Acumulación y venta del hierro.

1.4 Tecnología de Gasificación por medio de arco de plasma.

La Gasificación por plasma emplea temperaturas muy altas en condiciones de ausencia casi total de oxígeno para descomponer los materiales del desecho a una estructura molecular básica. La gasificación de plasma no quema como hacen las calderas. Convierte los desechos orgánicos a un gas compuesto de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H) que todavía contiene toda la energía del desecho. Convierte los desechos inorgánicos a un vidrio inerte.

El plasma se considera un estado cuarto de la materia. La electricidad va a una antorcha, que tiene dos electrodos, creando un arco. El gas inerte se pasa por el arco, calefacción del gas del proceso a temperaturas internas de 25,000 grados F.

Los quemadores o antorchas operan a 5,000-8,000 grados F. A causa de estas altas temperaturas el desecho es completamente destruido y transformado a sus componentes básicos de elementos. No hay alquitranes o furanos. En estas altas temperaturas todo metal llega a ser fundido y fluyen a la parte inferior del reactor. Los inorgánicos tal como sílice, tierra, concreto, vidrio, gravilla, etc., son vitrificados y fluyen por la parte inferior del reactor.

No hay cenizas que queden. El reactor de plasma no discrimina entre diferentes tipos de desecho, puede procesar cualquier tipo de desecho incluyendo líquidos. La única variable es la cantidad de energía que requiere para procesar el desecho y por supuesto también tiene un efecto en la cantidad de energía disponible para exportación. Por esta razón, no es necesario separar ningún tipo de desecho, de cualquier forma puede ser procesado, menos el desecho nuclear [3].

El vapor del intercambiador de calor va a una turbina donde es convertido a electricidad. La electricidad generada por el vapor proporciona la mayor parte de este tipo de energía requerida internamente la cual representa únicamente el 7% de la producida, de tal forma que queda un 93% de energía exportable. El sistema es capaz de generar todas sus necesidades internas.

El gas combustible va a una turbina ciclada de gas / vapor donde se usa para producir electricidad. Todo el calor disponible del proceso es usado para hacer electricidad o vapor. La temperatura de descarga de la turbina de gas llega a 270 grados F, cualquier vapor (muy poco) de baja presión no usado en el proceso, es condensado o se utiliza para hacer agua destilada en la unidad de MED (Múltiple-Efficet Destilation). Designado con producción de electricidad, una tonelada de desecho puede exportar aproximadamente 1MW, dependiendo a la cantidad de humedad [3].

1.5 Relleno sanitario.

El relleno sanitario es un método para disposición final de basuras en el suelo, que no determina deterioro al medio ambiente, a la salud ni a la seguridad de la población. Utilizando principios de la Ingeniería, en el relleno se confinan las basuras en áreas reducidas, mediante compactación (disminución de volumen), para luego cubrirlas diariamente con una capa de tierra de espesor adecuado incluyendo hoy en día modernas técnicas de extracción y purificación del gas metano generado, el cual en décadas pasadas generaba graves problemas. El relleno sanitario, práctica muy extendida en el mundo para eliminar las enormes cantidades de desperdicios generados en las grandes ciudades, que creaban muchos problemas, entre los cuales figuraba el ambiental, por muerte de la vegetación que se encontraba en las zonas cercanas, malos olores que molestaban a los residentes y explosivas mezclas de gases que se acumulaban en los sótanos de la vecindad.

Aún cuando el método es de una gran simplicidad, su planificación y puesta en marcha presenta una serie de problemas que muchas veces resultan de difícil abordaje. Entre ellos está la selección del lugar o de los sitios donde se va a

realizar.

1.5.1 Determinación del área y la capacidad del relleno.

Antes de buscar un lugar para un relleno, se debe calcular la cantidad de basura que será colocada en él. Cada localidad debe hacer un estudio de la producción de basura per cápita (PPC) que será la base para todo diseño de infraestructura concerniente al manejo de los desechos sólidos. Si se aprovecha del compostaje/ lombricultura y del reciclaje, se disminuye la cantidad de basura que será dispuesta en el relleno, lo que extiende su vida útil y, por consecuencia, bajan los costos del manejo de desechos sólidos .

La capacidad necesaria se calcula de la siguiente manera:

$$V_{basura} = PPC \bullet N \times 365 \times t / \mathrm{p} \qquad 1.1$$

$$V_{relleno} = 1.3 \times \mathrm{V}_{\mathrm{basura}} \qquad 1.2$$

V_{basura} : Volumen de la basura

$V_{relleno}$: Volumen necesario para el relleno

PPC: Producción diaria de basura per cápita

N: Número de habitantes de una ciudad

t: Vida útil del relleno (años)

ρ: Densidad de la basura

La densidad de basura varía según su estado de compactación. Generalmente, se puede resumir como siguiente:

Basura en el recipiente domiciliario: 105 - 210 kg/m3

Basura en el recolector: 350 - 630 kg/m3

Basura compactada en el relleno manual: 400 - 600 kg/m3

Basura compactada mediante maquinaria: 600 - 810 kg/m3

La densidad de basura varía según su estado de compactación. Se multiplica el volumen de basura con el factor 1.3 para obtener el volumen necesario del relleno, considerando que se añade material de cobertura. La vida útil debería ser más de 10 años, caso contrario, no se justifican los gastos para la adquisición y preparación del terreno. Es óptima una vida útil mayor de 20 años. Se recomienda considerar el desarrollo demográfico cuando se calcula la producción de basura en los años subsiguientes.

Del volumen necesario, se puede calcular el área que se necesita para el relleno. El cálculo del área depende de tres factores importantes:

- Volumen necesario

- Relleno manual o relleno compactado con maquinaria

- Tecnología de tratamiento de las aguas lixiviadas

Si se cuenta con maquinaria para la compactación de la basura, el relleno se puede diseñar como una gran colina artificial, lo que permite un uso óptimo del terreno. El área necesaria se calcula de la manera siguiente para el relleno compactado:

$$A_{basura} = V_{relleno} / f \quad 1.3$$

A_{basura} : Área necesaria para el cuerpo de basura (ha)

$V_{relleno}$: Volumen necesario para el relleno (m3)

f: Factor Volumen/área.

Ese factor se calcula como 10 m3/m2 (equivalente a 1 millón m3/ha)

El factor volumen/área de 10 m3 de basura/ 1 m2 de área ya incluye los taludes, considerando que el cuerpo de basura es pocas veces más elevado que 30 m y

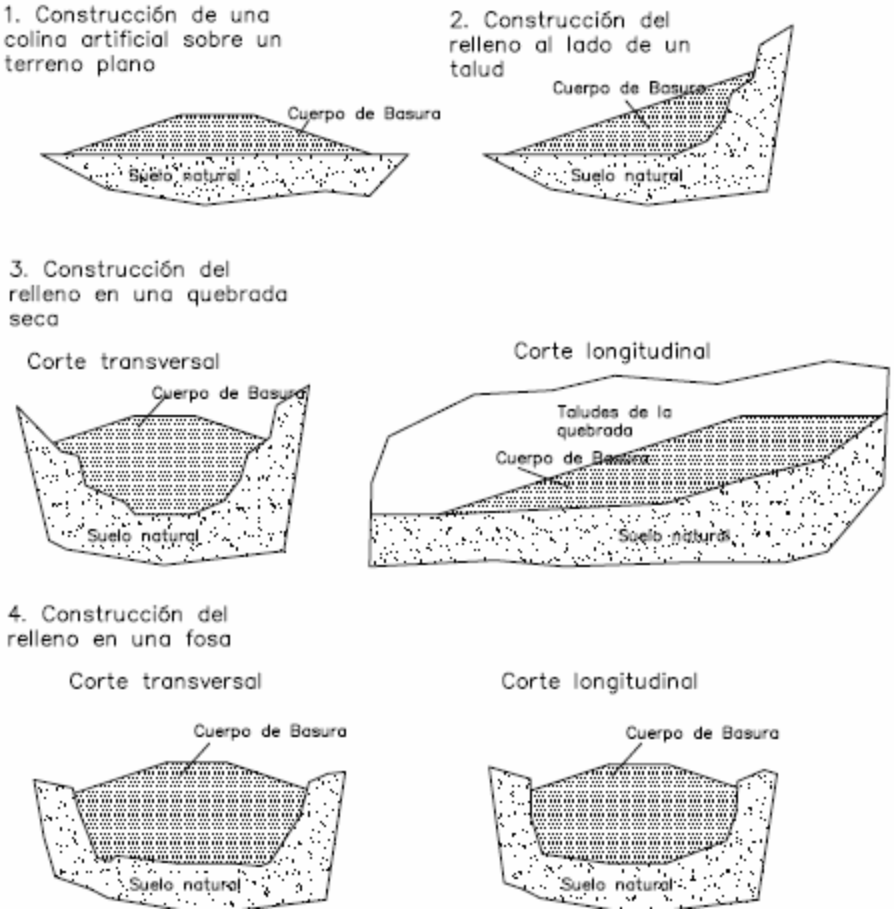
que el talud debe tener una pendiente de 18° o menos. Ese factor puede ser más elevado para rellenos muy grandes, pero generalmente es en el orden dicho[4].

1.5.2 Formas comunes para Rellenos Sanitarios.

La forma del relleno sanitario depende de la topografía del terreno previsto para ese uso. Las formas más comunes para un relleno sanitario son

- Colina artificial sobre un terreno plano
- Relleno en una quebrada seca
- Relleno al lado de un talud
- Relleno de un hueco o una fosa

Formas posibles del cuerpo de basura en un relleno equipado con compactadora



Existen además formas típicas para construir rellenos de forma manual pero éstos serían pequeños y de poco grado de compactación por lo que la cantidad de basura recolectada sería poca y la vida útil se acortaría.

El relleno de una fosa se realiza generalmente en lugares donde ya existen fosas causadas por una actividad anterior, por ejemplo, fosa de mina cantera, que se pueden utilizar para la disposición final de los desechos sólidos. Es verdad que no se recomienda ese tipo de relleno por las causas siguientes:

- El acceso con equipamiento (compactadora, excavadora etc.) es difícil.

- No hay como evacuar las aguas lixiviadas; se deben bombear, lo que aumenta los costos operativos. Si no se bombean, causan contaminación de las capas freáticas y transforman el cuerpo de basura en un pantano.

- En muchos casos, el nivel de la más alta capa freática es arriba del fondo de la fosa. En ese caso, las aguas lixiviadas se mezclan directamente con las aguas subterráneas y las contaminan. La evacuación de las aguas lixiviadas es más fácil en los rellenos construidos en una quebrada o al lado de un talud. Aquí surge otro problema: la estabilidad del suelo se logra más difícilmente; cuando hay taludes fuertemente inclinados o sitios donde existen fuentes de agua bajo del cuerpo de basura, pueden ocurrir caídas de terreno (en el relleno serían caídas de basura). Se debe calcular muy bien el talud del cuerpo de basura para eliminar ese riesgo; además se debe estar seguro que no hay nacimientos de agua en el terreno. Si se hace un relleno al lado de un talud o en una quebrada, el drenaje de las aguas de lluvia es muy importante.

Desde el punto de vista de la seguridad y control de emisiones, la topografía más apta es el área plana. Aquí se debe solamente nivelar el terreno para asegurar una pendiente mínima a fin de evacuar las aguas lixiviadas por pendiente natural. La desventaja del terreno plano es que ese tipo de terreno ya se utiliza en muchos casos para la agricultura o urbanizaciones y tiene un precio más elevado que los

terrenos inclinados. Especialmente en la Sierra es casi imposible encontrar un terreno plano con una extensión suficiente para la construcción de un relleno sanitario [4].

1.5.3 Factores que Influyen en la Generación de Gases de Relleno Sanitario (GRS).

El GRS es generado como resultado de procesos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren dentro del residuo. Debido a la naturaleza orgánica del residuo húmedo, el proceso microbiológico es el que gobierna el proceso de generación. Estos procesos son sensibles a su entorno y por lo tanto, existe una amplia gama de condiciones naturales y propiciadas por el hombre que afectan la población microbiana y consecuentemente, la tasa de producción del GRS. Estudios de corto plazo adelantados en rellenos de gran tamaño, en los que se usaron datos generados mediante pruebas de extracción de GRS, indican un rango de producción del GRS entre 0.05 y 0.40 m3 de GRS por kilogramo de residuo dispuesto en el relleno. La masa de residuo representa tanto los materiales sólidos (75-80% por masa) como la humedad (20-25% por masa). Este rango depende del contenido orgánico del residuo colocado en el relleno. El rango de los valores de producción de GRS puede a primera vista no ser demasiado grande, sin embargo, usando la base de población en ALC y el valor del combustible del GRS, la cantidad anual que se produciría sería del orden de decenas de millones de metros cúbicos de gas natural cada año. Un gas natural tipo gasoducto tiene aproximadamente el doble de poder calorífico o contenido de combustible que el GRS.

La composición del residuo es el factor más importante en la evaluación del potencial de generación de GRS de un sitio específico. El máximo volumen del GRS depende de la cantidad y contenido orgánico dentro de la masa de residuo debido a que es precisamente la descomposición de los residuos orgánicos la fuente de todo el GRS que puede generar el relleno. Otros factores que influyen en la tasa de producción del GRS son el contenido de humedad; contenido de nutrientes; contenido de bacterias; nivel de pH; temperatura; y el diseño y planes de operación del sitio específico. Los residuos producidos en ALC típicamente

tienen más alto contenido orgánico y de humedad que la mayoría de residuos de Norte América o Europa, por lo que se esperaría una generación de GRS a unas tasas más elevadas.

La humedad es el principal factor que limita la tasa de descomposición del residuo . Las condiciones de humedad dentro del relleno son una función de muchos factores. Los rellenos son típicamente construidos y llenados siguiendo un patrón secuencial por capas. Este aspecto es importante para comprender como la humedad se mueve dentro y a través del residuo. El efecto de la disposición por capas tiende a producir sustancialmente diferentes características de flujo en relación con el movimiento de lixiviados y a la infiltración de agua dentro del relleno. El control del contenido de humedad y de los otros factores que influyen en la población de bacterias que producen el GRS puede tener un gran impacto en el porcentaje del GRS total que es producido, y asimismo en la tasa a la cual es producido. Igualmente, la tasa de producción del GRS puede en cierta forma ser objeto de control mediante sistemas de manejo de residuos bien diseñados. Los rellenos sanitarios convencionales como los desarrollados en Norte América en los 70s y 80s son referenciados generalmente como “cámaras secas” (“dry tombs”, en Inglés) debido a que la alternativa de diseño adoptada tenía como propósito evitar que el agua entre en contacto con el residuo y así minimizar incursiones de lixiviados dentro del agua subterránea. Sin embargo, esta práctica también limita la tasa de actividad anaeróbica dentro del residuo. La actual tendencia es hacia el uso de la tecnología de biorreactor para rellenos sanitarios mediante la cual se aumenta la cantidad de agua que entra en contacto con el residuo y en cierta forma se estabiliza más rápidamente la masa de residuos. Esta tecnología puede producir grandes tasas iniciales de generación del GRS pero a expensas de un decrecimiento repentino de la misma después de unos pocos años**.**

Para efectos de una caracterización inicial del sitio, la producción del GRS puede ser simplificada en función del volumen, edad y tipo de residuo, y de su contenido de humedad. El volumen de gases de efecto invernadero (GHG) es directamente proporcional al potencial de generación del GRS. Esto también tiene repercusiones en otros potenciales impactos relacionados con olores y seguridad

pública. En general, entre más gas sea producido mayor será la probabilidad de que surjan problemas relacionados con salud, seguridad y molestias por olores; pero al mismo tiempo, esta situación conlleva una factibilidad económica más favorable para la utilización del GRS.

El relleno puede ser entonces clasificado como seco o húmedo. Un relleno seco se descompondrá más lentamente que uno húmedo y por consiguiente la tasa de producción del GRS será más baja, y el tiempo de producción más largo. Entre los factores que inciden en el contenido de humedad de un relleno están la precipitación y temperatura del sitio, el tipo de cobertura del relleno, las condiciones de la cobertura (p.e., pendiente, continuidad), el tipo de sistema de recolección de los lixiviados, y el tipo de membrana impermeabilizante del relleno. La clasificación del sitio como seco o húmedo depende principalmente de la cantidad de precipitación que se infiltra dentro de la masa de residuo. Una aproximación conservativa para clasificar un sitio como seco o húmedo es la que se basa en el promedio anual de lluvias. Un relleno en el que una porción significativa del residuo se localiza dentro de un medio combinado de agua subterránea/lixiviados puede ser considerado como un sitio húmedo. Los sitios localizados en áreas con precipitaciones menores de 500 mm/año, se clasifican como sitios relativamente secos; más de 500 pero menos de 1000 mm/año, como sitios relativamente húmedos; y los sitios ubicados en áreas con más de 1000 mm/año, como sitios húmedos. La mayoría de rellenos en ALC son considerados entre sitios relativamente húmedos y húmedos[5].

CAPÍTULO 2. Modelos Predictivos.

Introducción

Para construir un relleno sanitario es necesario predecir las emisiones que se van a obtener para evaluar la factibilidad de dicha construcción.

A continuación se analizarán los más utilizados, las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y cual de estos se adapta mejor para aplicarlo a las condiciones de nuestro país.

2.1 Caracterización de los modelos.

Los modelos matemáticos son herramientas útiles y económicas para la estimación del potencial de generación del GRS en el sitio. Los resultados del modelo pueden también ser usados para evaluar los riesgos potenciales asociados a la migración/emisión del GRS, y para evaluar la factibilidad del proyecto de administración del GRS.

Hay disponibles numerosos modelos para calcular la producción del GRS. Todos estos modelos pueden ser usados para elaborar una curva de generación que permita predecir su comportamiento y cambios a lo largo del tiempo. La totalidad del gas existente y la tasa a la cual es generado puede variar de alguna manera según los diferentes modelos que se usen, no obstante, el parámetro de entrada que es común a todos ellos es el de la cantidad de residuo que es degradable.

Los demás parámetros de entrada pueden variar dependiendo del modelo que se use, pero por lo general, estos están determinados por un número de variables incluyendo las que inciden directamente en la generación del GRS, incertidumbres en la información disponible sobre el sitio, y la forma en que la operación de la

extracción del GRS afecta la generación en sí misma, en los casos en que se induce infiltración de aire. Otro factor importante es el espacio de tiempo que se asume entre el momento de la disposición del residuo y el comienzo de la descomposición anaeróbica o fase metagénica dentro de la masa de residuo. La heterogeneidad y naturaleza variable de todos los rellenos conlleva una dificultad que es inherente a la confiabilidad de los datos que se recolectan sobre el sitio, la cual esta ligada a la disponibilidad de un continuo desembolso de recursos para adelantar dicha actividad.

Cualquier resultado del modelo será aceptable en la medida que lo sean los datos de entrada, aunque muchas veces estos parten de hipótesis generales en cuanto a la estimación inicial de las cantidades y tipos de residuo. Por lo tanto, es recomendable usar un modelo simple que utilice pocos parámetros y que éstos últimos puedan ser razonablemente asignados de acuerdo con las condiciones específicas del sitio. La predicción del resultado de cualquier modelo depende en mayor medida del grado de precisión que se requiera, de la confiabilidad de los datos de entrada, de la experiencia individual para analizar los datos, y del grado de similitud que exista entre el sitio objeto de estudio y otros que ya hayan sido exitosamente modelados.

Todos los modelos que se usan para determinar la tasa de producción estimada del GRS del sitio deben ser objeto de un completo análisis de sensibilidad con miras a determinar un rango aceptable de resultados y establecer cuáles parámetros ejercen mayor influencia en los cálculos de la producción del GRS.

La identificación de parámetros sensibles puede requerir una recolección de datos confiables y adelantar posteriores refinamientos en las predicciones de la producción del gas. Dada la naturaleza heterogénea de las condiciones dentro del relleno y las típicas limitaciones respecto de los datos de entrada que normalmente se encuentran en un sitio candidato, es recomendable establecer un rango de valores aproximado y adelantar un análisis de sensibilidad que refleje las condiciones esperadas de generación del GRS. Usando los limites más altos y más bajos en la generación del GRS versus el perfil de tiempo basado en las

condiciones probables dentro del relleno, es posible asignar valores y escoger datos de entrada que sean representativos como para considerarlos en una primera evaluación del potencial de un sitio, así como para establecer oportunamente qué factores de riesgo pueden surgir.

Los modelos cinéticos de primer orden son frecuentemente usados para estimar la producción de metano a lo largo de la vida útil de un relleno. Estos modelos son adaptados a rellenos específicos mediante hipótesis que se basan en las condiciones particulares del sitio[5].

2.2 Modelo de simulación EPA de primer orden para estimación de la generación de metano

Este método tiene en cuenta el decrecimiento en la generación de gas durante la vida del relleno a estudiar, lo cual es crítico en el momento de realizar la evaluación económica de un proyecto.

El estimativo de metano generado según este modelo de caída de primer orden (EPA) se expresa de esta forma:

LFG = 2L0R (e-kc – e-kt)

Donde:

LFG = Cantidad total de biogás generado en el año actual o en consideración, en p3).

L0 = Potencial total de generación de metano de los residuos, p3 / lb

R = Promedio anual de residuos dispuestos durante la vida activa.

K = tasa anual de generación de metano (1/año)

T = Tiempo desde la apertura del relleno, años

C = Tiempo desde la clausura del relleno, años

2.2.1 Desarrollo del valor de Lo y k.

La generación potencial de metano, L0, representa la cantidad total de metano que se espera que una libra de desechos genere en su ciclo de vida como tal. La constante de caída, k, representa la tasa en que el metano será liberado de cada libra de desecho. Si estos términos fuesen conocidos con certeza, este método sería considerado relativamente muy preciso; sin embargo, los valores de L0 y de k varían de una manera amplia y son difíciles de estimar en un relleno sanitario particular.

Los valores de L0 y de k dependen mucho de las condiciones locales y la composición de los desechos y aún así la EPA aprueba este método para la estimación de gas en sus regulaciones sobre rellenos sanitarios y estimación de gas. La regulaciones incluyen los siguientes valores para rellenos diseñados con capacidades superiores a 2.5 Mt.

L0 = 2.72 p3/lb.

k = 0.05/año

En los rangos de los valores de Lo y k desarrollados por expertos, el Lo permanece siempre igual, pero el valor de K (tasa de generación) cambia con climas más secos, generando gas de manera más lenta.

Debido a la incertidumbre en la estimación de L0 y de k, los flujos de gases derivados del método de degradación de primer orden, pueden aceptar ajustes con variaciones de más o menos 50%[6].

2.2.3 Ventajas y desventajas .

Ventajas

- Este método tiene en cuenta el decrecimiento en la generación de gas durante la vida del relleno a estudiar, lo cual es crítico en el momento de realizar la evaluación económica de un proyecto.

Desventajas

- **1** Los valores de L0 y de k varían de una manera amplia y son difíciles de estimar en un relleno sanitario particular.

- Debido a la incertidumbre en la estimación de L0 y de k, los flujos de gases derivados del método de degradación de primer orden, pueden aceptar ajustes con variaciones de más o menos 50%.

2.3 Análisis del Método Mexicano.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo ubicado antes de la generación de metano, y que este período es de un año, contado desde la colocación de los residuos hasta la generación de biogás; además, que por cada unidad de residuos, después de un año de disposición de los RSU, la generación disminuye exponencialmente mientras se consume la fracción orgánica de los residuos.

Para sitios donde se conocen los índices de disposición año a año, el modelo estima la generación de biogás en un año dado, usando la siguiente ecuación. [11]

$$QM = \sum_{i=1}^{n} 2kL_0 Mi\left(e^{-kti}\right)$$

Donde:

$\sum$ = La suma desde el año de apretura +1 (i=1) hasta el año de proyección (n);

QM = Generación máxima de biogás (m3/año);

k = Índice de generación de metano (1/año);

Lo = Generación potencial de metano (m3/Mg);

Mi = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año i (Mg);

ti = Edad de los residuos dispuestos en el año i (años).

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados durante un año. La proyección para los demás años se desarrolla variando la proyección anual y luego iterando la ecuación. El año de generación máxima normalmente ocurre durante el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice e disposición en los años finales).

Con la excepción de los valores de k y Lo, el modelo mexicano de biogás requiere datos específicos del relleno en cuestión para producir las proyecciones de generación.

El modelo provee los valores de k y Lo. Los valores se calculan con base en la información recolectada de rellenos sanitarios representativos y la relación entre los valores de k y Lo observados en rellenos sanitarios de los Estados Unidos. Los valores de k y Lo varían según la precipitación anual y se pueden usar para estimar proyecciones de generación de biogás en rellenos sanitarios localizados en diferentes regiones.

La EPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo. Sin embargo, con la construcción y operación de nuevos rellenos sanitarios, la disponibilidad de nueva información hará posible la calibración del modelo y el desarrollo de mejores valores de k y Lo.

2.3.1Consideraciones de ajustes para Lo.

Porcentaje orgánico de residuos dispuestos en el relleno Sanitario entre los dos sitios: En Estados Unidos es de 68% y en México de 73%. En atención a esta relación, el Lo de México debe aumentarse 7% -para alcanzar 73%- y también el valor de Lo -de 100 a 107 m3/t-. Los pasos siguientes hacen el ajuste a este último valor, según las consideraciones de los pasos 2 y 3 siguientes, que se pueden aplicar para estimar otros rellenos diferentes a los de México.

Entonces es necesario obtener el porcentaje orgánico de los residuos cubanos para la aplicación del método ajuste a Lo por diferencia entre el contenido de humedad -el agua es inerte.- En Estados Unidos la humedad de los RSU es 20% y en México es de 37%; entonces Lo debe corregirse por la relación 20%/37%, para obtener Lo

de 84 m3/t para México, que se logra para rellenos con una humedad adecuada. También se hace necesario obtener el contenido de humedad de los RSU cubanos para la aplicación de este método ajuste a Lo por diferencia los datos de pluviosidad.- Según datos de la EPA, el valor de Lo no se alcanza en sitios donde la precipitación es menor a 400 - 500 mm/año, y además, la disminución del valor de Lo está cerca de 1 m3/t por cada mm de disminución de la pluviosidad.

2.3.2 Desarrollo del valor de k.

El valor de k también varía con la precipitación -o pluviosidad- y la composición de los residuos, pero de manera diferente a Lo. Para Lo se puede aplicar la metodología descrita en las consideraciones anteriores, y es aplicable a cualquier relleno sanitario. Pero para k, Sedesol de México ha desarrollado la metodología que se presenta a continuación, que necesita tomar experiencias de rellenos sanitarios en operación, así:

Con relación a la pluviosidad, k se incrementa con valores mayores de 400 - 500 mm/año, y se estima que k sólo alcanza el máximo en condiciones muy húmedas. Con relación a la caracterización de los residuos, no existe una relación lineal con respecto al contenido orgánico (seco). Para obtener los índices de degradación total, se necesita evaluar el impacto de la mezcla de las diferentes fracciones de los residuos orgánicos (degradación rápida, media y lenta). En consecuencia, a diferencia de Lo, el valor de k para este ejemplo mexicano, no se puede estimar con una simple comparación de los residuos de Estados Unidos, sino que se necesita calibrar el modelo utilizando datos de operación reales de recuperación de biogás de rellenos sanitarios similares que estén en operación.

Para este caso, la experiencia que reporta México, es que se simuló el modelo usando el valor Lo de 84 m3/t, y se ajustó el valor de k hasta que la recuperación proyectada de biogás fuera igual a la recuperación real de operación del relleno testigo: los valores que reportan son 0.072/año para el relleno A -con pluviosidad de 605 mm/año- y 0.059 m3/t para el relleno B -con pluviosidad de 705 mm/año-, lo

cual dio base para asignar un valor de 0.0655 para valores de precipitación entre 500 y 999 mm/año.

2.3.3 Eficiencia del sistema de recolección.

La cantidad de biogás obtenida depende directamente de la eficiencia del sistema de recolección, La EPA estima que sitios que los rellenos sanitarios con sistemas bien diseñados, pueden alcanzar una eficiencia de recolección promedio de 75%[6].

2.3.4 Ventajas y desventajas.

Ventajas

- Facilidad para adquirir las variables de entrada del método
- Poca complejidad del método

Desventajas

- Es un método surgido en Estados Unidos de acuerdo con sus condiciones climatológicas; al aplicarlo en Cuba de acuerdo a nuestras condiciones se harían demasiadas aproximaciones.
- Una de las variables de entrada del método es el por ciento de materia orgánica que tiene el residuo lo cual en nuestro país es muy difícil de estimar ya que no se clasifica la basura.

2.4 Análisis del método de Scholl Canyon.

Modelo Scholl Canyon

El modelo de degradación empírica de primer orden más ampliamente aceptado y utilizado por la industria y agencias reguladoras, incluyendo la U.S. EPA, es el Modelo Scholl Canyon. Este modelo se basa en la hipótesis de que el relleno tiene una fracción constante de material biodegradable en el relleno por unidad de tiempo. El modelo se basa en la siguiente ecuación de primer orden:

QCH4i = k * Lo * mi * e-kt

QCH4i = metano producido en el año i

k = constante de generación de metano,

Lo = potencial de generación de metano

mi = masa de residuo dispuesto en el año i

ti = años después del cierre

Es una práctica típica asumir que el GRS generado está compuesto de cincuenta por ciento de metano y cincuenta por ciento de dióxido de carbono para que el total de GRS producido sea igual a dos veces la cantidad de metano calculado a partir de la ecuación . El Modelo Scholl Canyon predice el potencial de generación de metano (Lo), los datos históricos de llenado del residuo y las proyecciones futuras del residuo que será dispuesto en el sitio. La U.S. EPA asigna valores de ajuste a cada uno de estos parámetros y de esta forma obtener una evaluación preliminar conservativa del sitio. Sin embargo, estos parámetros de entrada deben ser seleccionados con conocimiento de las condiciones específicas del sitio y sus alrededores. En ALC, las diferencias en el contenido orgánico del residuo, la presencia de humedad, y el nivel al cual el residuo es compactado hacen que el potencial para la generación de GRS sea mayor, en comparación con un sitio típico de Norte América y Europa.

2.4.1 Desarrollo del valor de k.

La tasa constante de generación de metano (k) representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el metano es generado luego de la disposición del residuo en el sitio. Esta constante depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH, y la temperatura. Como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad dentro de un relleno es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas. La

humedad sirve además como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. El contenido de humedad dentro de un relleno sanitario depende principalmente de la infiltración de aguas lluvias a través de la cobertura del relleno. Otros factores que afectan el contenido de humedad en el residuo y la tasa de generación incluyen el contenido inicial de humedad del residuo; la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio; la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final; el tipo de impermeabilización de la base; el sistema de recolección de lixiviados; y la profundidad del residuo. Los valores típicos de k oscilan entre 0.02 para sitios secos y 0.07 para sitios húmedos. El valor predeterminado utilizado por la U.S. EPA para sitios con precipitaciones de más de 25 pulgadas (625 mm) por año es 0.05 (U.S. EPA, 1994). Se considera que este valor produce una estimación razonable de la generación de metano en ciertas regiones geográficas y bajo ciertas condiciones en el sitio. La tabla 2.1 presenta los rangos sugeridos y la asignación de los parámetros recomendados de la constante k.

Rango de Valores de k Sugeridos según la Precipitación Anual

Precipitación Anual	*Rango de Valores k (Según condición del residuo)*		
	Relativamente Inerte	*Moderadamente Degradable*	*Altamente Degradable*
<250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 a <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 a <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Tabla 2.1 Valores de k según precipitaciones anuales y condición del residuo

2.4.2 Consideraciones de ajustes para Lo.

El potencial de generación de metano (Lo) representa la reserva total de metano (m3 de metano por tonelada de residuo). El valor Lo depende de la composición del residuo, y en particular, de la fracción de materia orgánica presente. Este valor se ha estimado con base en el contenido de carbono del residuo, la fracción de carbono biodegradable, y el factor de conversión estequiométrico.

Los valores típicos de este parámetro están el rango entre 125 m3 y 310 m3 de metano/tonelada de residuo. El aumento en la compactación del residuo no tiene efecto directo sobre el parámetro Lo. Sin embargo, la compactación y la densidad del residuo tienen una relación directa con la masa de residuo dentro de un volumen determinado, y por lo tanto con la cantidad potencial de GRS que puede ser producido a través del tiempo, así como con las características de desempeño de los sistemas que sea necesario instalar para su recolección. Existe también la percepción de que en la medida en que los programas de reciclaje y compostaje se incrementan y mejoran, más materiales orgánicos tales como residuos de comida y papel, pueden ser desviados del relleno lo cual reduciría la cantidad del

GRS dentro del relleno. Sin embargo, hasta la fecha las iniciativas de reciclaje han tenido más éxito pero en la remoción de materiales inorgánicos tanto en países desarrollados como en países en desarrollo. En consecuencia, a través de la práctica cotidiana no se ha encontrado que el valor aplicable de Lo haya disminuido significativamente (U.S. EPA, 1994). El usuario del modelo puede aumentar o disminuir el valor Lo en función del conocimiento específico que se tenga del residuo, en términos de la proporción orgánica. La cantidad (en toneladas) de un residuo típico dispuesto en un relleno en un año determinado está representada por “m” en la ecuación del Modelo Scholl -Canyon. En rellenos donde hay información suficiente y confiable que indique por ejemplo que hay una significativa porción de residuos inertes, tales como residuos de construcción y demolición, este parámetro puede ser reducido a un valor que refleje únicamente la cantidad de residuo que no es inerte. Sin embargo, en muchos casos no siempre hay suficiente información como para determinar qué porcentaje del residuo es inerte. La tabla 2.2 muestra los valores de Lo según el contenido orgánico de residuo[5, 6].

Valores de Lo Sugeridos según el Contenido Orgánico del Residuo

Categorización del Residuo	***Valor Mínimo Lo***	***Valor Máximo Lo***
Residuo Relativamente Inerte	5	25
Residuo Moderadamente Degradable	140	200
Residuo Altamente Degradable	225	300

Tabla 2.2 Valores de Lo según Contenido del residuo

Vida Media de Subproductos de Biodegradación

Categoría del Residuo	Vida Media Mínima	Vida Media Máxima
Rápidamente Degradable (comida y residuos de jardín, etc.)	½ año	1 ½ año
Moderadamente Degradable (papel, etc.)	5 años	25 años
Pobremente Degradable (algunas porciones de residuos de construcción y demolición, etc.)	10 años	50 años

Tabla 2.3 Vida media de los residuos

2.4.3 Ventajas y desventajas

Ventajas

- El modelo es sencillo de entender y aplicar, y está generalmente aceptado por las agencias e instituciones financieras que están interesadas en apoyar estos tipos de proyectos tanto en Norte América como en ALC
- El Modelo Scholl Canyon es el más adecuado para el propósito buscado; es el más comúnmente utilizado y aceptado en Norte América y Sur América; y tiene la mejor base de datos disponible sobre los rellenos de ALC

Desventajas

- La desventaja fundamental del modelo es que el valor de Lo se obtiene en un rango bastante amplio lo que puede llevar a una gran diferencia entre la generación máxima y mínima de metano estimada

CAPÍTULO 3. Aplicación y Resultados del Modelo Scholl- Canyon

Introducción

En el presente Capítulo se realiza el cálculo de las emisiones de CH4 a y la generación de energía eléctrica a partir de los RSU en el caso particular de un Relleno Sanitario en municipio Ciego de Ávila. Teniendo en cuenta la metodología expuesta en el capítulo anterior la cual será adaptada a esta situación.

3.1 Datos de entrada para la aplicación del modelo Scholl-Canyon

Municipio	RSU/día(ton)	Prom. Precip anuales (mm.)	Clasificación basura
Santa Clara	120-170	>1000	Medianamente Inerte

3.2 Dimensiones de un Relleno Sanitario para las condiciones del municipio

De acuerdo con las ecuaciones planteadas anteriormente el relleno sanitario a construir en el municipio tendrá una las siguientes dimensiones según las ecuaciones1.1, 1.2 y 1.3

V basura = 2585416 m3

V relleno= 3361041m3

A relleno= 3.37 ha

3.3 Cálculo de generación de metano en las condiciones de Ciego de Ávila.

Usando la metodología anteriormente expuesta se realizarán los cálculos para el municipio. Haciendo cálculos para el caso mínimo y el máximo. Asumiendo que el residuo sólido de la fuente de datos es convertido en relleno sanitario y una eficiencia del sistema de recolección de un 70 por ciento se obtienen los siguientes resultados.

Generación de metano para el ´mínimo

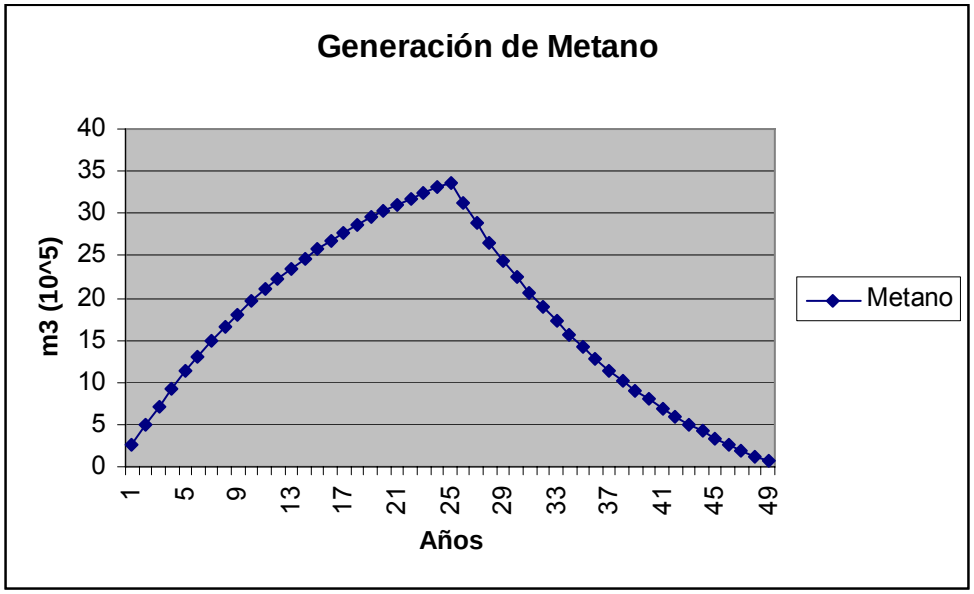
Años	1	10	15	20	25
Generación CH4(*10^5)	2.5	19.5	25.7	30.3	33.7

Generación de metano para el caso máximo

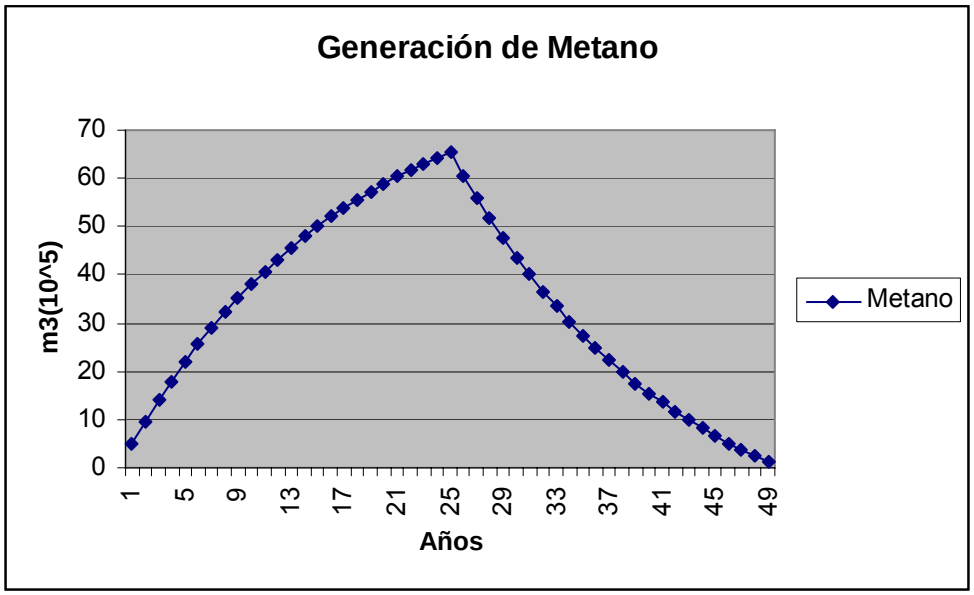
Años	1	10	15	20	25
Generación CH4(*10^5)	4.9	38	50	58.9	65.4

Las siguientes graficas muestran con más detalles las emisiones de GRS

Caso mínimo


Generación de Metano
m3 (10^5)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
1
5
9
13
17
21
25
29
33
37
41
45
49
Años
Metano

Caso máximo


Generación de Metano
m3(10^5)
70
60
50
40
30
20
10
0
1
5
9
13
17
21
25
29
33
37
41
45
49
Años
Metano

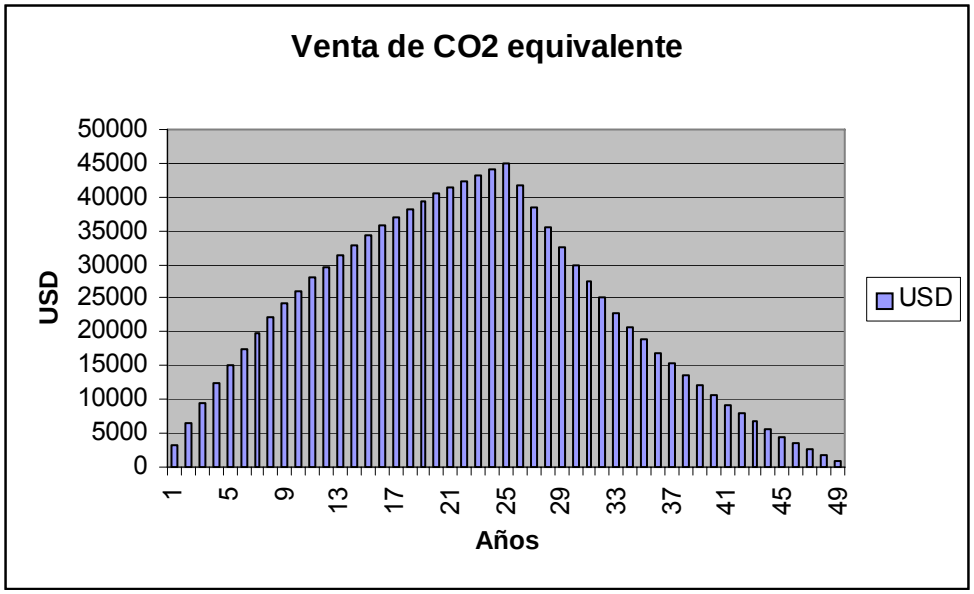
3.4 Beneficios medioambientales

Con el Protocolo de Kyoto y los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) se obtiene que:

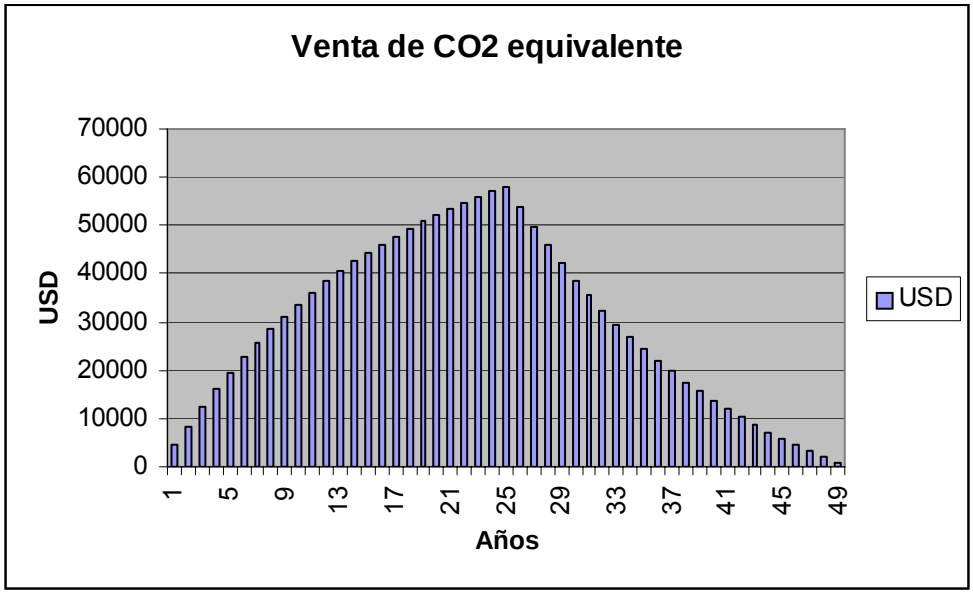
-1 Ton CH_4 = 21 Ton CO_2 equivalente.

Por tanto esta ecuación multiplicada por la densidad del CH_4 (ρ=0.6673kg/m3) y el precio del CO_2 en el mercado está en los 14 USD/ton de CO_2 equivalente (mayo 2009)[7, 8].Se obtiene los siguientes resultados mostrados en las gráficas solamente quemando libremente a la atmósfera

Para el caso mínimo



Para el caso máximo



Aportando un total de 1013374 dólares en los primeros 35 años de explotación al relleno en el caso mínimo y 1309284 para máximos valores de entrada. Como se puede ver los beneficios al pais son notables.

3.5 Factores que Determinan la Selección de Utilización del GRS

Como se comentó anteriormente, existen varias tecnologías para la utilización del GRS. La selección de la opción que más se ajusta a cada sitio específico depende de varios factores, entre los cuales se pueden citar los siguientes:

• Disponibilidad proyectada del GRS;
• Presencia y ubicación de mercados confiables;
• Precio de mercado para productos finales;
• Factores ambientales y regulatorios; y
• Costos de operación y de capital de las opciones de sistemas de utilización, incluyendo costos de proceso y transporte.

3.6 Factores que Determinan la Selección de Generación de energía eléctrica

Cuando se considera la opción de generación de energía a partir de Gases de Residuos Sólidos (GRS), deben evaluarse varios factores, bien sea que entre las opciones se contemplen microturbina, motores de combustión interna, turbinas de gas, ciclo combinado, o turbinas de vapor.

La eficiencia para la conversión de energía, la cual es una indicación de qué parte del valor de la energía del GRS puede ser convertida en energía eléctrica, varía con cada tecnología, y puede ser descrita en términos de la “tasa de calor” neta de la planta (Kw./Kwh.) o eficiencia total del equipo. Esta eficiencia es igual al valor de energía total en el GRS recolectado dividido por el valor de energía en la carga suministrada a la red. La potencia neta suministrada a la red es igual a la salida total del generador menos las pérdidas parasitarias en la planta. Estas pérdidas incluyen la energía consumida por los compresores de gas, las bombas de agua, las bombas de aceite lubricante, los ventiladores del radiador y del generador, el transformador de la estación, y otras estaciones auxiliares.

Otros factores importantes que deben ser considerados al momento de decidir si se va a utilizar o no el GRS para generación de energía incluyen la disponibilidad; los costos de instalación, operación y mantenimiento; y las emisiones, todos los cuales son particulares para cada sitio específico. La disponibilidad es el tiempo real de generación de energía dividido por la disponibilidad de horas por año. Esto constituye principalmente una medida de la confiabilidad del equipo de generación de energía y del abastecimiento del combustible a la instalación. Los costos/Kw. instalado describen el costo por Kw. instalado de una tecnología determinada. Los costos de operación y mantenimiento incluyen los materiales y mano de obra utilizados para producir la energía y se expresan como $/Kwh. de operación del equipo. Los cargos por mantenimiento cubren las revisiones mayores y menores. Igualmente, las emisiones de los tubos de escape de una antorcha de GRS o de una pieza de equipo de generación deben controlarse dentro de los límites aceptables

establecidos por las agencias de gobierno. Las emisiones objeto de control incluyen los óxidos de nitrógeno, el dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos no metanos, compuestos orgánicos volátiles (COV), y productos de combustión incompleta.

En la tabla 3.1 se presentan los rangos típicos de flujo que se requieren para la implementación de tecnologías viables de generación de energía eléctrica. Esta figura también muestra los rangos de energía típicos asociados con las diferentes tecnologías y tasas de flujo[5].

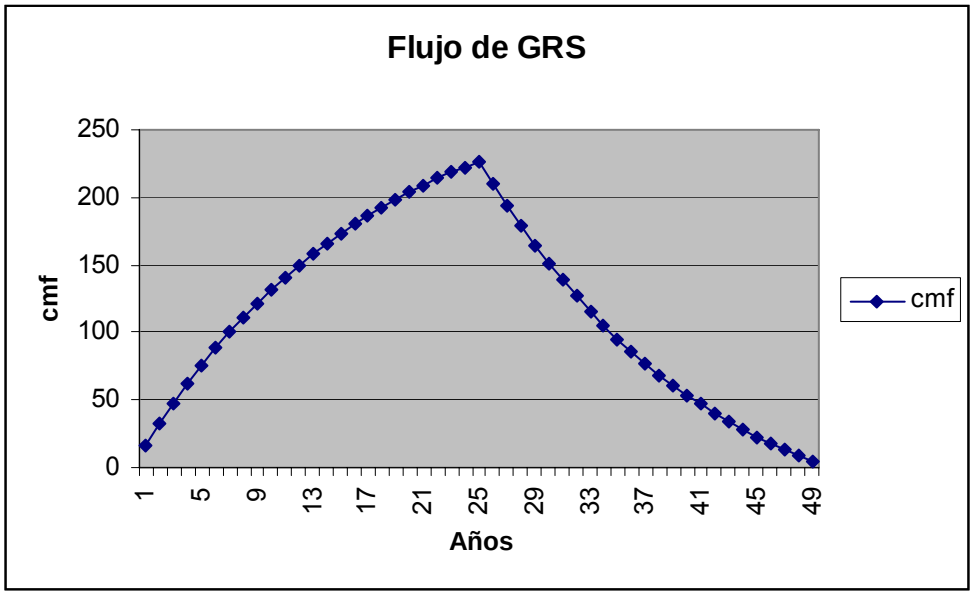
Tecnología	*Rango Típico de Flujo*	*Tamaño Preferido de la Planta*	*Eficiencia de conversión Eléctrica (neta a la red sin recuperación del calor del residuo)*
Microturbinas	< 100 cfm	< 100 kW	25-30%
Motores de combustión interna	>150 a 5,000 cfm	0.5 a 12 MW	32-40%
Turbinas de gas	>4,000 a 20,000 cfm	3 a 18 MW	26-32%
Turbinas de vapor	>6,000 a >25,000 cfm	10 a 50 MW	24-29%
Sistemas de Ciclo Combinado	>5,000 a >25,000 cfm	>10 MW	38-45%

Tabla 3.1 Rangos típicos de flujo para tecnologías de generación

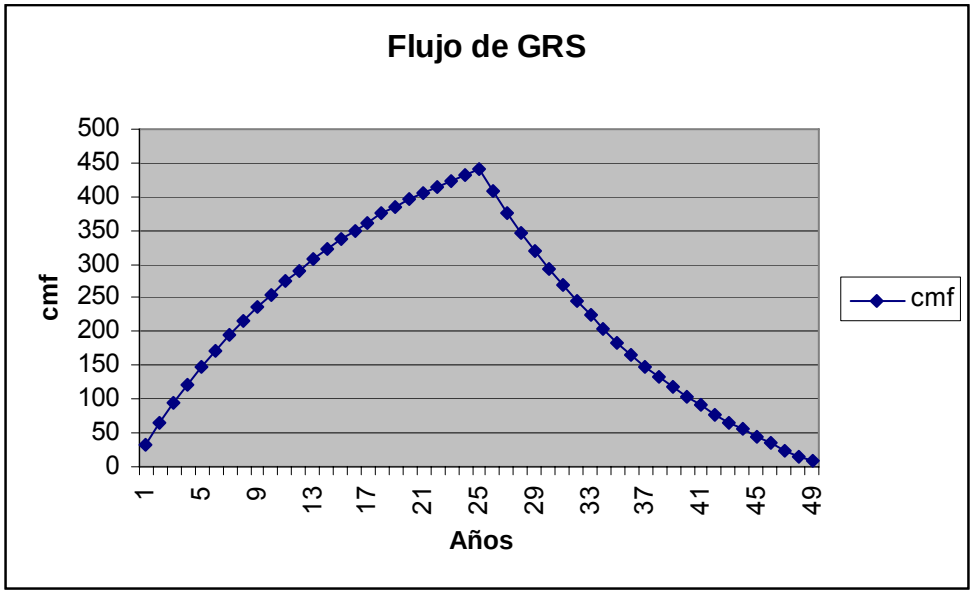
3.7 Selección del equipo a instalar

En las graficas se observa el flujo de GRS que se obtiene

Para el caso mínimo

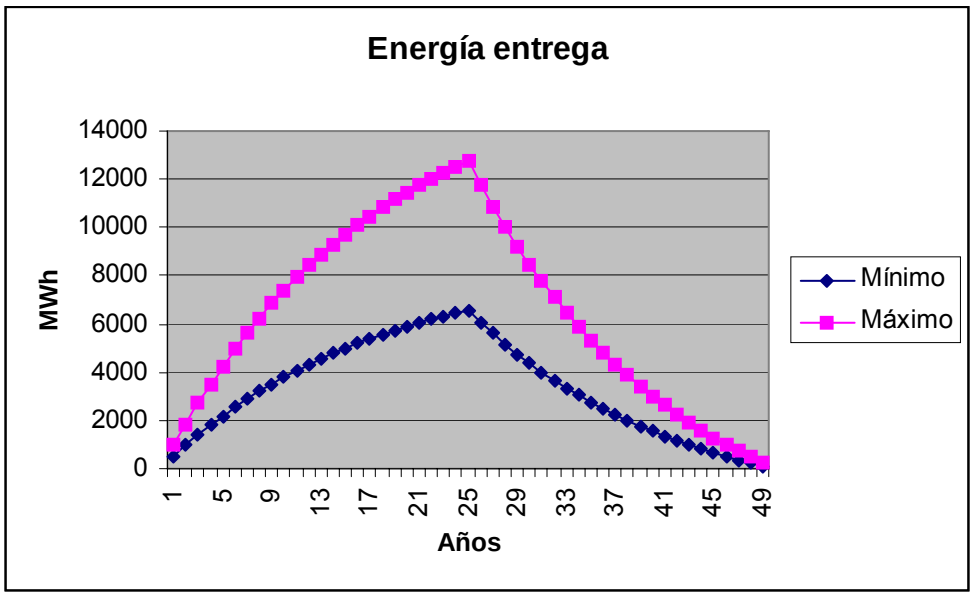


Para el caso máximo



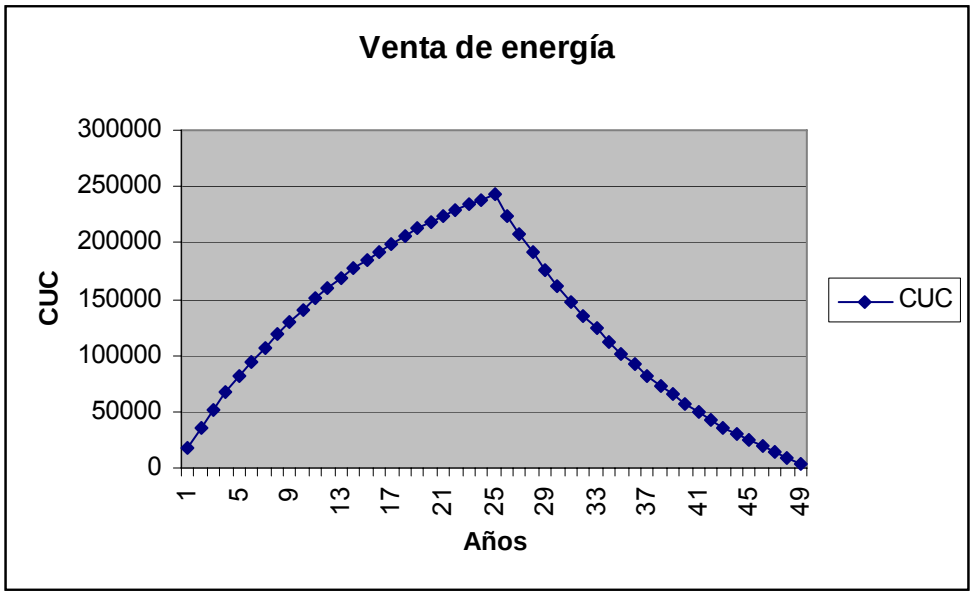
De acuerdo con el flujo obtenido, se instalarán dos bloques de motores de combustión interna de 500 kW cada uno.

La energía entregada al sistema es la mostrada en la figura

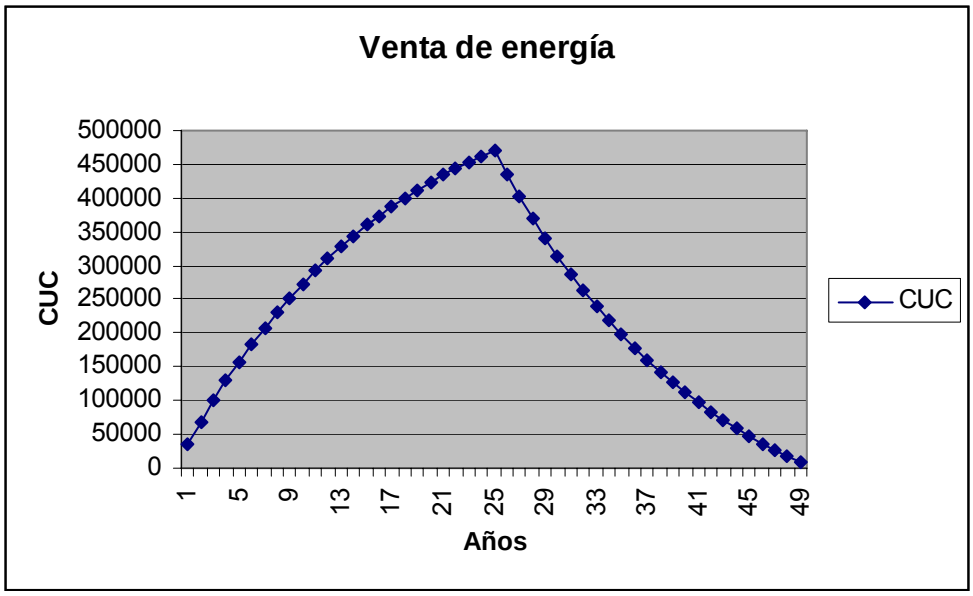


Como beneficio adicional se obtiene la venta de la energía eléctrica, teniendo en cuenta la tarifa de compra de energía para los servicios clasificados como cogeneradores y generadores renovables hasta 5 MW que aplica el Ministerio de Finanzas y Precios.

Para el caso mínimo



Para el caso máximo



3.8 Costos del proyecto

Para la estimación del costo inicial del proyecto se tomó como referencia el MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DE GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE". El cual da los índices de costos siguientes:

- 25000-50000 USD por hectárea para el sistema de recolección
- 600000-800000 USD por MW instalado
- 400000- 500000 USD por MW en instalaciones auxiliares

En la siguiente tabla se muestra el análisis económico para el caso mínimo

Costo promedio de la energía		**0.037**	**$ por kW.h**		
Costo del sistema de recolección	**80000**				
Costo del motor generador	**600000**				
Costos Auxiliares	**240000**				
Costo de Inversión Total	**920000**	**2600**	**2600**	**2600**	**2600**
Vida útil (años)	**10**	**5**	**5**	**5**	**5**
Impuestos (%)	**35**	**35**	**35**	**35**	**35**
Tasa de intereses (%)	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**
Año	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Costo de la energía ($/kW.h)	**0.037**	**0.0407**	**0.0444**	**0.0481**	**0.0518**
Energía Generada (MW.h) por año	**691.43**	**1342**	**1955**	**2533**	**3077**
Ingreso Energía Generada ($) por año	**18169**	**35281**	**51396**	**66574**	**80867**
Ingreso Por TCE	**78111**	**151672**	**220951**	**286196**	**347641**
Ingreso por Créditos de Carbono	**3371**	**6547**	**9538**	**12354**	**15007**
Ingreso por ton CO2 por petróleo	**6125**	**11894**	**17327**	**22444**	**27263**
INGRESO TOTAL	**105776**	**205394**	**299212**	**387568**	**470778**
Depreciación	**92000**	**92000**	**92000**	**92000**	**92000**
Ahorro sin impuestos ($)	**13776**	**113394**	**207212**	**295568**	**378778**
Ahorro con impuestos ($)	**8954.4**	**73706.1**	**134687.8**	**192119.2**	**378778**
Flujo efectivo no descontado ($)	**100954.4**	**165706**	**226687.8**	**284119.2**	**470778**
Factor descuento por intereses	**0.94339623**	**0.89**	**0.8396193**	**0.7920937**	**0.74725817**
Flujo efectivo descontado ($)	**95240**	**147478**	**190331.45**	**225049.02**	**351792.708**
Valor Residual					**460000**
Flujo de caja	**-824760**	**-677282**	**-486950.71**	**-261901.69**	**89891.0132**
Valor Presente Neto	**549891.013**				

Valoración económica para el máximo

Costo promedio de la energía		**0.037**	**$ por kW.h**		
Costo del sistema de recolección	**80000**				
Costo del motor generador	**600000**				
Costos Auxiliares	**240000**				
Costo de Inversión Total	**920000**	**2600**	**2600**	**2600**	**2600**
Vida útil (años)	**10**	**5**	**5**	**5**	**5**
Impuestos (%)	**35**	**35**	**35**	**35**	**35**
Tasa de intereses (%)	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**
Año	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Costo de la energía ($/kW.h)	**0.037**	**0.0407**	**0.0444**	**0.0481**	**0.0518**
Energía Generada (MW.h) por año	**691.43**	**1342**	**1955**	**2533**	**3077**
Ingreso Energía Generada ($) por año	**35301**	**68547**	**99857**	**129343**	**157112**
Ingreso Por TCE	**151759**	**294680**	**429277**	**556036**	**675413**
Ingreso por Créditos de Carbono	**4356**	**8459**	**12323**	**15961**	**19388**
Ingreso por ton CO2 por petróleo	**11901**	**23109**	**33665**	**43606**	**52968**
INGRESO TOTAL	**203317**	**394795**	**575122**	**744946**	**904881**
Depreciación	**92000**	**92000**	**92000**	**92000**	**92000**
Ahorro sin impuestos ($)	**111317**	**302795**	**483122**	**652946**	**812881**
Ahorro con impuestos ($)	**72356.05**	**196817**	**314029.3**	**424414.9**	**812881**
Flujo efectivo no descontado ($)	**164356.05**	**288817**	**406029.3**	**516414.9**	**904881**
Factor descuento por intereses	**0.94339623**	**0.89**	**0.8396193**	**0.7920937**	**0.74725817**
Flujo efectivo descontado ($)	**155052.877**	**257046**	**340910.03**	**409048.97**	**676179.723**
Valor Residual					**460000**
Flujo de caja	**-764947.123**	**-507901**	**-166991.21**	**242057.76**	**918237.479**
Valor Presente Neto	**1378237.48**				

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1 El potencial calculado muestra las posibilidades para la inserción de Cuba en los Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto

2 Los costos de la instalación son de alrededor de 1.46 millones USD/MW instalado teniendo en cuenta toda la infraestructura necesaria.

3 El proyecto contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente así como la generación de energía eléctrica.

Recomendaciones

1 Extender este trabajo a todos los municipios del país que presenten más de 100 000 habitantes debido a las ventajas que representa.

2 Crear un programa nacional para que la población clasifique la basura antes de ser recogida, práctica extendida por todo el mundo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Salvador, A.R., *Incineración de Residuos Sólidos Urbanos*, Universidad Complutense de Madrid: Madrid.

2. Daño, S.s., *Pirólisis, una alternativa de tratamiento térmico no tradicional.* 2008.

3. Brouche, *Recovered Energy System.* 2008.

4. Roben, E., *Diseño, Construcción,Operacóon y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales*, Universidad Politecnica de Madrid: Madrid. p. 6.

5. Mundial, B., *MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DE GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE*. 2004.

6. Camacho, C.S., *Alternativas de utilización de biogás de Rellenos Sanitarios en Colombia*. 2006, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria: Bogotá.

7. *STATE AND TRENDS OF THE CARBON MARKET* 2006.

8. Vasco-Navarras, F.d.C.d.A. *Boletín de Mercado de Carbono*. 2009 [cited.

9. *CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO*, N. Unidas, Editor. 1992.

10. *PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.*

11. Borba, S.M.P., *ANÁLISE DE MODELOS DE GERAÇÃO DE GASES EM ATERROS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO*

2006: Rio de Janeiro.

12. C., L.E., *El mercado de carbono en América Latina y el Caribe:balance y perspectivas*. 2004: Santiago de Chile.

13. Fernández, J.L.A., *Evaluación del Potencial Energético de los Residuos Sólidos Urbanos*, Instituto de Ivestigaciones Eléctricas.

14. Liptow, H., *El Mecanismo de Desarrollo Limpio. ¿Qué es?¿Cómo funciona?*

.

15. Pereira, A.G.H., *Propiedades Físicas de los Residuos Solidos Urbanos*: Loja, Ecuador.

16. Pérez, E.D., *Inserción de Cuba en los Mecanismos de Desarrollo Limpio*, in *Facultad de Mecánica*. 2006, Universidad Central ¨Marta Abreu¨de Las Villas: Santa Clara.

17. Torre, G.Q.d.l., *La Basura en el Limbo.* 2003.

ANEXOS

Anexo I Hoja de cálculo para el caso máximo

	Total	efic	m3/h	cfm	ton Co2/año	Venta Co2(USD)	potencia	energia	cuc	petroleo dejado	cuc	co2 dejado	cuc
1	7.0124	4.90868	56.03516	33.00471	327.5562164	4356.497678	0.108916	954.1001	35301.7	314.8530434	151759.2	850.1032173	11901.45
2	13.6164	9.53148	108.8068	64.08723	636.0356604	8459.274283	0.211488	1852.634	68547.45	611.3691433	294679.9	1650.696687	23109.75
3	19.8358	13.88506	158.5053	93.35959	926.5500538	12323.11572	0.308087	2698.839	99857.05	890.616907	429277.3	2404.665649	33665.32
4	25.693	17.9851	205.3094	120.9272	1200.145723	15961.93812	0.39906	3495.764	129343.3	1153.602083	556036.2	3114.725623	43606.16
5	31.2091	21.84637	249.3878	146.8894	1457.80827	19388.84999	0.484735	4246.279	157112.3	1401.272049	675413.1	3783.434533	52968.08
6	36.404	25.4828	290.8995	171.3398	1700.467244	22616.21435	0.565421	4953.092	183264.4	1634.520306	787838.8	4413.204826	61784.87
7	41.2964	28.90748	329.9941	194.3665	1928.99614	25655.64867	0.641409	5618.747	207893.6	1854.186473	893717.9	5006.303477	70088.25
8	45.9039	32.13273	366.812	216.0523	2144.217073	28518.08707	0.712972	6245.639	231088.6	2061.060781	993431.3	5564.864109	77908.1
9	50.243	35.1701	401.4852	236.4748	2346.900773	31213.78028	0.780367	6836.012	252932.5	2255.884071	1087336	6090.886992	85272.42
10	54.3295	38.03065	434.1398	255.7084	2537.785275	33752.54415	0.843838	7392.017	273504.6	2439.365755	1175774	6586.287539	92208.03
11	58.178	40.7246	464.8927	273.8218	2717.552558	36143.44902	0.903612	7915.641	292878.7	2612.161366	1259062	7052.835687	98739.7
12	61.8024	43.26168	493.8548	290.8805	2886.851906	38395.13036	0.959906	8408.773	311124.6	2774.895005	1337499	7492.216513	104891
13	65.2157	45.65099	521.13	306.9456	3046.290563	40515.66448	1.01292	8873.183	328307.8	2928.150366	1411368	7906.005987	110684.1
14	68.4302	47.90114	546.8167	322.075	3196.443072	42512.69286	1.062848	9310.545	344490.1	3072.479712	1480935	8295.695222	116139.7
15	71.4575	50.02025	571.0074	336.3234	3337.851283	44393.42206	1.109867	9722.436	359730.1	3208.403878	1546451	8662.690469	121277.7
16	74.3085	52.01595	593.7894	349.7419	3471.024344	46164.62377	1.154148	10110.34	374082.6	3336.412266	1608151	9008.31312	126116.4
17	76.9935	53.89545	615.2449	362.3792	3596.443379	47832.69693	1.195851	10475.66	387599.4	3456.967343	1666258	9333.811827	130673.4
18	79.5221	55.66547	635.4506	374.2804	3714.556813	49403.60561	1.235125	10819.7	400328.8	3570.500143	1720981	9640.350387	134964.9
19	81.9035	57.33245	654.48	385.4887	3825.794389	50883.06537	1.272113	11143.71	412317.2	3677.423741	1772518	9929.044101	139006.6
20	84.1462	58.90234	672.4011	396.0443	3930.553148	52276.35687	1.306946	11448.85	423607.4	3778.119783	1821054	10200.92341	142812.9
21	86.2583	60.38081	689.2787	405.9851	4029.211451	53588.5123	1.339751	11736.22	434240.1	3872.951953	1866763	10456.97027	146397.6
22	88.2474	61.77318	705.1733	415.3471	4122.124301	54824.25321	1.370645	12006.85	444253.6	3962.261489	1909810	10698.10602	149773.5
23	90.1207	63.08449	720.1426	424.164	4209.628018	55988.05264	1.399741	12261.73	453684.1	4046.371666	1950351	10925.2035	152952.8
24	91.8849	64.31943	734.2401	432.4674	4292.035564	57084.073	1.427142	12501.77	462565.4	4125.583311	1988531	11139.07494	155947
25	93.5463	65.48241	747.5161	440.287	4369.641219	58116.22822	1.452947	12727.82	470929.2	4200.17929	2024486	11340.48408	158766.8
26	86.5339	60.57373	691.4809	407.2823	4042.085003	53759.73054	1.344031	11773.72	435627.5	3885.326247	1872727	10490.38087	146865.3
27	79.9299	55.95093	638.7092	376.1997	3733.605559	49656.95393	1.241459	10875.18	402381.7	3588.810147	1729806	9689.787397	135657
28	73.7105	51.59735	589.0108	346.9274	3443.091166	45793.1125	1.14486	10028.98	371072.1	3309.562383	1595209	8935.818435	125101.5
29	67.8533	47.49731	542.2067	319.3598	3169.495496	42154.2901	1.053887	9232.052	341585.9	3046.577208	1468450	8225.758461	115160.6
30	62.3372	43.63604	498.1283	293.3976	2911.832949	38727.37822	0.968212	8481.537	313816.9	2798.907241	1349073	7557.049551	105798.7
31	57.1423	39.99961	456.6166	268.9471	2669.173975	35500.01387	0.887526	7774.724	287664.8	2565.658985	1236648	6927.279258	96981.91
32	52.2499	36.57493	417.522	245.9205	2440.645079	32460.57955	0.811538	7109.069	263035.6	2345.992818	1130769	6334.180607	88678.53
33	47.6424	33.34968	380.7041	224.2347	2225.424146	29598.14115	0.739975	6482.177	239840.6	2139.11851	1031055	5775.619976	80858.68
34	43.3033	30.31231	346.0309	203.8122	2022.740446	26902.44794	0.67258	5891.804	217996.7	1944.295219	937150.3	5249.597092	73494.36
35	39.2168	27.45176	313.3763	184.5786	1831.855945	24363.68407	0.609109	5335.799	197424.5	1760.813535	848712.1	4754.196545	66558.75

Anexo II Hoja de cálculo para el caso mínimo

	Total	efic	m3/h	cfm	ton Co2/año	venta co2(USD)	potencia	energia	cuc	petroleo dejado	cuc	co2 dejado	cuc
1	3.6093	2.52651	28.84144	16.98761	168.5940123	3371.880246	0.056059	491.0777	18169.88	162.0556571	78110.8	437.5502741	6125.704
2	7.0084	4.90588	56.0032	32.98588	327.3693724	6547.387448	0.108853	953.5559	35281.57	314.6734455	151673	849.618303	11894.66
3	10.2096	7.14672	81.58356	48.05272	476.9006256	9538.012512	0.158574	1389.108	51396.99	458.4056289	220952	1237.695198	17327.73
4	13.2244	9.25708	105.6744	62.24224	617.7249484	12354.49897	0.205399	1799.299	66574.05	593.7685511	286196	1603.175088	22444.45
5	16.0636	11.24452	128.3621	75.60528	750.3468196	15006.93639	0.249497	2185.597	80867.1	721.2471263	347641	1947.367241	27263.14
6	18.7374	13.11618	149.7281	88.18984	875.2426914	17504.85383	0.291026	2549.392	94327.5	841.2993292	405506	2271.508189	31801.11
7	21.2555	14.87885	169.8499	100.0416	992.8656605	19857.31321	0.330137	2892.002	107004.1	954.3606846	460002	2576.773848	36074.83
8	23.627	16.5389	188.8002	111.2033	1103.640797	22072.81594	0.366971	3214.666	118942.6	1060.839778	511325	2864.2674	40099.74
9	25.8604	18.10228	206.647	121.7151	1207.965144	24159.30289	0.40166	3518.54	130186	1161.118254	559659	3135.019286	43890.27
10	27.9637	19.57459	223.4542	131.6145	1306.212391	26124.24781	0.434328	3804.713	140774.4	1255.555309	605178	3389.999335	47459.99
11	29.9445	20.96115	239.2825	140.9374	1398.73754	27974.75079	0.465093	4074.219	150746.1	1344.492179	648045	3630.128884	50821.8
12	31.81	22.267	254.1895	149.7176	1485.87691	29717.5382	0.494068	4328.037	160137.4	1428.252141	688418	3856.28078	53987.93
13	33.5668	23.49676	268.2279	157.9862	1567.938795	31358.7759	0.521354	4567.065	168981.4	1507.13153	726437	4069.25513	56969.57
14	35.2213	24.65491	281.4487	165.7733	1645.222144	32904.44289	0.547052	4792.175	177310.5	1581.417703	762243	4269.827797	59777.59
15	36.7795	25.74565	293.9001	173.1072	1718.007225	34360.14449	0.571254	5004.182	185154.7	1651.380057	795965	4458.726154	62422.17
16	38.2469	26.77283	305.6259	180.0137	1786.550946	35731.01892	0.594045	5203.835	192541.9	1717.265539	827722	4636.616956	64912.64
17	39.6289	27.74023	316.6693	186.5182	1851.105548	37022.11096	0.61551	5391.869	199499.1	1779.316607	857631	4804.154838	67258.17
18	40.9304	28.65128	327.0694	192.6439	1911.899914	38237.99829	0.635725	5568.949	206051.1	1837.753267	885797	4961.933821	69467.07
19	42.1561	29.50927	336.8638	198.4128	1969.153587	39383.07174	0.654762	5735.717	212221.5	1892.786547	912323	5110.523678	71547.33
20	43.3104	30.31728	346.0877	203.8456	2023.072094	40461.44189	0.672691	5892.77	218032.5	1944.614005	937304	5250.457815	73506.41
21	44.3975	31.07825	354.7745	208.9622	2073.851623	41477.03245	0.689575	6040.679	223505.1	1993.424219	960830	5382.245392	75351.44
22	45.4213	31.79491	362.9556	213.7808	2121.674344	42433.48689	0.705477	6179.977	228659.1	2039.392297	982987	5506.359201	77089.03
23	46.3855	32.46985	370.6604	218.319	2166.713091	43334.26181	0.720453	6311.165	233513.1	2082.684366	1003854	5623.247787	78725.47
24	47.2935	33.10545	377.9161	222.5926	2209.126679	44182.53357	0.734556	6434.706	238084.1	2123.453084	1023504	5733.323328	80266.53
25	48.1486	33.70402	384.7491	226.6172	2249.069255	44981.38509	0.747837	6551.05	242388.9	2161.846621	1042010	5836.985877	81717.8
26	44.5393	31.17751	355.9076	209.6296	2080.475242	41609.50485	0.691778	6059.973	224219	1999.790964	963899	5399.435603	75592.1
27	41.1402	28.79814	328.7459	193.6313	1921.699882	38433.99764	0.638983	5597.494	207107.3	1847.173176	890337	4987.367574	69823.15
28	37.939	26.5573	303.1655	178.5645	1772.168629	35443.37258	0.589263	5161.942	190991.9	1703.440992	821059	4599.290679	64390.07
29	34.9242	24.44694	279.0747	164.375	1631.344306	32626.88612	0.542437	4751.752	175814.8	1568.07807	755814	4233.810789	59273.35
30	32.085	22.4595	256.387	151.0119	1498.722435	29974.4487	0.498339	4365.453	161521.8	1440.599495	694369	3889.618636	54454.66
31	29.4112	20.58784	235.021	138.4274	1373.826563	27476.53126	0.45681	4001.658	148061.4	1320.547292	636504	3565.477689	49916.69
32	26.8931	18.82517	214.8992	126.5756	1256.203594	25124.07188	0.4177	3659.048	135384.8	1207.485937	582008	3260.212029	45642.97
33	24.5216	17.16512	195.9489	115.4139	1145.428458	22908.56915	0.380866	3336.384	123446.2	1101.006844	530685	2972.718478	41618.06
34	22.2882	15.60174	178.1021	104.9021	1041.10411	20822.0822	0.346177	3032.51	112202.9	1000.728367	482351	2701.966592	37827.53
35	20.1849	14.12943	161.2949	95.00267	942.8568639	18857.13728	0.313509	2746.337	101614.5	906.291312	436832	2446.986542	34257.81