

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**

**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA CENTRAL  
ELÉCTRICA APROVECHANDO EL BIOGÁS GENERADO POR EL  
RELLENO SANITARIO DEL INGA”**

**AUTOR:**

**LUIS ANÍBAL CRISANTO PERRAZO**

**DIRECTOR:**

**JUAN ALBERTO BUCHELI ÁVILA**

**Quito, octubre de 2013**

### **DECLARATORIA DE AUTORÍA:**

Yo, Luis Aníbal Crisanto Perrazo autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 28 de octubre del 2013

---

**Luis Aníbal Crisanto Perrazo**

**CC: 171567040-0**

**AUTOR**

**CERTIFICA:**

Yo, Ing. Juan Alberto Bucheli Ávila certifico haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la tesis, así como el funcionamiento del “Estudio de factibilidad para implementar una central de generación eléctrica aprovechando el biogás generado por el Relleno Sanitario del Inga” realizada por el Sr. Luis Aníbal Crisanto Perrazo, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autorizo su presentación.

Quito, 28 de octubre del 2013

---

**Ing. Juan Alberto Bucheli Ávila**  
**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA**

*Esta tesis es dedicada con  
mucho amor a mí familia:  
padres, hermanas, esposa y  
en especial a mis hijos  
quienes han sido un pilar  
importante para poder llegar  
a este momento tan  
importante en mi vida  
profesional.*

*Luis Aníbal Crisanto Perrazo*

## **AGRADECIMIENTO.**

*Mis sinceros agradecimientos están dirigidos hacia el Ingeniero Luciano Taco Gerente de la compañía Gasgreen s.a., quien con su ayuda desinteresada, me brindó información relevante, y confidencial. A los colaboradores de la planta de extracción y quema de biogás del Gasgreen s.a. Un agradecimiento especial a mi director y amigo el Ingeniero Juan Bucheli Ávila, sin el cual no hubiera podido salir adelante en la presentación de esta tesis.*

## ÍNDICE GENERAL.

CAPÍTULO I.....	3
RECURSOS BIOMÁSICOS .....	3
1.1 Recursos de biomasa en el Ecuador.....	3
1.1.1 Biomasa natural .....	4
1.1.2 Biomasa residual. ....	4
1.1.3 Biomasa en el Ecuador .....	5
1.2 Generación de biogás .....	7
1.2.1 Producción de biogás.....	7
1.3 Parámetros del biogás .....	12
1.3.1 Composición del biogás. ....	12
1.3.2 Características del biogás .....	14
1.3.3 Equivalencias energéticas del biogás .....	15
1.4 Rellenos sanitarios .....	16
1.4.1 Métodos constructivos y operativos de un relleno sanitario .....	17
CAPÍTULO II .....	21
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	21
2.1 Extracción de biogás .....	21
2.1.1 Drenaje activo.....	22
2.1.2 Drenaje pasivo .....	25
2.2 Tratamientos previos .....	28
2.2.1 Purificación de biogás. ....	29
2.3 Tipos de generadores.....	35
2.3.1 Motores de combustión interna (lean-burn) .....	36
2.3.2 Micro turbinas .....	38
2.3.3 Generador eléctrico. ....	39
2.4 Cantidad generada de biogás.....	40

2.4.1	Método A: Aproximación simple.....	40
2.4.2	Método B: Modelo de degradación de primer orden.....	41
	CAPÍTULO III.....	45
	FACTIBILIDAD TÉCNICA.....	45
3.1	Cálculo de caudal de biogás generado y proyección .....	45
3.1.1	Evaluación de la producción de biogás.....	48
3.2	Cálculo de la energía eléctrica generada y proyección.....	53
3.3	Selección técnica del equipo .....	56
3.3.1	Parámetros para la selección del equipo.....	56
3.3.2	Selección del equipo.....	57
3.4	SUSTENTABILIDAD TÉCNICA.....	59
	CAPÍTULO IV.....	60
	FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	60
4.1	Potencia generada.....	60
4.1.1	Planteamiento económico.....	60
4.1.2	Bases económicas.....	61
4.2	Costos de implementación.....	62
4.2.1	Inversión fija.....	62
4.2.2	Costos de operación.....	67
4.2.3	Financiamiento .....	68
4.3	Análisis costo beneficio.....	70
4.3.1	Análisis de rentabilidad económica.....	71
4.3.2	Cálculo del Valor Actual Neto.....	71
4.3.3	Calculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	72
4.3.4	Calculo del periodo de recuperación del capital Descontado (PRCD).....	73
4.4	Selección de la alternativa técnica y económicamente viable.....	75
	Conclusiones.....	77

Recomendaciones.....	78
Glosario.....	79
Bibliografía .....	81
Anexos .....	85



## ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I.....	3
RECURSOS BIOMÁSICOS .....	3
Figura 1.1. Ciclo de la biomasa.....	4
Figura 1.2: Gráfico Biomasa Residual. ....	5
Figura 1.3: Toneladas de residuos producidas por cantones.....	6
Figura 1.4: Composición de los residuos sólidos urbanos en el Ecuador. ....	8
Figura 1.5: Método de trinchera para construir un relleno sanitario.....	18
Figura 1.6: Método de trinchera Relleno Sanitario del Inga.....	18
Figura 1.6: Método de área para construir un relleno sanitario. ....	19
Figura 1.7: Método de área para rellenar depresiones. ....	20
CAPÍTULO II .....	21
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	21
Figura 2.1: Sistema de drenaje activo. ....	22
Figura 2.2: componentes del drenaje activo para el biogás. ....	23
Figura 2.3: Sistema de extracción de biogás en el relleno sanitario del Inga. ....	24
Figura 2.4: Cabeza de pozo de extracción de biogás en el RS del Inga.....	25
Figura 2.5: Estación de extracción de biogás en el RS del Inga. ....	25
Figura 2.6: Capa de compost sirviendo como filtro biológico.....	26
Figura 2.7: Pozos con malla y puntales de madera. ....	27
Figura 2.8: Pozos de tubo perforado. ....	28
Figura 2.7: Esquema del motor ciclo Otto. ....	37
Figura 2.8: esquema del motor Diésel.....	37
Figura 2.9: Esquema de micro turbina. ....	38
Figura 2.10: Esquema generador c.a. ....	39
Figura 2.11: Generador tipo, marca Stamford. ....	39

CAPÍTULO III .....	45
FACTIBILIDAD TÉCNICA. ....	45
Figura 3.1: Ingreso de datos para cálculo de biogás generado.....	51
Figura 3.2: Grafico de la proyección de generación y recuperación de biogás utilizando el modelo de .....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I.....	3
RECURSOS BIOMÁSICOS .....	3
Tabla 1.1: Composición típica del biogás en % volumen. ....	13
Tabla 1.2: Peso molecular y densidad de gases de rellenos sanitarios, en condiciones normales (0°C, 1 atm). ....	13
Tabla 1.3: Distribución porcentual típica de gases de rellenos sanitarios durante los primeros 48 meses. ....	14
CAPÍTULO II .....	21
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	21
Tabla 2.1: requerimientos mínimos del biogás para su aprovechamiento.....	29
Tabla 2.2: Resumen de tecnologías para la purificación de biogás en vertederos. ....	34
Tabla 2.3: Resumen de tecnologías para la purificación de biogás en vertederos. ....	35
Tabla 2.4: Valores sugeridos para k y Lo por la EPA. ....	42
CAPÍTULO III.....	45
FACTIBILIDAD TÉCNICA. ....	45
Tabla 3.1: Cantidad total de residuos acopiados en el Relleno Sanitario del Inga. ....	46
Tabla 3.2: Distribución de los residuos sólidos a nivel cantonal 2012. ....	47
Tabla 3.3: Proyección de la generación de biogás por aproximación simple. ....	49
Tabla 3.4: Proyección de la generación y recuperación de biogás utilizando el modelo de degradación de primer orden (EPA). ....	52
Tabla 3.5: Composición del biogás del Relleno Sanitario del Inga, 2012. ....	54
Tabla 3.6: Estimación de generación de energía eléctrica. ....	55
Tabla 3.7: Precios preferenciales de pago para la generación de electricidad con Energía Renovables en (cUSD/kWh). ....	56
Tabla 3.8: Parámetros hacer tomados en cuenta en la matriz de decisión. ....	57
Tabla 3.9: Matriz de decisión para la selección de Generador eléctrico mediante biogás.....	58
Tabla 3.10: Matriz de decisión para la selección de Generador eléctrico mediante biogás.....	58
CAPÍTULO IV.....	60
FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	60
Tabla 4.1: Precios Preferentes Energía Renovables en (cUSD/kWh). ....	61
Tabla 4.2: Costos de permisos y concesiones. ....	63

Tabla 4.3: Costos de equipos y auxiliares mayores.....	63
Tabla 4.4: Costo de construcción de obra civil. ....	64
Tabla 4.5: Costo de construcción de obra eléctrica.....	64
Tabla 4.6: Costo de servicios e insumos estimados. ....	65
Tabla 4.7: Costo de puesta en marcha del proyecto. ....	66
Tabla 4.8: Costo de imprevistos en el proyecto. ....	66
Tabla 4.9: Resumen de inversiones del proyecto. ....	66
Tabla 4.10: Costo del mano de obra indirecta.....	67
Tabla 4.11: Costo del mano de obra directa. ....	67
Tabla 4.12: Costo de suministros. ....	68
Tabla 4.13: Resumen de costos de operación.....	68
Tabla 4.14: Cuadro datos de financiamiento.....	69
Tabla 4.15: Cuadro de financiamiento bancario en periodo de 5 años. ....	69
Tabla 4.17: Ingresos generados por los generadores el primer año. ....	70
Tabla 4.17: Ingresos generados por los generadores para el segundo año en adelante.....	71
Tabla 4.18: Ingresos generados por los generadores.....	74
Tabla 4.19: Cálculo del VAN, TIR y PAY BACK. ....	74

## **ÍNDICE DE ANEXOS.**

MAPAS DE CENSO NACIONALES .....	86
ESTUDIO AMBIENTAL .....	87
CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL.....	88
HOJA DE CÁLCULO EPA.....	89
OFERTA ECONÓMICA AB ENERGY .....	90
REGULACIÓN CONELEC 004/11 .....	91

# “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA CENTRAL ELÉCTRICA APROVECHANDO EL BIOGÁS GENERADO POR EL RELLENO SANITARIO

Luis Aníbal Crisanto Perrazo

anibalcrisanto@hotmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

## **Resumen.**

En la presente tesis de grado, se aborda el aprovechamiento de los recursos biomásicos en forma de biogás, su purificación y posterior utilización para la generación de energía eléctrica. El Relleno Sanitario del Inga, sitio de disposición final de los residuos sólidos urbanos producidos en el Distrito Metropolitano de Quito, lugar escogido para la realización de este estudio.

La cantidad de gas estimada a ser obtenida del Relleno del Inga, se calculó a partir del modelo de degradación de primer orden sugerido por la EPA y adaptado para el Ecuador. Para su uso es necesario conocer el promedio anual de recepción de residuos sólidos, el número de años que el relleno lleva abierto o que relleno lleva cerrado, sin recibir residuos, el potencial de generación de metano y la tasa de generación anual de metano de los residuos.

Una vez llenados estos campos el software nos arroja los resultados aproximados de la cantidad de biogás que se podrá obtener del relleno por año, durante el tiempo que dura el proyecto, que es aproximadamente quince años contados desde el año 2014. Una vez estimada la cantidad de biogás, se realiza la analogía con un estimado de concentración de CH<sub>4</sub>, del 95%, a la cantidad de kWh que se obtendría.

Con este dato teórico se escoge el generador más adecuado en función de los parámetros técnicos y que disponibles en el mercado. Como último paso y decisivo, se realiza el estudio de la factibilidad económica del proyecto, arrojando resultados satisfactorios que apuntalan la decisión de aprovechar el biogás generado en el Relleno Sanitario del Inga.

## **INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad uno de los problemas más comunes en las grandes ciudades como Quito es la disposición final de los residuos sólidos, ya que estos al tener un mal manejo son fuente de contaminación tanto en el suelo por la contaminación de líquidos lixiviados como la atmosférica por la producción de biogás el cual está compuesto por una gran parte de metano ( $\text{CH}_4$ ), el cual se lo puede usar como fuente de energía por sus propiedades de combustible.

La producción de energía eléctrica mediante el uso de la biomasa y más exactamente mediante el uso del biogás en el Ecuador no es una tecnología muy común por lo que se convierte en una fuente de energía eléctrica alternativa y como tal cabe dentro de la matriz energética del país y de las políticas de gobierno actuales, las cuales tratan de minimizar el uso de la energía eléctrica proveniente de recursos petroleros ya que en cualquier momento pudiera existir un incremento en el precio de estos elevando el costo de producción de la energía proveniente de estas fuentes y a su vez la contaminación que en estas se produzca, provocando el no cumplimiento de políticas ambientales locales como internacionales.

El uso del biogás como fuente de combustible para generadores eléctricos ayuda a mejorar el tratamiento y manejo de los desechos de cualquier fuente que estos provengan como agrícolas, forestales o urbanos.

Teniendo en cuenta este argumento el presente trabajo de investigación analizará y determinará la factibilidad técnica como económica para poder llevar a cabo el proyecto de generación de energía eléctrica mediante el uso de biogás como fuente de combustible alternativa. Para lo cual se tiene que analizar y determinar la cantidad y calidad del biogás que se puede obtener en el Relleno Sanitario de Quito, y a su vez su correspondiente cantidad en energía eléctrica producida por el biogás obtenido.

# **CAPÍTULO I**

## **RECURSOS BIOMÁSICOS**

Se considera recursos biomásicos a cualquier materia orgánica que provenga de animales o vegetales mediante el proceso de la fotosíntesis es decir la clorofila de las plantas captura su energía y convierte el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma original de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar que durará indefinidamente mientras duren los recursos. [1]

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población y las actividades productivas por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar. [1]

Con esto podríamos decir que la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una tasa más rápida. Donde la energía obtenida se convierte en una forma de energía renovable. [1]

### **1.1 Recursos de biomasa en el Ecuador.**

Los recursos de biomasa en el Ecuador son bastante grandes y extensos al ser un país con gran capacidad de recursos agrícolas y forestales los cuales pueden generar gran cantidad de desechos estos se los puede usar en la generación de energías alternativas.

La definición más apropiada de lo que es la biomasa la da Ana Hidalgo en su publicación “Valoración de residuos de biomasa en la industria de la construcción” dice lo siguiente:

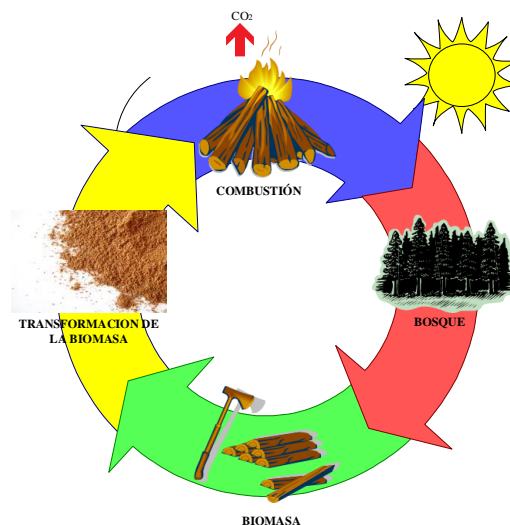


*“La biomasa es la materia orgánica de origen animal o vegetal, o procedente de cualquier transformación de las mismas, considerando tanto las que se producen de forma natural como artificial” [2]*

Según el concepto descrito la biomasa es toda materia orgánica reciente por lo que no contemplaría como tal a los combustibles fósiles. Para muestra definición dada se la puede sub clasificar en biomasa natural y biomasa artificial.

### 1.1.1 Biomasa natural

Es la que se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana como los bosques naturales, tal como se muestran en la Figura 1.1. El problema que presenta este tipo de biomasa es la necesaria gestión de la adquisición y transporte del recurso al lugar de utilización. Esto puede provocar que la explotación de esta biomasa sea económicamente inviable.



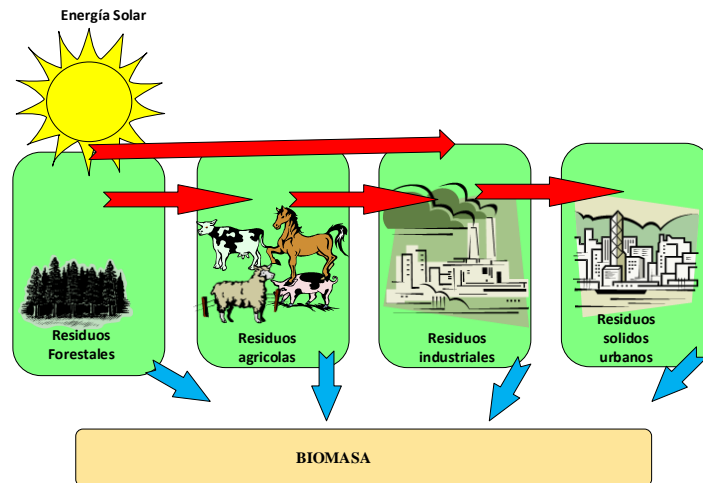
**Figura 1.1.** Ciclo de la biomasa.  
**Fuente:** Biomasa NJP, 2012, En línea  
**Autor:** Modificado por Luis Crisanto

### 1.1.2 Biomasa residual.

Es la que genera cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los propios del ser humano, tales como:

- Residuos forestales y agrícolas.
- Residuos de industrias forestales y agrícolas.
- Residuos sólidos urbanos (RSU<sup>1</sup>).
- Residuos biodegradables, con altos contenidos de humedad. (Efluentes ganaderos, lodos de depuradoras, aguas residuales urbanas)

Los tipos de biomasa residual se los visualiza en la Figura 1.2



**Figura 1.2:** Gráfico Biomasa Residual.

**Fuente:** Ministerio de Energía de Chile, 2010, En línea

**Autor:** Modificado por Luis Crisanto

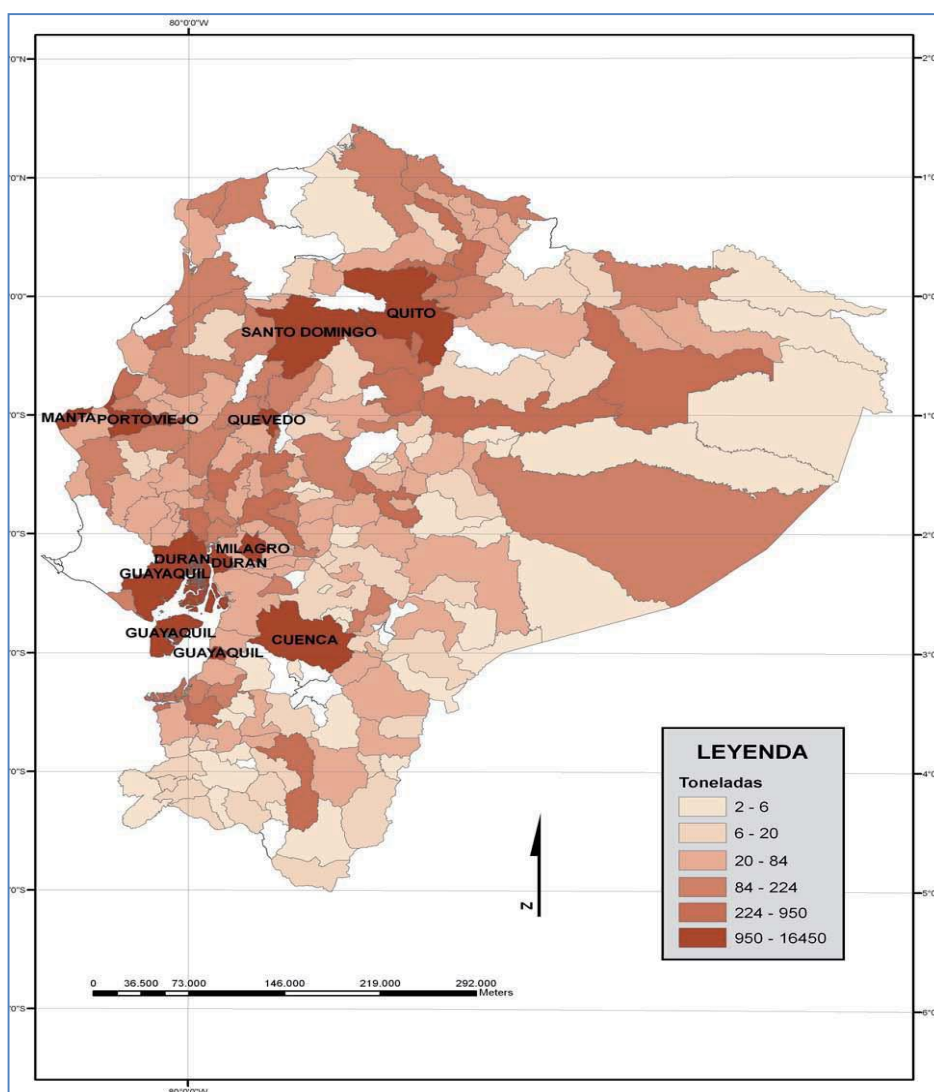
### 1.1.3 Biomasa en el Ecuador

El Ecuador al tener una posición geográfica y un clima privilegiado para su sector agrícola y forestal éste se aprovecha de la mejor forma en la producción de plátano (en todas sus variedades), palma africana, caña de azúcar, maíz y varias de sus especies se cultivan en todo su territorio. Al momento de la cosecha, preparación y utilización de estos productos se generan grandes cantidades de residuos orgánicos lo que conlleva una gran cantidad de biomasa residual.

En la actualidad en el Ecuador no se utiliza de forma eficiente y continua toda la biomasa que se produce por la agroindustria con excepción de ciertos proyectos puntuales donde los desperdicios se los utiliza para la generación de energías alternativas, por ejemplo en uno de estos proyectos se usa el bagazo de la caña de azúcar para la generación de energía eléctrica. Para poder conocer más afondo la

<sup>1</sup> RSU; de su siglas Residuos Sólidos Urbanos.

realidad de los residuos sólidos del Ecuador, el MAGAP<sup>2</sup>, a través de su filial, SIGAGRO<sup>3</sup> ha realizado un levantamiento detallado de los diferentes cultivos en el territorio nacional, como se puede observar en el Anexo 1 donde se encuentran varios mapas los cuales contienen información la producción de distintos productos cultivados por ciudades, algunos de estos mapas se encuentran actualizados al 2012. En la Figura 1.3 se presenta el mapa de residuos sólidos producidos por cantones, en el mismo se pueden apreciar cifras en toneladas métricas de biomasa residual que se genera. Como se observa, en el cantón Quito, provincia de Pichincha con uno de los aportes más altos de basura.



**Figura 1.3:** Toneladas de residuos producidas por cantones.

**Fuente:** M.F. Solíz, Tesis doctoral, UASB.

**Autor:** María Fernanda Solíz.

<sup>2</sup> MAGAP por sus siglas Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca.

<sup>3</sup> SIGAGRO por sus siglas Dirección del Sistema de Información Geográfica para el sector Agropecuario

## **1.2 Generación de biogás**

En la generación de biogás existe una gran diversidad de residuos naturales orgánicos a partir de los cuales se puede generar biogás, entre los principales podemos nombrar: los desechos provenientes de animales de granja como vacas, cerdos y aves, residuos vegetales como pajas, pastos, hojas secas, residuos forestales y residuos domésticos. El biogás es un gas que está compuesto principalmente por gas metano en un 55% a 65% producido por la digestión anaeróbica (en la ausencia del oxígeno) de materia orgánica. A este gas se conoce con varios nombres, dependiendo de su origen, dado que la digestión anaeróbica es muy frecuente en los cenagales se le da el nombre gas de pantano. Sin embargo, no tiene mucha relevancia donde éste se forme, ya que todo tipo de biogás se produce con las mismas reacciones químicas para tener cerca de la misma composición gaseosa. El biogás con su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede ser usado para cocinar, iluminar, generar calor y electricidad. [3]

### **1.2.1 Producción de biogás**

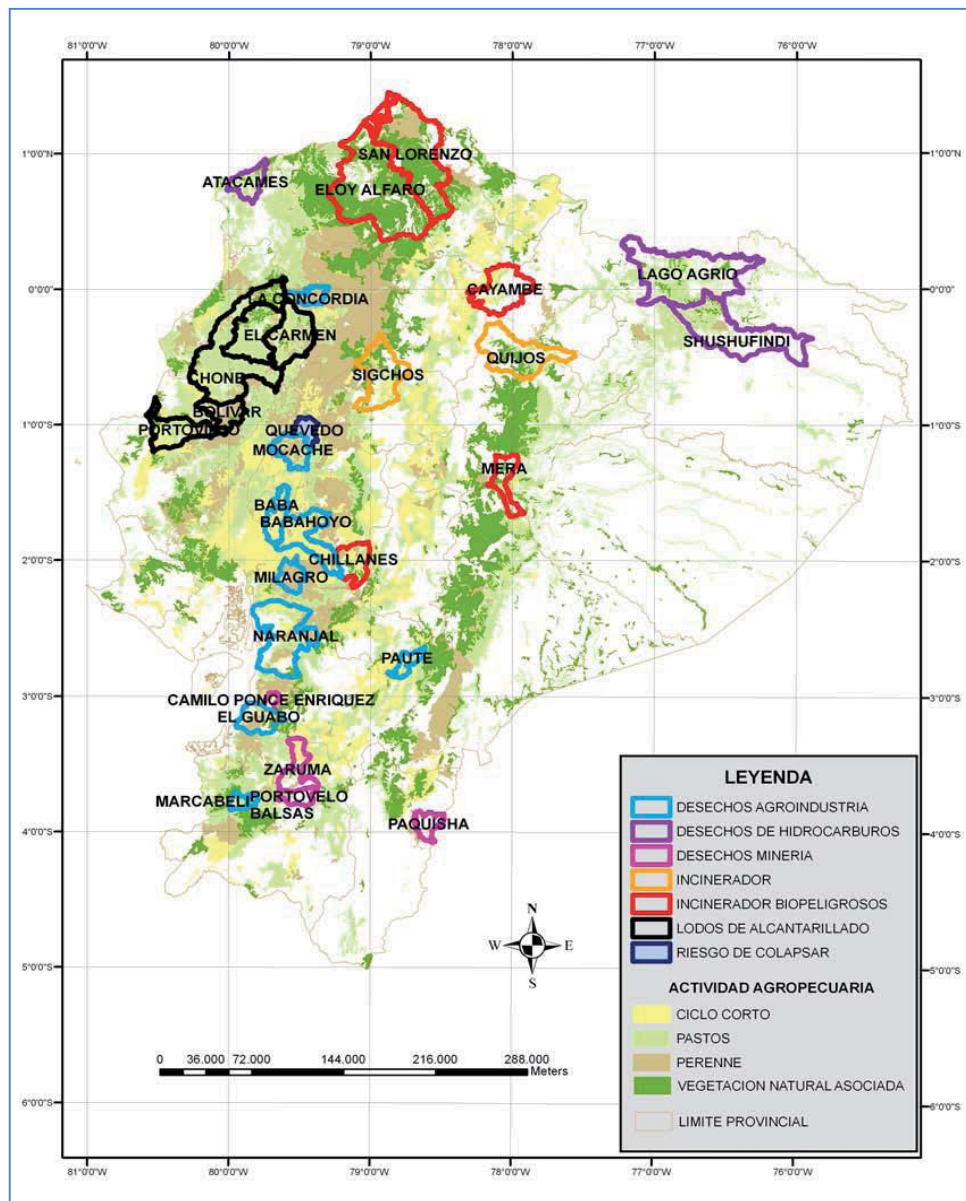
Un relleno sanitario, al ser un lugar donde los residuos sólidos urbanos se depositan en grandes cantidades, es considerado un bioreactor<sup>4</sup> en el que se generan gases (biogás) y líquidos percolados, debido a la descomposición que sufre la materia orgánica contenida en dichos residuos. Sin embargo, esto dependerá de una serie de factores, como las características de la basura depositada, el lugar donde se deposite, el tipo de compactación, el clima del lugar, entre otros. [4]

La cantidad de biogás que se produce en los rellenos sanitarios depende de la composición de los desechos contenidos en éstos y es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica degradable disponible. Generalmente, la cantidad de materia orgánica contenida en los residuos sólidos urbanos no es conocida, pero se puede considerar un 25 a 30% de éstos. [5]

---

<sup>4</sup> Bioreactor: es un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo

La composición estimada de los desechos en el Ecuador, tal como se expone en la Figura 1.4, muestran que residuos poseen un tiempo de degradación diferente, por ejemplo, los alimentos se descomponen más rápido que los productos de papel.



**Figura 1.4:** Composición de los residuos sólidos urbanos en el Ecuador.  
**Fuente:** MIDUVI, 2009, Censo de agua potable, alcantarillado y residuos sólidos.  
**Autor:** MIDUVI.

Aunque el cuero, la goma y algunos plásticos también son materias orgánicas, usualmente se resisten a la biodegradación. Algunos materiales plásticos, textiles y otras materias orgánicas son muy resistentes a la descomposición vía microorganismos anaeróbicos. A pesar de que la degradación de los residuos varía en gran proporción,

se han desarrollado métodos empíricos para predecir la cantidad de CH<sub>4</sub><sup>5</sup> y CO<sub>2</sub><sup>6</sup> que se generan en la descomposición de algunos materiales. [4]

En un relleno nuevo, que acaba de iniciar operaciones, la producción de biogás puede empezar después de varios meses, pero en rellenos existentes, se nota generalmente una producción de biogás después de poco tiempo, alrededor de una semana. [7]

El periodo de tiempo necesario para que un residuo sólido sea degradado y produzca biogás depende de algunas variables como son: los nutrientes presentes en la basura, el número de organismos, la temperatura a la cual se encuentra el residuo, el contenido de humedad, la densidad de la compactación, la acidez (pH<sup>7</sup>), entre otros. [4]

Otro punto importante para la generación de biogás son los nutrientes provenientes de los lodos de tratamientos de aguas residuales, excrementos de animales y de seres humanos que agregando humedad ayudan a que se desarrollen más rápidamente los microorganismos anaerobios.

Los rellenos sanitarios deben ser cubiertos con una capa de tierra pues evita que los RSU<sup>8</sup> estén en contacto con el aire, y contribuye a que los microorganismos aerobios consuman el aire existente entre la basura, permitiendo la generación de condiciones anaeróbicas, que hace posible la producción de biogás. Mientras más rápido se den éstas condiciones, menor será el tiempo en que comience a degradarse la basura. [4]

Para generar un mayor contacto entre los nutrientes de la basura, mantener su humedad y expulsar el oxígeno presente en los espacios de los diferentes tipos de residuos sólidos, se utiliza el método de compactación de la basura el cual, reduce hundimientos e infiltraciones, inestabilidades, el corrimiento de la superficie de las basuras, la inflamabilidad, la aparición de zanjas, además, se reduce el tiempo en que se inicia la biodegradación anaeróbica, por lo tanto se puede acelerar la producción de biogás. [4]

---

<sup>5</sup> CH<sub>4</sub> de su símbolo químico para el Metano.

<sup>6</sup> CO<sub>2</sub> de su símbolo químico para el dióxido de carbono

<sup>7</sup> pH medida de acidez o alcalinidad de una disolución

<sup>8</sup> RSU de sus siglas Residuos Sólidos Urbanos

Cuando las condiciones del proceso de producción de gases son controladas, la generación de biogás es más homogénea y será más fácil predecir el nivel de biodegradación que ocurrirá en el relleno sanitario. [5]

La biodegradación de los residuos sólidos, en la cual se da la producción de gases, sigue un patrón de cinco etapas que son: [7]

**Primera etapa:** es aeróbica, el oxígeno del aire que está en contacto con la basura ocasiona que las sustancias de fácil biodegradación se comiencen a degradar a partir de su contacto con el oxígeno. Aquí comienza la descomposición microbiana de los compuestos orgánicos. Después, se produce CO<sub>2</sub>, agua, materia parcialmente descompuesta y energía (temperaturas de entre 35 °C y 40 °C). En general, es una etapa relativamente corta, ya que depende de la cantidad de oxígeno presente.

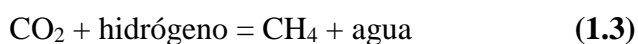
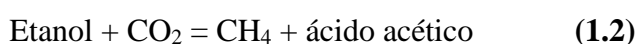
**Segunda etapa:** se destaca por la acción de organismos formadores de ácidos. Es una etapa aeróbica, durante la cual no se desarrollan condiciones anaeróbicas. Ocurre un proceso de fermentación donde se producen ácidos orgánicos y una disminución del pH (con ello se disuelven los elementos inorgánicos del agua). En estas condiciones, el biogás está compuesto básicamente de CO<sub>2</sub>. Esta fase se caracteriza por el descenso de las condiciones aerobias, disminuye la presencia de oxígeno hasta su completa desaparición, comenzando aquí la etapa anaerobia. El oxígeno desaparece del metabolismo respiratorio, siendo sustituido por compuestos inorgánicos oxidados, como el nitrito y el sulfito, los cuales son sometidos a un potencial de oxidación-reducción, estos se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. [4]

**Tercera etapa:** se acelera la actividad microbiana iniciada en la etapa anterior, comienza la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas hidrógeno. Aquí predominan las bacterias acidogénicas, que transforman enzimáticamente o por hidrólisis, a compuestos con alto peso molecular como los lípidos, proteínas, ácidos nucleicos y polisacáridos, en diferentes compuestos, aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuente de energía y como transformación a carbono celular. [4]

Las principales características de la tercera etapa son: la generación de compuestos gaseosos como CO<sub>2</sub> y gas de hidrógeno H<sub>2</sub>. El pH de la fase líquida del medio, si es que existe, caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>. También, la demanda química de oxígeno (DQO)<sup>9</sup> la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO<sub>5</sub>)<sup>10</sup>, y la conductividad del medio líquido se incrementarán significativamente, debido a la disolución de ácidos orgánicos. [4]

**Cuarta etapa:** está dominada por microorganismos llamados metanogénicos y se desarrolla en estado estrictamente anaerobio. Estos organismos se caracterizan por convertir ácido acético y gas de hidrógeno, en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Ésta es la fase en la que el CH<sub>4</sub> alcanza su más alto nivel de producción, en una concentración estable en el rango de 40% a 60% por volumen de biogás. Los ácidos orgánicos disueltos en los líquidos percolados se descomponen inmediatamente en biogás.

A causa de la conversión del gas hidrógeno y de los ácidos en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, el pH de la fase líquida subirá a valores de 6.8 a 8, reduciendo las concentraciones de DBO<sub>5</sub> y DQO, así como el valor de la conductividad del líquido. Con el incremento del pH, disminuye la concentración de componentes inorgánicos en la disolución y, como resultado, también disminuye la concentración de metales pesados [4], presentando las reacciones 1.1, 1.2 y 1.3:



---

<sup>9</sup> DQO por sus siglas: Demanda Química de Oxígeno, es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

<sup>10</sup> DBO por sus siglas: Demanda Bioquímica de Oxígeno, es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidadada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. DBO<sub>5</sub> Ídem anterior, pero medido a los 5 días de proceso de la muestra.



En la cuarta etapa el biogás está compuesto principalmente por: CH<sub>4</sub> entre 30% y 70% del volumen (promedio 55%), el cual tiene un poder calorífico muy elevado de 9.60 KWh/ (Nm<sup>3</sup>)<sup>11</sup>. El resto del volumen del gas está compuesto de CO<sub>2</sub>. [5]

Los gases anteriores no son tóxicos y no tienen olor, pero el biogás transporta también otros gases en cantidades ínfimas que pueden tener un olor muy fuerte y desagradable aún en proporciones mínimas, pueden ser tóxicos y corrosivos para las instalaciones de biogás, tales como: hidrógeno sulfuroso H<sub>2</sub>S, mercaptano, entre otros. Son estos gases los que producen el olor típico de los rellenos sanitarios y los botaderos a cielo abierto. [8]

**Quinta etapa:** es la parte del proceso de generación de gases menos activa, ya que en el medio sólo queda materia orgánica de degradación lenta, sin embargo, aquí se genera otra pequeña cantidad de material biodegradable, que anteriormente no estaba presente, la cual es convertida en CH<sub>4</sub>. En este punto la velocidad de generación de biogás del relleno sanitario disminuye significativamente. [4]

En un relleno sanitario, las etapas anteriores pueden darse simultáneamente. Además, la heterogeneidad de los residuos enterrados varía la duración de las etapas, por la mayor o menor facilidad de degradación. [9]

### **1.3 Parámetros del biogás**

Los parámetros del biogás tienen relación a su composición química la cual debe tener ciertas cuantificaciones para que este tenga algún tipo de utilización o reutilización dentro del algún proceso de generación.

#### **1.3.1 Composición del biogás.**

El CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub>, son los principales gases constituyentes del biogás y se producen durante la descomposición anaeróbica de la celulosa y las proteínas en los residuos de

---

<sup>11</sup> Nm<sup>3</sup> de sus siglas: se utiliza como variable de referencia el volumen normal (metros cúbicos normales, Nm<sup>3</sup>)

los rellenos sanitarios, es decir en la tercera etapa. Además de los gases nombrados, en los rellenos también se genera una pequeña proporción de compuestos orgánicos no metanogénicos. En la Tabla 1.1, se describen los componentes del biogás y los valores encontrados en % del volumen. Los gases encontrados en rellenos sanitarios incluyen: aire, amoníaco (NH<sub>3</sub>), CO<sub>2</sub>, monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico(H<sub>2</sub>S), metano (CH<sub>4</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>).

COMPONENTE	VALOR	
	Típico (%)	Máximo observado (%)
CH <sub>4</sub>	63,8	77,1
CO <sub>2</sub>	33,6	89,3
Oxígeno	0,16	20,9
Vapor de agua, H <sub>2</sub> O	1,00	2,00
Nitrógeno	2,4	80,3
Hidrogeno	0,05	21,1
Monóxido de carbono	0,001	N/A
Hidrocarburos saturados	0,0053	0,74
Hidrocarburos insaturados	0,009	0,48
Compuestos halogenados	0,000023	0,032
Compuestos de azufre	0,000023	0,0014

**Tabla 1.1:** Composición típica del biogás en % volumen.

**Fuente:** J.P.V.M., Wastes Manage, Laurijssens, 2011.

**Autor:** J.P.V.M.

En la Tabla 1.2 se presentan datos sobre el peso molecular y la densidad de estos gases.

Gas	Fórmula	Peso Molecular (g/mol)	Densidad (g/L)
Aire	N/A	N/A	1,2928
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17,03	0,7708
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44,00	1,9768
Monóxido de carbono	CO	28,00	1,2501
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	2,016	0,0898
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	34,08	1,5392
Metano	CH <sub>4</sub>	16,03	0,7167
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28,02	1,2507
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32,00	1,4289

**Tabla 1.2:** Peso molecular y densidad de gases de rellenos sanitarios, en condiciones normales (0°C, 1 atm).

**Fuente:** R.h.P.Don W. Green, Perry's Chemical Engineers Handbook, 2007.

**Autor:** R.h.P.Don W. Green, Perry's

En la Tabla 1.3 se reportan datos típicos de la distribución porcentual de gases encontrados en rellenos sanitarios. La descomposición aerobia continúa ocurriendo hasta que el oxígeno del aire, inicialmente presente en los residuos compactados, se

agota; después de eso procederá la descomposición anaerobia. Después de alrededor de 18 meses la composición del gas permanece razonablemente constante.

Intervalo de tiempo desde la terminación de la celda (meses)	Porcentaje promedio en volumen (%)		
	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
0-3	5,2	88	5
3-6	3,8	76	21
6-12	0,4	65	29
12-18	1,1	52	40
18-24	0,4	53	47
24-30	0,2	52	48
30-36	1,3	46	51
36-42	0,9	50	47
42-48	0,4	51	48

**Tabla 1.3:** Distribución porcentual típica de gases de rellenos sanitarios durante los primeros 48 meses.

**Fuente:** R.h.P.Don W. Green, Perry's Chemical Engineers Handbook, 2007.

**Autor:** R.h.P.Don W. Green, Perry's

Cuando el CH<sub>4</sub> está presente en concentraciones de entre 5% y 15% con aire es explosivo. Dicha explosividad estará limitada por las concentraciones de oxígeno presentes y será también regida por la capacidad del CH<sub>4</sub> de migrar fuera del sitio de disposición final y mezclarse con el aire.

### 1.3.2 Características del biogás

Según el Fondo Europeo de Desarrollo Regional en su Informe complementario sobre el Estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura realizado en diciembre del 2010 dice: *“La riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. La producción de biogás para cada tipo de substrato es variable en función de su carga orgánica y de la biodegradabilidad de la misma”*. En general, los residuos orgánicos industriales y la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) presentan potenciales elevados de producción. Los residuos ganaderos y los lodos de depuradora presentan, sin embargo, potenciales menores, debido al relativamente bajo contenido en materia orgánica y a la baja biodegradabilidad de la misma.

Existen opciones que permiten mejorar la producción de biogás de estos residuos tales como:

- a) Mezcla con residuos de mayor producción potencial (codigestión)
- b) Pre tratamiento para mejorar la degradabilidad del sustrato
- c) Aumento de la temperatura para mejorar la velocidad de crecimiento de los microorganismos.

### 1.3.3 Equivalencias energéticas del biogás

Basándose en la Tabla 1.1 el biogás está compuesto por alrededor de 60 % de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y 40 % de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Contiene mínimas cantidades de otros gases, entre ellos 1 % de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de 700 °C., y su llama alcanza una temperatura de 870 °C. Con un contenido de metano mucho menor de 50 %, el biogás deja de ser inflamable. Su poder calorífico promedio de un biogás que contenga un 60% de metano es de 5000 kcal. Un metro cúbico de biogás permite generar entre 1,3 kWh a 1,6 kWh, que equivalen a medio litro de petróleo, aproximadamente. [10]

El equivalente energético del biogás tiene relación con la concentración de metano que tenga en él, ya que el poder calorífico del  $\text{CO}_2$  es nulo. Así cuanto mayor sea la concentración de metano en el biogás, el poder calorífico aumenta proporcionalmente. [10]

A continuación, equivalencias energéticas:

#### **Gas Natural:**

De manera aproximada el gas natural contiene un 100% de  $\text{CH}_4$  por lo tanto:

(1  $\text{Nm}^3$ )<sup>12</sup> de gas natural proporciona 11 kWh

La cantidad de  $\text{CH}_4$  al 100% necesaria para obtener aproximadamente 10 kWh de energía es de 1  $\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4$

---

<sup>12</sup>  $\text{Nm}^3$ : se utiliza como variable de referencia de volumen, la cual se denomina como Normal metro cubico para lo cual la N, se refiere en condiciones normales: temperatura = 0 °C y presión = 1 atmósfera.

1 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> produce aproximadamente 10 kWh.

### **Biogás**

1 Nm<sup>3</sup> de biogás (97 % de CH<sub>4</sub>) = 9,67 kWh.

1 Nm<sup>3</sup> de biogás (53 % de CH<sub>4</sub>) = 5,28 kWh.

### **Combustibles**

1 litro de gasolina = 9.06 kWh

1 litro de diésel = 9.8 kWh

### **Energía Eléctrica**

El rendimiento eléctrico de un motor es del 33% a 38%

1 m<sup>3</sup> de biogás ≈ 1,8 kWh de energía eléctrica.

## **1.4 Rellenos sanitarios**

En toda ciudad el progreso y aumento de población trae como resultado el crecimiento en la producción de residuos sólidos, por lo cual una de las tendencias sociales y comunes es que los desechos no terminen en sitios de disposición final. Lo cual se lo puede fácilmente evidenciar en la poca o falta de limpieza de sitios públicos, como calles, plazas y carreteras, o la aparición de residuos en orillas de ríos, bosques cercanos y en botaderos improvisados. Lo cual afecta la salud pública en especial a la comunidad que se encuentre cerca de estos, aumentando el riesgo de contaminación de los recursos naturales y a su vez deteriora la calidad de vida de la población. Es por esto que nace la necesidad de buscar soluciones a corto, mediano y largo plazo para el manejo y disposición final de los RSU. [11]

Desde el punto de vista técnico como económico, el relleno sanitario es la técnica que mejor se adapta a una región para disponer de manera sanitaria los desechos sólidos.

El relleno sanitario es una técnica de eliminación final de los desechos sólidos en el suelo, que no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública, tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de terminado el mismo. Ésta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más pequeña posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para

reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos en el relleno por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

El relleno sanitario puede tener la posibilidad de recuperar terrenos alterados por la naturaleza, como los erosionados o los alterados por el hombre. [12]

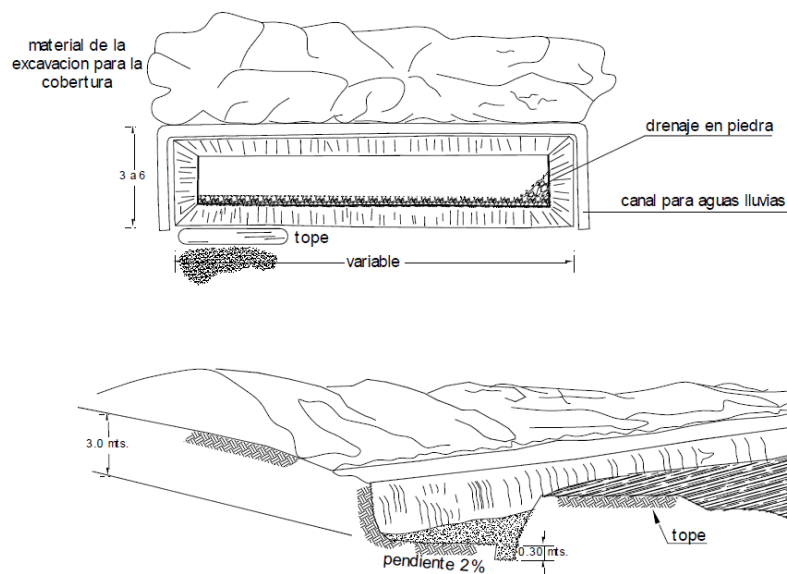
#### **1.4.1 Métodos constructivos y operativos de un relleno sanitario**

El método constructivo y la secuencia de la operación de un relleno sanitario están determinados principalmente por la topografía del terreno escogido, aunque también dependen de la fuente del material de cobertura y de la profundidad del nivel freático. Existen tres maneras distintas para construir un relleno sanitario [12] y son:

##### **Método de trinchera o zanja**

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad, con el apoyo de una retroexcavadora o tractor de oruga, aunque también existen experiencias de excavación de trincheras hasta de 7 m de profundidad. La tierra que se extrae, se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura. Los desechos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra, tal como se observa en la Figura 1.5.

Se debe tener cuidado en época de lluvias dado que las aguas pueden inundar las zanjas, por lo tanto, se deben construir canales perimetrales para captarlos y desviarlos e incluso proveerlos de drenajes internos. En casos extremos, puede requerirse el bombeo del agua acumulada. Las paredes longitudinales de las zanjas tendrán que ser cortadas de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado.



**Figura 1.5:** Método de trinchera para construir un relleno sanitario.

**Fuente:** R. Eva, Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, 2002.

**Autor:** R. Eva

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie del suelo no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación. [12]. Como es el caso de El relleno sanitario del Inga, el cual está construido de esta manera, tal como se observa en la Figura 1.6.



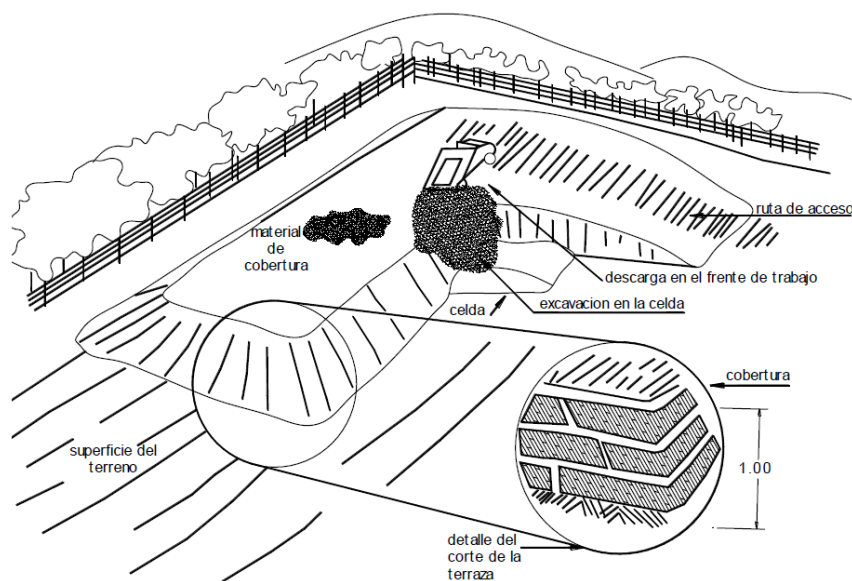
**Figura 1.6:** Método de trinchera Relleno Sanitario del Inga.

**Fuente:** Propia, Relleno Sanitario del Inga, 2012

**Autor:** Luis Crisanto

## Método del área

En áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar las basuras, éstas pueden depositarse directamente en el suelo original, elevando el nivel algunos metros. En estos casos, el material de cobertura deberá ser importado de otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. En ambas condiciones, las primeras se construyen estableciendo una pendiente suave para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno como se observa en la Figura 1.6.



**Figura 1.6:** Método de área para construir un relleno sanitario.

**Fuente:** R. Eva, Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, 2002.

**Autor:** R. Eva.

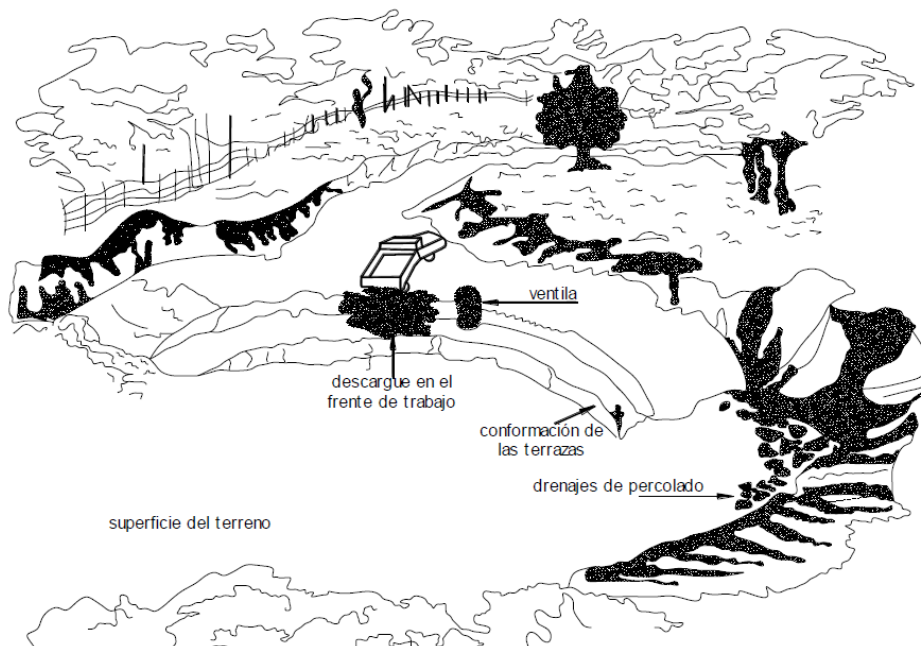
Éste método también se adapta para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad, tal como se muestra en la Figura 1.7.

El material de cobertura se excava de las laderas del terreno, o en su defecto se debe procurar lo más cerca posible para evitar el encarecimiento de los costos de transporte.

La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba. El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno, es decir, la basura se vacía en la base del talud, se extiende y apisona contra él, y se recubre diariamente con una capa de tierra de 0,10m a 0,20m de espesor; se



continúa la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave de unos 30 grados en el talud y de 1 grado a 2 grados en la superficie.



**Figura 1.7:** Método de área para rellenar depresiones.

**Fuente:** R. Eva, Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, 2002.

**Autor:** R. Eva

## **CAPÍTULO II**

### **GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

La energía eléctrica se ha convertido en la necesidad de producir alternativas de producción energética, mediante un sinnúmero de implementación de prácticas amigables con el ambiente y el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles, por lo que se ha creado un clima favorable para el estudio, promoción e implementación de tecnologías de biodigestores, obteniendo un mayor beneficio en la producción de biogás, para aprovechar de mejor manera y eficientemente este combustible para poder sustituir las tradicionales fuentes energéticas no renovables, muchas de estas escasas y costosas, convirtiendo la explotación del biogás en una actividad nueva, económica, más rentable y menos contaminante.

En América Latina, el biogás no tiene un uso frecuente y ha tenido un uso limitado a la cocción de alimentos o calefacción de animales de granja. A pesar de esto, su uso en la sustitución de combustibles fósiles como el fuel oil o diesel, para la generación de electricidad en motores de combustión interna o ciclo Otto ha cobrado mayor importancia en los últimos años. El biogás puede ser utilizado para reemplazar la gasolina hasta en un 100 %, mientras que en motores diesel sólo se logra un máximo de 80 %, debido a que la baja ignición del biogás no permite que haya explosión en este tipo de motores que carecen de bujía [13]. Uri Marchaim en su libro *Biogas processes for sustainable development* dice que para el uso del biogás en motores, es indispensable eliminar el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), ya que éste al reaccionar con agua forma ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños internos al motor [14].

#### **2.1 Extracción de biogás**

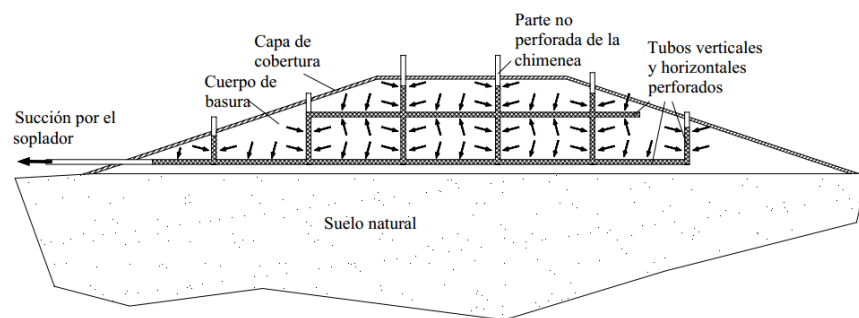
La extracción del biogás en los rellenos sanitarios, se lo puede realizar mediante dos métodos de drenaje; el drenaje activo y el drenaje pasivo. El drenaje activo consiste en drenar gas utilizando un soplador de aire es decir implementando equipo que permita

realizar dicha tarea, mientras que el drenaje pasivo utiliza la convección natural de los gases, por lo que en este método no se utiliza ningún equipo para su extracción.

De los dos métodos el drenaje pasivo es el menos costoso, debido a que no se utiliza ningún elemento para forzar al gas a salir del relleno. Pero el drenaje activo es más eficiente como veremos a continuación. [4]

### 2.1.1 Drenaje activo.

En los sistemas de drenaje activo, se succiona el gas con un soplador que se conecta con las chimeneas. Se conducen los gases hacia el incinerador por un sistema de tubería bajo el cuerpo de basura, como se muestra en la Figura 2.1 y se describen a continuación. [15].



**Figura 2.1:** Sistema de drenaje activo.

**Fuente:** José Arvizu, Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad, ITESM, 2003.

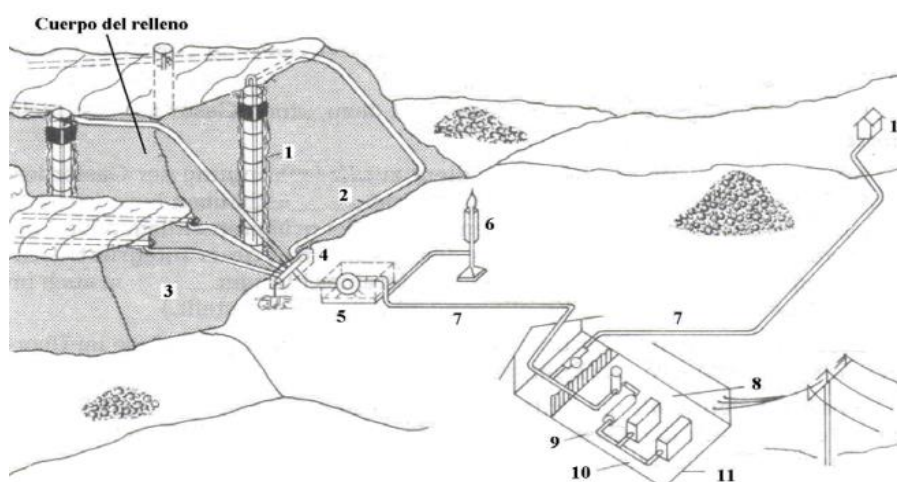
**Autor:** José Arvizu.

El sistema de drenaje activo consiste de los siguientes elementos:

1. **Colectores de gas:** Estos son las chimeneas verticales y la tubería horizontal que se colocan en el cuerpo de basura.
2. **Punto de recolección:** El gas aspirado en diferentes chimeneas se conduce a ellas y se junta. El punto de recolección puede ser un tanque o un tubo. Se recomienda ubicar el punto de recolección en un nivel a bajo de la tubería y de las chimeneas, con el fin de poder condensar en este lugar las aguas contenidas en el gas de relleno. Se debe colocar equipo de medición y ajuste en el punto de recolección.

3. **Separador de agua:** Las aguas condensadas se separan del flujo de gas mediante un sifón o equipo refrigerador; después se manda con una bomba hacia la planta de tratamiento de las aguas lixiviadas.
4. **Tubo de aspiración de gas:** Este es el tubo que conecta el punto de colección con el soplador.
5. **Ajuste de presión y soplador:** El soplador produce depresión para succionar los gases del cuerpo de relleno, y sobrepresión para mandar los gases al incinerador. El ajuste de presión mantiene la depresión y la sobrepresión en el nivel óptimo. La presión necesaria para la succión es entre 200 - 300 mbar.
6. **Casa del soplador:** En rellenos medianos o pequeños, el soplador se puede colocar en un galpón semiabierto con techo o en un contenedor. Para rellenos grandes, se recomienda colocar el soplador en el mismo edificio que el incinerador.
7. **Tubo de transporte:** Este es el tubo que conduce los gases con sobrepresión hacia el incinerador.
8. **Antorcha:** Unidad donde se quema el gas bajo control.
9. **Incinerador:** Unidad compuesta de la antorcha, del equipo para aprovechar la energía de incineración y de los equipos auxiliares (tratamiento del gas, separación de gases, ajustes etc.)

En la **Figura 2.2** muestra un sistema básico de drenaje activo con todos sus elementos constitutivos. [15]



**Figura 2.2:** componentes del drenaje activo para el biogás.

**Fuente:** José Arvizu, Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad, ITESM, 2003.

**Autor:** José Arvizu.

Donde:

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| 1) Chimenea                   | 8) Consumidor 1                             |
| 2) Colector de gas            | 9) Tratamiento del gas                      |
| 3) Drenaje de gas             | 10) Conversión del gas en energía eléctrica |
| 4) Punto de colección         | 11) Casa de turbinas                        |
| 5) Punto de transporte de gas | 12) Consumidor 2                            |
| 6) Antorcha                   |   |
| 7) Tubería de transporte      |   |

El efecto de vacío causado por el soplador (compresor) debe actuar en todo el cuerpo de la basura. La capacidad del efecto de vacío debe ser apropiada para la cantidad de biogás generado, los ductos de succión deben ser lo más cortos posibles así se tendría menor pérdida de presión. El sistema debe concebirse para lograr tener una gran vida útil. Al iniciar la construcción de un relleno sanitario se puede colocar tubería horizontal en diferentes niveles del cuerpo de la basura para la recolección del biogás que se genera en los distintos niveles, para que si existe algún tipo de daño sea posible cambiar el sistema y colocar pozos de recolección.

El relleno sanitario del Inga para la captación del biogás generado por los residuos sólidos utiliza el drenaje activo mediante el sistema de extracción instalado en el sitio, como se puede mirar en la Figura 2.3, Figura 2.4, Figura 2.5.



**Figura 2.3:** Sistema de extracción de biogás en el relleno sanitario del Inga.

**Fuente:** Propia, Relleno Sanitario del Inga, 2012.

**Autor:** Luis Crisanto.



**Figura 2.4:** Cabeza de pozo de extracción de biogás en el RS del Inga.

**Fuente:** Propia, Relleno Sanitario del Inga, 2012.

**Autor:** Luis Crisanto.



**Figura 2.5:** Estación de extracción de biogás en el RS del Inga.

**Fuente:** Propia, Relleno Sanitario del Inga, 2012.

**Autor:** Luis Crisanto.

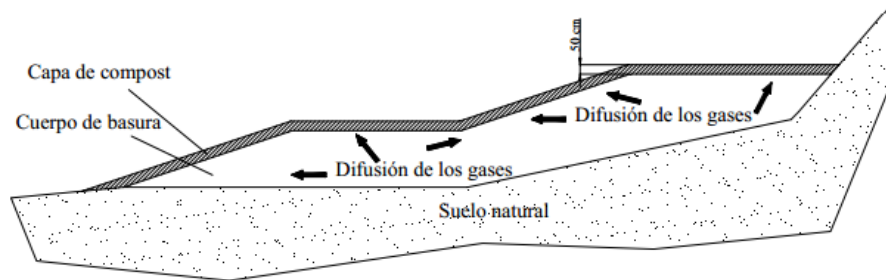
### **2.1.2 Drenaje pasivo**

El drenaje pasivo es un sistema en el cual no se fuerza al biogás a salir por lo que los caudales dependen del tamaño y otros factores propios de cada uno de los sitios para que se lo pueda extraer.

#### **Drenaje pasivo sin pozo de recolección**

En un relleno sanitario el biogás que generado se mueve de forma horizontal en las diferentes capas de basura. Se difunde por la capa de recubrimiento superior y por los

taludes laterales, que tienen un impacto como filtro biológico, especialmente cuando el drenaje pasivo se lo aplica en un relleno sanitario que se encuentra en operación, por eso es de gran importancia recubrir diariamente la basura con una capa de tierra, evitando así la contaminación atmosférica por los gases emitidos, tal como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Capa de compost sirviendo como filtro biológico.

**Fuente:** R. Eva, Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, 2002.

**Autor:** R. Eva

El gas emitido se mezcla con el aire de la atmósfera y se diluye. Este sistema provoca algunos problemas, entre los más comunes se puede citar:

- Al crearse fisuras en los taludes o en la capa de recubrimiento, los gases se escapan por las fisuras sin pasar por el filtrado de la capa de recubrimiento que actúa como filtro biológico.
- Si se incrementa la humedad del relleno se puede perder el impacto de filtro biológico.
- Al aumentar la carga de filtro biológico por la producción excesiva de biogás, el filtro pierde su eficiencia.

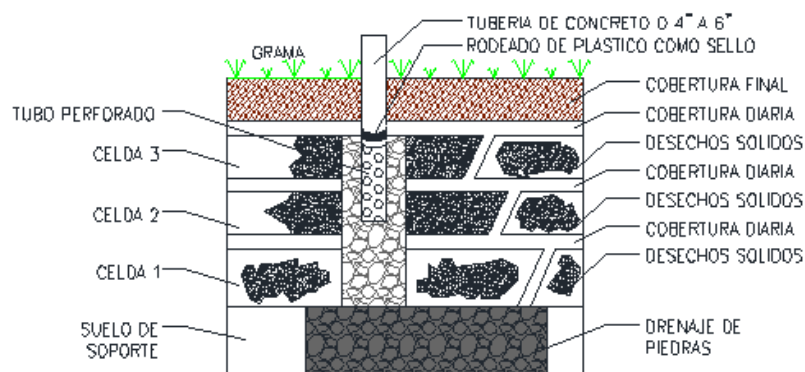
Por lo general, el drenaje pasivo sin pozos de recolección no es recomendado y se debe usar solo en los siguientes casos; si el municipio donde se instala el relleno sanitario no tiene recursos para construir chimeneas, para evacuar gases de un relleno que no tiene ningún sistema de drenaje o si se tiene un relleno manual con mala compactación.

[4]

## Drenaje pasivo con pozos de recolección

Este método aprovecha la difusión horizontal de los gases dentro del relleno sanitario, construyendo y colocando pozos de forma vertical a lo largo del relleno. Los gases se difunden hacia los pozos de recolección y salen a través de ellos de forma controlada al exterior del relleno. Los pozos de recolección tienen una alta permeabilidad de gases por lo que se desaloja una gran cantidad de éstos. [15] Existen dos formas para construir los pozos de recolección y son las siguientes:

- a) *Pozos con malla y puntales de madera*: se construye una jaula con malla de acero, con refuerzo de madera en sus cuatro esquinas verticales y, por último, se coloca en el interior de la jaula grava o piedra bola, como se muestra en la Figura 2.7. Es importante que la grava o piedra bola utilizada no contenga cal, porque se descompone fácilmente al interactuar con los gases del relleno sanitario. El diámetro recomendado de los pozos es de 0.5 m a 1 m, los puntales se fabrican preferentemente con maderas que se utilicen en la localidad o de árboles que se cultiven alrededor del relleno sanitario, la malla de acero debe contar con un diámetro de malla mayor a 2 cm. Para la colocación de los pozos en el relleno, las distancias que se recomiendan entre pozo y pozo son 25 m a 30 m, rellenos manuales que tienen celdas con una altura menor a 8 m, de 20 m a 25 m para rellenos compactados donde el cuerpo de la basura tiene una altura menor de 15 m y para rellenos compactados donde la basura tiene una altura mayor de 15 m la distancia recomendada es de 15 m a 20 m. [15]



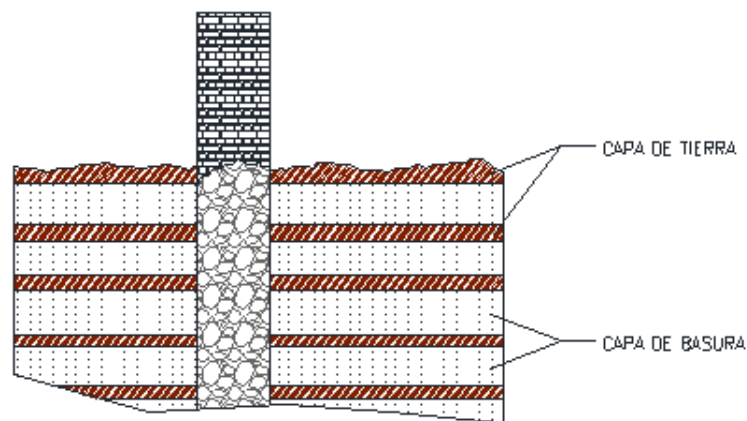
**Figura 2.7:** Pozos con malla y puntales de madera.

**Fuente:** José Arvizu, Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad, ITESM, 2003.

**Autor:** José Arvizu.



- b) *Pozos de tubo perforado*: se realizan perforaciones en las paredes del tubo, la superficie total de los orificios debe de ser un 10% de la superficie total del tubo, por último se coloca grava o piedra bola en el interior del tubo, tal como se muestra en la Figura 2.8. El diámetro recomendado de los pozos es de 0.6 m a 1.2 m. Se recomienda que los pozos se realicen de tubo de plástico (polipropileno) con un diámetro de orificios mayor a 2 cm. Se utiliza preferente grava con un diámetro menor de 16 cm, lo que facilita la permeabilidad de los gases y a su vez evita el ingreso de materia sólida al interior del pozo [4] [15]



**Figura 2.8:** Pozos de tubo perforado.

**Fuente:** José Arvizu, Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad, ITESM, 2003.

**Autor:** José Arvizu.

En el drenaje pasivo con pozos de recolección, se incinera el biogás que emana por el pozo, ya que la gran concentración de gas que se genera puede ser causante de incendios descontrolados y constituye un peligro para los operadores del relleno sanitario, dolor de cabeza, náuseas, y daños al sistema nervioso. [4] [15]

## 2.2 Tratamientos previos

Debido a su alto contenido de humedad y otros gases contaminantes, el biogás debe tratarse y acondicionarse previo a su aprovechamiento en las unidades de producción de energía eléctrica o calor, en:

- Reducción de CO<sub>2</sub>
- Reducción y/o eliminación del H<sub>2</sub>S y trazas de otros gases.

- Eliminación de condensados.
- Corrección, calibración y control de presión

Los fabricantes de motores, calderas y otros, tienen requerimientos mínimos para la calidad del biogás que se debe usar en sus unidades, tal como se muestra en la Tabla 2.1. La calidad debe mantenerse para garantizar los intervalos de mantenimiento y vida útil de los equipos.

REQUERIMIENTOS MÍNIMOS	ABREV.	VALOR
Capacidad calorífica	Hu	>4KWh/m <sup>3</sup>
Contenido de sulfuro de hidrógeno (total)	S	<2200 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Contenido de H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> S	<0,15 vol %
Contenido de cloruros (total)	Cl	<100 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Contenido de fluoruros (total)	F	<50 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Suma de cloruros y fluoruros	Cl+F	<100 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Partículas de polvo (3 hasta 10ppm)		10 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Humedad relativa	P	<90%
Presión de flujo en tramo de calibración	P <sub>gas</sub>	20 hasta 100 mbar
Variaciones en la presión		<±10% del requerido
Temperatura	T	10 hasta 50 °C
Carbono (>C <sub>5</sub> )		<0,4 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Silicios	Si	<10 mg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Número metano (biogás 135)	NM	>135

**Tabla 2.1:** requerimientos mínimos del biogás para su aprovechamiento.

**Fuente:** R. Eva, Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, 2002.

**Autor:** R. Eva

### 2.2.1 Purificación de biogás.

La purificación del biogás es de crucial importancia para garantizar los mejores rendimientos de los procesos de explotación de biogás y para reducir el impacto de emisiones gaseosas.

La mayoría de los generadores de energía eléctrica que utilizan biogás como combustible, requieren de un contenido máximo de H<sub>2</sub>S de 200 ppm - 500 ppm, pues durante el proceso de combustión, el H<sub>2</sub>S se transforma a ácido sulfhídrico que es altamente corrosible para los metales.

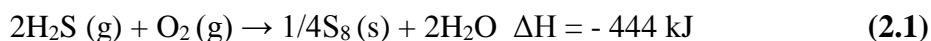
Los métodos de depuración del biogás pueden clasificarse según diversos criterios, en función de la tecnología utilizada o bien según el contaminante a eliminar.

### **Métodos de depuración del biogás según tecnologías.**

#### **A. Método de adsorción.**

También llamados de lecho seco, se llevan a cabo sobre un material sólido fijo, sobre el cual el H<sub>2</sub>S es adsorbido por adherencia. Por lo general, los materiales sólidos utilizados como adsorbentes son carbón activado, sílicagel<sup>13</sup> y tamices moleculares de zeolitas o de carbón. [16] Como el proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del adsorbente, donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles, la reacción puede verse afectada por la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas.

El proceso de adsorción que requiere menos energía es cuando se utiliza carbón activado, porque opera con temperatura y presión menor, donde la reacción se realiza en los poros y el H<sub>2</sub>S reacciona con el oxígeno produciendo azufre y agua, como se muestra en la ecuación 2.1. [16]



La adsorción empleando sílicagel como indicador, también ha permitido la eliminación de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>, [16]El cambio de coloración del compuesto indica la saturación del adsorbente que puede ser regenerado calentándolo a 117 °C.

En la actualidad, a nivel mundial la tecnología de purificación ampliamente usada se denomina PSA<sup>14</sup> y puede utilizar tanto carbono activado como zeolitas o ambos. En este proceso de PSA [17]A, el CO<sub>2</sub> se separa del biogás utilizando procesos de adsorción/desorción a diferentes presiones. El sistema consta de cuatro recipientes llenos de material adsorbente. Durante el proceso, cada recipiente sigue un ciclo de

---

<sup>13</sup> Sílicagel: El gel de sílice es una forma granular y porosa de dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico

<sup>14</sup> PSA por sus siglas en inglés: Pressure Swing Adsorption

presurización-adsorción-despresurización-desorción. Entonces el biogás entra por la parte inferior del recipiente y a medida que asciende, el material adsorbente capta tanto el CO<sub>2</sub> como el oxígeno y el nitrógeno, hasta obtenerse un gas con un 95 % de CH<sub>4</sub> y con una eficiencia de recuperación de CH<sub>4</sub> presente en el biogás entre un 85% a 90% dependiendo del soporte o material adsorbente en el PSA. [18]

Por otra parte, los sistemas de PSA dejan una pérdida gaseosa, llamada "gas de cola", que podría contener H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y gas CH<sub>4</sub>, que debiera ser quemada, utilizando parte del CH<sub>4</sub> que tiene el biogás. Esto representa un 12% del CH<sub>4</sub> proveniente del biogás (en función del porcentaje de nitrógeno presente en el biogás a purificar y el material adsorbente). Además, los sistemas de PSA no remueven completamente el oxígeno (si se utiliza como material adsorbente; carbón activado o zeolitas), el cual representa un riesgo explosivo en presencia de gas CH<sub>4</sub> y pérdidas en la recuperación del CH<sub>4</sub> por oxidación a CO<sub>2</sub>.

Los métodos de purificación por adsorción presentan la ventaja de ser muy efectivos en la reducción y remoción de contaminantes, sin embargo presentan costos de operación altos, debido al consumo eléctrico de los compresores que alcanza presiones de 100 psi por lo que su aplicación en países en vías de desarrollo se encuentra limitada. [19]

## **B. Métodos de absorción**

Se utilizan ampliamente, debido a la eficiencia y reactividad del sulfuro con la mayoría de los metales [20]. En otros casos, presentan costos relativamente bajos. Los sistemas más empleados son:

- ***Absorción con compuestos de hierro:*** se utilizan limallas de hierro colocadas en columnas de purificación que se encuentran humedecidas de forma discontinua con agua y rellenas con otro material por ejemplo, el aserrín; para ayudar a la hidrodinámica del sistema [21].El proceso opera a distintas presiones, logrando eliminar eficientemente el H<sub>2</sub>S a temperatura ambiente o superiores, con un contenido de humedad de las limallas entre 30 % y 60 %, debiendo realizarse la operación a pH entre 7,5 y 8,5. Es posible emplear óxido

de hierro (III) hidratado, cloruro de hierro (III), pellets<sup>15</sup> de hierro, residuos de la extracción de níquel, lavado con solución de hidróxido de sodio, sustratos "secos" tales como óxido de zinc, sólidos alcalinos, entre otros [21].

- **Absorción con compuestos orgánicos:** diferentes compuestos orgánicos han sido utilizados para la purificación del biogás. Las soluciones de aminas (mono, di, tri etanol aminas o glicol aminas) se combinan por el grupo amino ( $\text{NH}_2$ ) con  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  para dar hidrógeno carbonato de amonio  $[(\text{RNH}_3) \text{HCO}_3]$  o sulfuros de amonio  $[(\text{RNH}_3)_2\text{S}]$  Las aminas se operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química. Sin embargo, el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química. Por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta  $48^\circ\text{C}$  [19]. La hidroxi-amino etilester es aún menos corrosiva y no forma espuma, de ahí que se prefiera para la purificación de gases.
- **Absorción con agua:** se denomina también fregado o limpieza húmeda. El absorbente utilizado es el agua, el cual se pone en contacto con el biogás a purificar en torres o columnas (reellenas o no) donde se efectúa la transferencia de masa del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  al agua que fluye a contracorriente. Las temperaturas de operación suelen ser de  $5^\circ\text{C}$  a  $10^\circ\text{C}$ , aunque también se operan a temperatura ambiente, siendo las presiones de trabajo mayores de 1726 kPa. En este sistema se necesita regenerar el agua cargada de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , lo que se realiza utilizando una torre donde, de forma instantánea, el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  pasan al aire circundante, reincorporando el agua al proceso de absorción; siendo necesario reponer entre 10 % y 20 % de ésta. Esta es una metodología poco eficiente por las temperaturas y altas presiones de trabajo, encareciendo los costos de operación.

---

<sup>15</sup> Pellet: es una denominación genérica, utilizada para referirse a pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido

### **C. Métodos de separación por membrana**

Este método tiene por objetivo "filtrar" el biogás. Así la corriente gaseosa a purificar se desplaza a través de una membrana selectiva, debido a la fuerza motriz generada por diferencias de presión. El factor determinante es la permeabilidad que poseen las moléculas que componen la corriente de gas a purificar. [19]

Los materiales de las membranas son formulados especialmente para separar selectivamente determinados gases, principalmente CO<sub>2</sub> del CH<sub>4</sub> presente en el biogás [16], siendo la permeabilidad de la membrana una función directa de la solubilidad química del gas específico en la membrana. Las membranas usadas hasta el presente son muy frágiles y tienen poros excesivamente pequeños, por lo que se requiere que el gas de entrada a las membranas esté limpio de material particulado. Estos sistemas son caros y generalmente se consideran no adecuados para aplicaciones a pequeña escala, aunque se han obtenido buenos resultados en estudios a nivel piloto.

### **D. Métodos biológicos.**

Se llevan a cabo mediante la acción de determinados microorganismos tales como bacterias sulfuroxidantes que llevan el sulfuro a azufre metálico. [19].

Se conocen muchos microorganismos que habitan en lugares húmedos y que son consumidores de H<sub>2</sub>S como fuente nutricional, cubriendo sus alrededores con azufre elemental. Estos tienen preferencia por las aguas residuales y nunca dejan de crecer y multiplicarse mientras las condiciones ambientales lo permitan, pueden vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno aunque hay ciertos factores que favorecen su crecimiento y desarrollo como son: humedad, presencia de oxígeno, existencia de H<sub>2</sub>S y líquido residual como vector (transportador de bacterias).

Todos los estudios demuestran que el efecto biocatalítico en cuestión se debe al consumo de H<sub>2</sub>S por parte de los microorganismos disminuyendo así su concentración en el biogás. Con el biofiltro percolador se alcanza un alto grado de pureza del biogás, niveles de ácido sulfhídrico hasta aprox. 50 ppm. El biofiltro permite al usuario mayor flexibilidad para su utilización en nuevas tecnologías de conversión energética, por

ejemplo: pilas de combustible, biocombustible para vehículos, inserción de biogás en la red de gas natural, además de las ya conocidas como motores de cogeneración.

Entre los productos que pueden emplearse como parte esencial del filtro biológico destaca la utilización de algas (micro o macro).

En la Tabla 2.2 y Tabla 2.3, se presenta un resumen de tecnologías para la purificación de biogás en vertederos.

TECNOLOGÍA		VENTAJAS	DESVENTAJAS
MÉTODO DE ADSORCIÓN	Carbón Activado	<p>Eliminación de siloxanos con eficiencias del 95%</p> <p>Eliminación de H<sub>2</sub>O</p> <p>Reducción del H<sub>2</sub>S a valores cercanos a 4ppm.</p> <p>Disminución del CO<sub>2</sub> a valores entre el 1 y el 3%</p> <p>Adecuado para el tratamiento de caudales pequeños</p> <p>Eliminación de los siloxanos hasta niveles de ppbv</p>	<p>Requiere la regeneración del carbón activado o bien su disposición final</p> <p>Crea una corriente de residuos a tratar</p> <p>Mejores resultados a altas presiones</p> <p>Preferiblemente la humedad relativa del biogás es menor al 50%</p> <p>Costo de operación elevado</p> <p>Eficiencia del sistema disminuye a medida que se produce la saturación del material</p>
	Sílica Gel	<p>Depuración de siloxanos.</p> <p>Eliminación de H<sub>2</sub>O</p> <p>Experiencias a nivel piloto muestran eficiencias de 98%</p>	<p>Aplicación experimental</p> <p>Costo de la sílica gel mayor a la del carbón activado</p> <p>Altos contenidos de humedad que disminuyen la vida útil de la sílica gel</p>
	Grafito (carbón)	<p>Elevada eficiencia en la depuración de determinados siloxanos</p> <p>Elimina además otros componentes del biogás</p>	<p>No tan bien conocido como el carbón activado</p> <p>Costo del grafito superior al de la sílica gel y al del carbón activo</p> <p>Altos contenidos de humedad que disminuyen la vida útil del grafito</p> <p>Para ser viable económicamente requeriría regeneración mediante PSA</p> <p>La eficiencia del sistema disminuye a medida que se produce la saturación del material</p>

**Tabla 2.2:** Resumen de tecnologías para la purificación de biogás en vertederos.

**Fuente:** Moncayo, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás, 2008

**Autor:** Moncayo

TECNOLOGÍA		VENTAJAS	DESVENTAJAS
MÉTODOS DE ABSORCIÓN	Scrubber (lavado) con soluciones aminas	Absorbe el H <sub>2</sub> S y el CO <sub>2</sub> La más común, Monoetanolamina, permite eficiencias de eliminación de CO <sub>2</sub> hasta 98%	Elevados costos de operación Requiere de una cantidad de energía en la fase de recuperación del CO <sub>2</sub>
	Scrubber (lavado) con soluciones alcalinas	Absorbe el H <sub>2</sub> S y el CO <sub>2</sub> Elimina los problemas de formación de espumas y corrosión	El agente antiespumante hace que el equipamiento y la operación sean más complicados Consume mucha energía para el bombeo de la solución y de los gases
	Scrubber (lavado) con disolventes orgánicos	Reducciones hasta niveles de 0,5 a 1%	Costos de operación elevados Vaciado periódico parcial
MÉTODOS DE SEPARACIÓN	Separación por membrana	Separación del H <sub>2</sub> S y CO <sub>2</sub> del gas  Los equipos y la operación son simples	Eficiencia de separación baja Costos de operación elevados  Aplicación de presiones elevadas
MÉTODOS BIOLÓGICOS	Métodos biológicos	Eliminación del H <sub>2</sub> S Los microorganismos pueden vivir tanto en presencia como ausencia de O <sub>2</sub> La mayor parte de microorganismos son autotróficos, es decir, que pueden usar el CO <sub>2</sub> del biogás como fuente de carbono. Los contenidos en H <sub>2</sub> S pueden reducirse de 3000-5000 ppm a 50-100 ppm	Debe agregar O <sub>2</sub> al biogás para la desulfurización biológica, cuyo nivel depende de la concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , que normalmente está entre 2% a 6% volumen de aire en biogás.

**Tabla 2.3:** Resumen de tecnologías para la purificación de biogás en vertederos.

**Fuente:** Moncayo, Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás, 2008

**Autor:** Moncayo

### 2.3 Tipos de generadores

El biogás generado puede ser utilizado como combustible, según el porcentaje de contenido de metano que posea. Según el Ingeniero Luciano Taco, Gerente General de la empresa Gasgreen S.A, manifiesta que de acuerdo a su experiencia, cuando el biogás posee un contenido menor al 25% de CH<sub>4</sub>, se debe extraerlo del relleno únicamente para ventearlo y diluirlo en la atmosfera, pues su poder calórico no hace rentable su uso como combustible. Si el contenido de CH<sub>4</sub> del biogás está entre aproximadamente 25 % a 40% se lo podría extraer del relleno para ser quemado en una antorcha, y si el



contenido de CH<sub>4</sub> es mayor al 40% se lo puede utilizar como combustible, y en el caso de estudio del presente trabajo, como combustible para generar energía eléctrica.

La razón de extraer el biogás de un relleno es principalmente por seguridad por ello se lo tiene que desgasificar y así evitar explosiones. Actualmente se ha encontrado un uso provechoso del gas generado en los rellenos, como es la generación de energía, evaporación de lixiviados.

El uso de generadores con biogás se complica dependiendo de la calidad de este como combustible, por lo que se hace necesario al menos realizar un pre tratamiento de limpieza y secado para el biogás, una selección muy cuidadosa del motor a elegir.

Entre estos aparecen como mejores opciones los motores de combustión interna de mezcla pobre (lean-burn) de ciclo Otto y las microturbinas. [22]

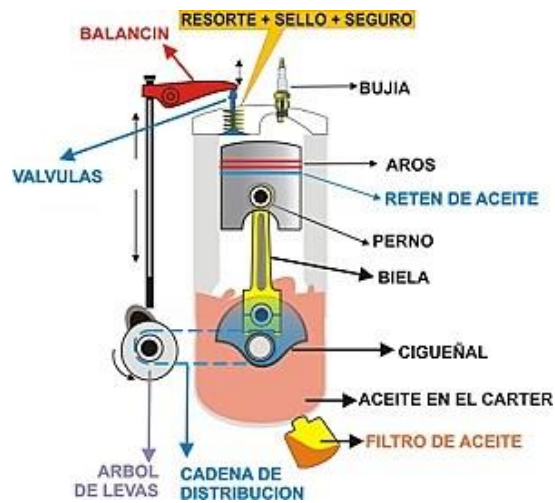
### **2.3.1 Motores de combustión interna (lean-burn)**

Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que en nuestro caso particular es el biogás generado en un relleno sanitario que arde dentro de una cámara de combustión, la parte principal de un motor. Los principales motores son:

- **Motor ciclo Otto:** cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina que se emplea en automoción y aeronáutico [23]. Un esquema de este motor se muestra en la Figura 2.7.

El biogás con un grado medio de pureza, se puede utilizar en motores de combustión interna (motores de ciclo Otto -gasolina- y motores diésel). Los motores de ciclo Otto pueden funcionar solamente con biogás, aunque necesitan de otros combustibles en el momento del arrancado. Los motores de ciclo diésel constan de un sistema mixto de biogás y diésel que permite utilizar distintas proporciones de ambos combustibles. Sin embargo, los motores de combustión

interna tienen como desventaja principal las elevadas concentraciones de NOx<sup>16</sup> y CO<sub>2</sub> que emiten a la atmósfera [24].

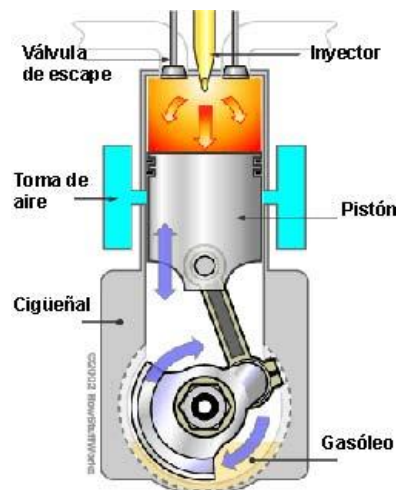


**Figura 2.7:** Esquema del motor ciclo Otto.

**Fuente:** J. Víquez, Remoción del sulfuro de hidrogeno, 2010

**Autor:** J. Víquez.

- **Motor Diésel:** llamado así en honor del ingeniero alemán nacido en Francia Rudolf Diésel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo. Se emplea en instalaciones generadoras de energía eléctrica, en sistemas de propulsión naval, en camiones, autobuses y automóviles. [23] Un esquema de este motor se muestra en la Figura 2.8



**Figura 2.8:** esquema del motor Diésel.

**Fuente:** J.R Marchant, Biotamb s.a., 2009

**Autor:** J.R Marchant.

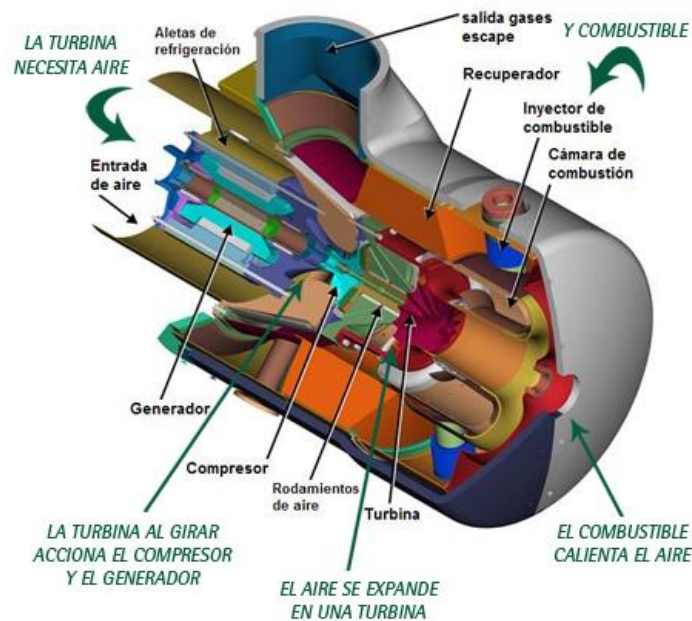
<sup>16</sup> NOx: El término óxidos de nitrógeno se aplica a varios compuestos químicos binarios gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno

Tanto los motores Otto como los diésel se fabrican en modelos de dos y cuatro tiempos.

### 2.3.2 Micro turbinas

Las micro turbinas son pequeñas turbinas a gas que queman  $\text{CH}_4$  mezclado con aire a presión. Los gases calientes presurizados resultantes de la combustión son forzados hacia afuera de la cámara a través de una turbina haciéndola girar y movilizándolo el generador. La mayoría incluye un compresor, un recuperador de calor y varios elementos para el control de la combustión y de la conversión a energía eléctrica.

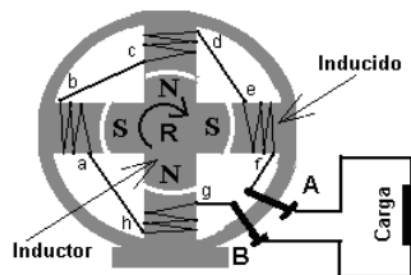
Presentan una serie de propiedades que las vuelven muy interesantes en el uso como electro generadores, entre las que destacan el ser capaces de manejar combustibles relativamente pobres, presentar bajos requerimientos de mantenimiento y tiempos de paro de máquina relacionados, no requieren de aceites lubricantes ni de enfriamiento, ocupan poco espacio, son modulares y fáciles de trasladar, no presentan mayores problemas de ruido y/o vibración y generan bajas emisiones con muy poco  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . En la Figura 2.9, se muestra un esquema de una microturbina.



**Figura 2.9:** Esquema de micro turbina.  
**Fuente:** J.R Marchant, Biotamb s.a., 2009  
**Autor:** J.R Marchant.

### 2.3.3 Generador eléctrico.

El uso de un generador eléctrico acoplado a uno de los motores previamente descritos y explicados tiene relación a la potencia, confiabilidad y factores que intervienen directamente con respecto al motor ya que este es el punto crítico al ser el elemento el cual generará la fuerza mecánica la cual dará el movimiento al generador eléctrico el cual su parte constructiva se describe en la Figura 2.10



**Figura 2.10:** Esquema generador c.a.

**Fuente:** S. Pabón, overblog, 2010

**Autor:** S. Pabón

Para el caso particular de los generadores que utilizan el biogás como combustible estos utilizan como referencia la marca de generadores Stamford los cuales están catalogados por muchos de los proveedores de grupo electrógenos como elementos de alta eficiencia y confiabilidad, en la Figura 2.11 podemos visualizar un generador tipo de esta marca.



**Figura 2.11:** Generador tipo, marca Stamford.

**Fuente:** Hernán G., Producción de energía a partir de biogás obtenido de residuos sólidos, 2012.

**Autor:** Hernán G.

## 2.4 Cantidad generada de biogás

Hasta aquí, se han revisado los tipos de relleno sanitario que existen para el depósito de los RSU, como extraer el biogás generado y algunos de los tratamientos previos que se debe realizar en el biogás para usarlo como combustible. Ahora bien, es necesario saber (con la mayor aproximación posible), que cantidad de gas se genera en un relleno sanitario y a la vez poder aplicar en el relleno sanitario del Inga, foco del estudio de la presente tesis.

De acuerdo al PDD<sup>17</sup> versión 01 página 11, presentado y aprobado por el directorio de la UNFCCC<sup>18</sup> se considera lo siguiente: “Al comienzo de las actividades del proyecto no se generará electricidad. Sólo después de varios meses de actividad del proyecto, después de realizar análisis precisos sobre el biogás y características de producción y de las evaluaciones económicas, se colocarán uno o varios generadores. Los generadores eléctricos producirán electricidad a partir del biogás que proceda de la unidad de deshumidificación. La electricidad producida alimentará la red eléctrica nacional. El número de generadores serán considerados tomando en cuenta el caudal de biogás extraído.”

El LMOP<sup>19</sup> de la USEPA<sup>20</sup>, recomienda varios métodos para estimar con mayor o menor precisión la generación de biogás en un relleno sanitario. Estos métodos de cálculos son:

### 2.4.1 Método A: Aproximación simple

Como su nombre lo indica, es una aproximación gruesa fundamentada en la cantidad de residuos depositada en un relleno. Se basa en una razón empírica entre cantidad de residuos y flujo de biogás observada en los muchos y variados proyectos de

---

<sup>17</sup> PDD por sus siglas en inglés: Project Design Document Form

<sup>18</sup> UNFCCC por sus siglas: Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático

<sup>19</sup> LMOP por sus siglas en inglés: Landfill Methane Outreach Program

<sup>20</sup> USEPA por sus siglas en inglés: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

recuperación de biogás de rellenos sanitarios estudiados por el programa LMOP. Es un reflejo de las características del relleno promedio y puede no representar con precisión las distintas características de los residuos así como el clima y otras variables que pueden estar presentes en un relleno específico.

En general, la EPA recomienda utilizar esta regla sólo como un proceso preliminar para determinar si es necesario utilizar métodos más complejos. Esta regla simple de aproximación sólo requiere conocimientos acerca de la cantidad de residuos depositada en el relleno de interés y se nutre del juicio y experiencia de expertos de la industria.

Se ha establecido que la generación de biogás puede variar entre 0,00312 m<sup>3</sup>/Kg y 0,0125 m<sup>3</sup>/Kg de basura depositado al año. Debido a que este método no considera el paso del tiempo que los residuos llevan depositados, la EPA recomienda comenzar a aplicarle un factor de disminución anual de entre 2% y 3% a la generación de biogás.

#### **2.4.2 Método B: Modelo de degradación de primer orden**

El segundo método simple que plantea la EPA el cual sí puede ser usado para contabilizar el cambio en la tasa de generación de biogás de acuerdo a la vida útil del proyecto de relleno, pero requiere de mayor conocimiento de las características del relleno, al menos en lo que se refiere a las siguientes cinco variables:

- Promedio anual de recepción de residuos
- Número de años que el relleno lleva abierto
- Número de años que el relleno lleva cerrado, sin recibir residuos, si corresponde
- Potencial de generación de CH<sub>4</sub> de los residuos
- Tasa de generación anual de CH<sub>4</sub> de los residuos.

El modelo de degradación de primer orden es:

$$\text{Biogás} = 2 * L_o * R * (e^{-k_c} - e^{-k_t}) \quad (2.2)$$

Donde:

Biogás = Total de biogás generado en el año corriente ( $m^3$ ).

Lo = Potencial total de generación de  $CH_4$  de residuos ( $m^3/Kg$ ).

k = Tasa anual de generación de  $CH_4$ .

R = Tasa promedio de recepción de residuos anual durante la vida activa (Kg).

t = Años desde que se abrió el relleno (años).

c = Años desde que se cerró el relleno (años).

Lo, el potencial total de generación de  $CH_4$ , representa la cantidad total de  $CH_4$  por peso que los residuos generarían durante su proceso de descomposición en un relleno sanitario.

K, la constante de degradación, representa la tasa a la cual el  $CH_4$  es liberado.

El total de biogás que se genera en el relleno es simplemente la multiplicación por dos de la generación de  $CH_4$  calculada por el modelo, es decir, que se parte de que el biogás tiene una composición del 50% de  $CH_4$ .

Tanto Lo como k varían mucho de acuerdo a las características de cada relleno, los residuos recibidos y el clima afecta especialmente al factor k. Según el Landfill Gas for Energy Program de la EPA, recomienda utilizar para los factores k y Lo, los rangos de valores mostrados en la Tabla 2.4

Precipitación (mm/año)	k (1/año)		Lo ( $m^3/ton$ )	
	contenido medio de alimentos < o = 50%	contenido alto de alimentos > o = 50%	contenido medio de alimentos < o = 50%	contenido alto de alimentos > o = 50%
0 - 249	0,04	0,043	60	62
250 - 499	0,05	0,053	80	83
500 - 999	0,065	0,69	84	87
1000 - 1999 o Saturado	0,08	0,085	84	87
2000 + o saturado	0,08	0,085	84	87

**Tabla 2.4:** Valores sugeridos para k y Lo por la EPA

**Fuente:** B. Satian, Fundamentos de los motores policilíndricos, 2012

**Autor:** B. Satian.

La EPA, provee de una hoja de cálculo para la generación de biogás que facilita la estimación de la generación, misma que será explicada y utilizada en detalle en el Tabla 3.4 de la presente tesis.

En general es difícil hacer predicciones precisas sobre el potencial de generación de biogás de un relleno sanitario debido a la variedad de desechos que recibe y a su diferencia de tiempo de descomposición, de allí que se puede anotar que:

- Existe una gran incertidumbre asociada a la estimación de las emisiones de  $\text{CH}_4$ , debido a las características específicas del relleno que se esté estudiando.
- La ingeniería y gestión de un relleno influenciará fuertemente la cantidad de  $\text{CH}_4$  que puede ser generado y capturado. Los estándares en cuanto a las características constructivas y operacionales de los rellenos son muy variables entre regiones, los sitios pueden ir desde tiraderos a cielo abierto abandonados sin ningún tipo de sistema de control de biogás o gestión, hasta rellenos de altos estándares de ingeniería con sistemas de recolección y tratamiento de gases y líquidos percolados que operan como complejos reactores anaeróbicos industriales.
- Los sistemas de recolección de gases no son 100% eficientes y típicamente su eficiencia máxima se encuentra entre un 70 % a 75%.
- Los mayores niveles de recolección generalmente no se mantienen uniformes durante la vida útil de un relleno sanitario.
- En la medida que el sitio envejece, la concentración de  $\text{CH}_4$  decaerá y el contenido energético del biogás será cada vez menor al igual que los eventuales peligros y daños que pueda generar.

Por lo mencionado anteriormente, cualquiera de los métodos teóricos para estimar el potencial de generación de biogás de un relleno sanitario tendrá altos grados de imprecisión.



El modelo de degradación de primer orden recomendado por la EPA proveerá de mejores estimaciones mientras mejor sea la información disponible para hacer los cálculos. Adicionalmente, este método es el único utilizable en un estudio general como el del presente trabajo de investigación, donde se determinará el potencial total de generación en un sistema de disposición final de residuos sólidos como el relleno sanitario del Inga en Quito.

## **CAPÍTULO III**

### **FACTIBILIDAD TÉCNICA.**

La factibilidad técnica del presente proyecto se basa en las características técnica de los equipos de generación ya que estos al ser de una tecnología que no es usada frecuentemente en el país esta tiene un mayor costo tanto en su instalación, puesta en marcha y funcionamiento normal, lo cual tiene relación con los elementos e insumos que estos necesitan para poder generar con normalidad.

Dentro de la selección técnica del equipo este deberá contar con un soporte técnico especializado a la mano o cercano, ya que estos necesitan mayor cuidado en cuanto al mantenimiento rutinario. Además de lo mencionado la factibilidad técnica tendrá estrecha relación con el tipo de generadores, su tecnología, costo y su beneficio tanto económico como ambiental ya que este último tiene gran incidencia en el proyecto presente por ser un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

#### **3.1 Cálculo de caudal de biogás generado y proyección**

El cálculo del caudal del biogás generado en el Relleno Sanitario de Quito se lo realizará siguiendo los métodos detallados en el Capítulo II, para ello se basará en los datos técnicos obtenidos del relleno sanitario como sus históricos y estudios realizados en el mismo.

El Relleno Sanitario del Inga, inició sus actividades en el año 2003. Posteriormente, Gasgreen s.a., empresa auspiciante de esta tesis de grado, entró como concesionaria para la extracción del biogás y del tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario.

El tiempo de vida útil del Inga, se estimó en 15 años, tiempo en el cual se proyectó la recepción de aproximadamente 9.398.000 toneladas de residuos, con un crecimiento anual de aproximadamente el 1%, distribuidos según se indica en la Tabla 3.1

Año	CANTIDAD DE RESIDUOS (ton)		
	Por celda		Totales
	I, II, III y IV	V, VI y VII	
2003	240000		240000
2004	480000		480000
2005	400000	100000	500000
2006		510000	510000
2007		515100	515100
2008		582400	582400
2009		600600	600600
2010		618800	618800
2011		624988	624988
2012		655200	655200
2013		661752	661752
2014		668369	668369
2015		675052	675052
2016		681802	681802
2017		688620	688620
2018		695506	695506
<b>Total</b>	<b>1120000</b>	<b>8278189</b>	<b>9398189</b>

**Tabla 3.1:** Cantidad total de residuos acopiados en el Relleno Sanitario del Inga.

**Fuente:** Biotecnogas, Memoria técnica planta de biogás, 2008

**Autor:** Biotecnogas.

Los residuos cuyo destino final es el Relleno del Inga, según un estudio realizado en el 2012, “CONSULTORÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DOMÉSTICOS Y ASIMILABLES A DOMÉSTICOS PARA EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO” por la consultora del Ing. Marcelo Carrillo, se clasifican como se indica en la Tabla 3.2, y como se puede observar, el mayor porcentaje corresponde a los orgánicos de cocina con el 54,59%, seguido de los rechazos con el 10,39%, con lo que se deduce que la producción de biogás está asegurada en cantidad, calidad y tiempo durante el contrato estipulado por el Título habilitante otorgado por CONELEC<sup>21</sup>.

Dicho contrato establece un tiempo de duración de 15 años a partir de la puesta en funcionamiento para lo cual se estima que el proyecto arrancará en el 2014 con la producción de energía eléctrica.

<sup>21</sup> CONELEC: por sus siglas, Consejo Nacional de Electrificación.

CANTON QUITO, URBANA Y RURAL												
AÑO. 2012						POBLACION: 2,344.231						
CANTIDADES POR TIPO DE GENERADOR												
Subproducto	% Prom.	DOMEST.	% Prom.	COM.	% Prom.	EDUCAT.	% Prom.	MERC.	% Prom.	OTROS	% Prom.	TOTAL
PPC (kg/dia/hab)		0,525		0,135		0,025						
TOTAL (Ton/dia)		1231,645		317,21		59,346						
PAPEL	5,29	65,125	7,65	24,275	14,42	8,558	1,96	5,365	7,73	8,624	5,62	<b>112,038</b>
CARTON	2,37	29,204	5,18	16,418	3,14	1,865	2,77	7,568	3,37	3,761	2,95	<b>58,817</b>
COMPUESTOS	0,4	4,924	0,23	0,731	11,14	6,609	0	0	2,98	3,329	0,78	<b>15,593</b>
PELIGROSOS (PILAS, BAT,...)	0,29	3,544	0,25	0,739	0,04	0,025	0	0	0,15	0,172	0,23	<b>4,529</b>
BOTELLAS PET	1,7	20,943	2,78	8,818	4,07	2,418	1,28	3,502	2,59	2,893	1,94	<b>38,572</b>
PLASTICOS ALTA DENSIDAD	2,13	26,187	2,06	6,549	4,21	2,499	0,97	2,654	2,4	2,674	2,04	<b>40,564</b>
FUNDAS PLASTICAS	5,53	68,151	9,67	30,667	5,23	3,102	3,88	10,618	6,11	6,823	5,99	<b>119,361</b>
POLIPROPILENO	1,54	18,916	2,55	8,08	5,45	3,237	0	0	2,46	2,75	1,65	<b>32,982</b>
POLIESTILENO	0,73	8,961	1,41	4,477	2,88	1,708	0	0	1,3	1,447	0,83	<b>16,593</b>
INERTES (LOSA, CERAMICA)	0,63	7,748	0,08	0,259	0,36	0,212	0	0	0,28	0,312	0,43	<b>8,531</b>
ORGANICOS DE JARDIN	2,58	31,749	1,06	3,369	0,24	0,212	0	0	1,04	1,162	1,83	<b>36,492</b>
ORGANICOS DE COCINA	51,36	632,604	49,07	155,643	24,47	14,521	83,62	228,623	50,79	56,668	54,59	<b>1088,059</b>
RECHAZOS (PAPEL HIGIENICO)	12,61	155,297	6,82	21,64	9,73	5,772	5,39	14,741	8,63	9,633	10,39	<b>207,083</b>
ELECTRONICOS	0,23	2,879	0,19	0,604	0,07	0,041	0	0	0,13	0,141	0,18	<b>3,664</b>
MADERA, TEXTILES, OTROS	2,83	34,816	2,73	8,654	4,89	2,902	0,12	0,328	2,76	3,079	2,5	<b>49,78</b>
METALICOS	1,05	12,873	0,79	2,493	1,41	0,835	0	0	0,86	0,958	0,86	<b>17,159</b>
VIDRIO	2,55	31,383	1,65	5,249	4,1	2,433	0	0	2,19	2,449	2,08	<b>41,514</b>
MENOR A 1CM	6,19	76,234	5,83	18,494	4,16	2,467	0	0	4,22	4,704	5,11	<b>101,899</b>

**Tabla 3.2:** Distribución de los residuos sólidos a nivel cantonal 2012.

**Fuente:** Marcelo Castillo, Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el distrito metropolitano de Quito, 2012

**Autor:** Modificado por Luis Crisanto, 2013.

### 3.1.1 Evaluación de la producción de biogás.

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, es necesario evaluar la cantidad de biogás producido por un relleno sanitario, siendo esto una tarea que eminentemente es guiada por la experiencia. Sin embargo la EPA sugiere dos metodologías de cálculo aproximado para conocer el volumen de gas generado: aproximación simple y modelo de degradación de primer orden.

#### A. Aproximación simple.

Se procede a calcular la generación de biogás para el Relleno Sanitario del Inga con el método de aproximación simple.

Según sugiere este método, el extremo inferior de cálculo es 0,00312 m<sup>3</sup>/Kg y el superior está en 0,0125 m<sup>3</sup>/Kg. Estos extremos consideran el criterio de peor escenario (PC) y mejor escenario (BC).

Con esto, la generación de biogás en el relleno del Inga, para el año 2012 es:

$$\text{Biogás generado} = \text{Factor s/escenario} \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} * \frac{\text{ton ing}}{\text{año}} * \frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}} * \frac{1 \text{ año}}{525600 \text{ min}} \quad (3.1)$$

$$\text{Biogas generado}_{PC} = 0,00312 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} * 5322098 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * \frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}} * \frac{1 \text{ año}}{525600 \text{ min}}$$

$$\text{Biogás generado PC} = 31,529 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$\text{Biogas generado}_{BC} = 0,0125 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} * 5322098 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * \frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}} * \frac{1 \text{ año}}{525600 \text{ min}}$$

$$\text{Biogás generado BC} = 126,572 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

El valor de 5.322.098 ton/año se lo obtiene de la sumatoria de residuos acumulados desde el año 2003 hasta el año 2012. Según lo calculado, la cantidad de biogás generado en el Relleno Sanitario del Inga para el año 2012 oscila entre 31,529 m<sup>3</sup>/min

y 126,572 m<sup>3</sup>/min. Tal como sugiere la EPA, este método no considera el paso del tiempo que los residuos llevan depositados, y por ello recomienda comenzar a aplicarle un factor de disminución anual de entre 2% y 3% a la generación de biogás.

Para la producción de biogás del Relleno Sanitario del Inga, se debe tomar en cuenta que el biogás se genera después de la colocación de los residuos en el sitio de disposición final, y en este particular caso la generación será hasta el año 2037, según el estudio presentado por la Empresa de Gestión de Residuos Sólidos del Distrito Metropolitano de Quito, que se consta en el Anexo 2.

En la Tabla 3.3, se tiene la estimación de la proyección de la generación de biogás hasta el año 2037, según el método de aproximación simple y considerando la disminución anual del 3%.

Año	Cantidad de residuos acumulados (ton/año)	Cantidad de biogás generado (m <sup>3</sup> /min)	
		Peor	Mejor
2012	5322098	30,645	122,775
2013	5983850	34,455	138,041
2014	6652219	38,303	153,459
2015	7327271	42,19	169,032
2016	8009073	46,116	184,76
2017	8697693	50,081	200,646
2018	9393199	54,086	216,691
2019	10137390	58,371	233,858
2020	10918791	62,87	251,884
2021	10918791	62,87	251,884
2022	10918791	62,87	251,884
2023	10918791	62,87	251,884
2024	10918791	62,87	251,884
2025	10918791	62,87	251,884
2026	10918791	62,87	251,884
2027	10918791	62,87	251,884
2028	10918791	62,87	251,884
2029	10918791	62,87	251,884
2030	10918791	62,87	251,884

**Tabla 3.3:** Proyección de la generación de biogás por aproximación simple.

**Fuente:** Biotecnogas, Memoria técnica planta de biogás, 2008

**Autor:** Biotecnogas.

## **B. Proyección de la generación del biogás por el modelo de degradación de primer orden.**

Al igual que el método de aproximación simple, el modelo de degradación de primer orden fue explicado en el Capítulo II de la presente tesis de grado.

Este modelo tiene mayor precisión que el de aproximación simple, y en el caso específico del Relleno del Inga, se toma en cuenta las siguientes variables: promedio anual de recepción de residuos, número de años que el relleno lleva abierto, potencial de generación de metano de los residuos y tasa de generación anual de metano de los residuos.

Según lo anotado en la ecuación 2.2, se tiene

$$\text{Cantidad de Biogás} = 2 * L_o * R * (e^{-k_c} - e^{-k t}) \quad (2.2)$$

Los valores de  $k$  y  $L_o$ , se los extraerá de la Tabla 2.4 los cuales depende del promedio de precipitación del sitio de disposición final típico del sector anualmente.

Para una zona como la del Relleno Sanitario del Inga, se tiene una precipitación promedio de 400 milímetros de agua por año, según consta en el Anexo 3, y alto contenido de residuos de comida, se determina que  $k$  y  $L_o$  tienen los siguientes valores:

$$k = 0.053 \text{ y } L_o = 83$$

Usando la ecuación 2.2 la cantidad de biogás quedaría:

$$\text{Cantidad de Biogás} = 2 * 83 * R * (e^{-0.053c} - e^{-0.053t})$$

Con estos valores se puede utilizar la hoja de cálculo que consta completa en el Anexo 4 [27]. Esta hoja de cálculo fue diseñada para Ecuador en base a datos de rellenos sanitarios similares a los de Quito.

Tomando en consideración el tipo de sistema de recolección del biogás existente hasta el año 2012, a los valores obtenidos de la ecuación 2.2, se le agrega un factor de eficiencia del 60% el cual depende de la captación que se realice del biogás. A partir del año 2013, se realizará la construcción de pozos verticales perforados, razón por la cual a partir de éste año el factor de eficiencia será considerado del 80% debido a que la captación de biogás se incrementa por la eficiencia en la extracción.

Mediante la utilización de la hoja electrónica modelada por la EPA y adaptada para el Ecuador denominada “Modelo de Biogás del Ecuador V1.1” en la cual se ingresan los datos del relleno sanitario a hacer modelado, para este caso tomamos los valores del Relleno Sanitario de Quito, como primer dato de ingreso se coloca el valor de las precipitaciones promedio anuales, valor tomado de los registros de la estación meteorológica del EMGIRS-EP, el porcentaje de concentración de metano se lo toma de la tabla 1.1 donde el valor oscila entre 40% y 60% por lo que colocaremos un 56% de CH<sub>4</sub> como valor típico del relleno y para efectos de cálculos dato tomado de la Tabla 3.5, datos de año de inicio de actividades del relleno y el año de final de operaciones, las constante Lo y k se los toma de la Tabla 2.4 y estas están en base al promedio de precipitaciones anuales como se puede observar en la Figura 3.1. los datos de ingreso y la hoja de cálculo se encuentran ampliadas en el Anexo 4.

Year	Metric Tonnes Disposed	Cumulative Metric Tonnes	Available Mass Tonnes	BioGas Collection System Efficiency	Actual Recovery (m <sup>3</sup> /hr)
2003	240.000	240000	100%	60%	
2004	480.000	720000	100%	60%	
2005	500.000	1220000	100%	60%	
2006	510.000	1730000	100%	60%	
2007	510.100	2240100	100%	60%	
2008	582.400	2822500	100%	60%	
2009	600.600	3423100	100%	60%	
2010	618.800	4041900	100%	60%	
2011	624.998	4666898	100%	60%	
2012	655.200	5322098	100%	60%	
2013	661.752	5983850	100%	80%	
2014	668.369	6652219	100%	80%	
2015	675.052	7327271	100%	80%	
2016	681.802	8009073	100%	80%	

Precipitation (mm/yr)	k Medium Food Waste <=50%	k High Food Waste >=60%	L <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /metric tonne) Medium Food Waste <=50%	L <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /metric tonne) High Food Waste >=60%
0-249	0.04	0.043	60	62
250-499	0.05	0.053	80	83
500-999	0.065	0.09	84	87
1000 - 1999 or Saturated	0.08	0.085	84	87
2000+ or Saturated	0.08	0.085	84	87

Precipitation (mm/yr)	Collection Efficiency
0-249	0.04
250-499	0.05
500-999	0.065
1000 - 1999 or Saturated	0.08
2000+ or Saturated	0.08

**Figura 3.1:** Ingreso de datos para cálculo de biogás generado.  
**Fuente:** EPA, Hoja electrónica para el cálculo de biogás generado, 2013  
**Autor:** Modificado por Luis Crisanto.



PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS									
RELLENO SANITARIO INGA, QUITO									
Año	Índice de Disposición (toneladas métricas/año)	Toneladas Acumuladas (toneladas métricas)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Recolección (%)	Recuperación de Biogás del Sistema Existente/Planeado		
			(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /hr)	(mmBTU/año)	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /hr)	(mmBTU/año)	
2003	240.000	240.000	0,0	0	0	60%	0,0	0	0
2004	480.000	720.000	4,0	241	37.744	60%	2,4	145	22.647
2005	500.000	1.220.000	11,8	711	111.285	60%	7,1	427	66.771
2006	510.000	1.730.000	19,6	1.177	184.175	60%	11,8	706	110.505
2007	510.100	2.240.100	27,1	1.628	254.875	60%	16,3	977	152.925
2008	582.400	2.822.500	34,3	2.057	321.941	60%	20,6	1.234	193.165
2009	600.600	3.423.100	42,3	2.536	396.916	60%	25,4	1.521	238.149
2010	618.800	4.041.900	50,1	3.008	470.882	60%	30,1	1.805	282.529
2011	624.998	4.666.898	57,9	3.475	543.893	60%	34,7	2.085	326.336
2012	655.200	5.322.098	65,4	3.923	614.110	60%	39,2	2.354	368.466
2013	661.752	5.983.850	73,0	4.379	685.452	80%	58,4	3.503	548.362
2014	668.369	6.652.219	80,3	4.818	754.142	80%	64,2	3.854	603.314
2015	675.052	7.327.271	87,3	5.241	820.327	80%	69,9	4.192	656.261
2016	681.802	8.009.073	94,1	5.648	884.146	80%	75,3	4.519	707.317
2017	688.620	8.697.693	100,7	6.042	945.733	80%	80,6	4.833	756.586
2018	695.506	9.393.199	107,0	6.422	1.005.212	80%	85,6	5.137	804.170
2019	744.191	10.137.390	113,1	6.789	1.062.705	80%	90,5	5.431	850.164
2020	781.401	10.918.791	119,8	7.186	1.124.886	80%	95,8	5.749	899.909
2021	0	10.918.791	126,7	7.600	1.189.709	80%	101,3	6.080	951.767
2022	0	10.918.791	120,1	7.208	1.128.296	80%	96,1	5.766	902.637
2023	0	10.918.791	113,9	6.836	1.070.054	80%	91,1	5.469	856.043
2024	0	10.918.791	108,1	6.483	1.014.818	80%	86,4	5.186	811.854
2025	0	10.918.791	102,5	6.148	962.433	80%	82,0	4.919	769.946
2026	0	10.918.791	97,2	5.831	912.752	80%	77,7	4.665	730.202
2027	0	10.918.791	92,2	5.530	865.636	80%	73,7	4.424	692.509
2028	0	10.918.791	87,4	5.245	820.952	80%	69,9	4.196	656.761
2029	0	10.918.791	82,9	4.974	778.574	80%	66,3	3.979	622.859
2030	0	10.918.791	78,6	4.717	738.384	80%	62,9	3.774	590.707
2031	0	10.918.791	74,6	4.474	700.269	80%	59,6	3.579	560.215
2032	0	10.918.791	70,7	4.243	664.121	80%	56,6	3.394	531.297
2033	0	10.918.791	67,1	4.024	629.839	80%	53,6	3.219	503.871
2034	0	10.918.791	63,6	3.816	597.327	80%	50,9	3.053	477.861
2035	0	10.918.791	60,3	3.619	566.493	80%	48,3	2.895	453.194
2036	0	10.918.791	57,2	3.432	537.250	80%	45,8	2.746	429.800
2037	0	10.918.791	54,2	3.255	509.517	80%	43,4	2.604	407.614
2038	0	10.918.791	51,4	3.087	483.216	0%	0,0	0	0
2039	0	10.918.791	48,8	2.928	458.273	0%	0,0	0	0
2040	0	10.918.791	46,3	2.776	434.617	0%	0,0	0	0
2041	0	10.918.791	43,9	2.633	412.182	0%	0,0	0	0
2042	0	10.918.791	41,6	2.497	390.905	0%	0,0	0	0
2043	0	10.918.791	39,5	2.368	370.726	0%	0,0	0	0
2044	0	10.918.791	37,4	2.246	351.589	0%	0,0	0	0
2045	0	10.918.791	35,5	2.130	333.440	0%	0,0	0	0
2046	0	10.918.791	33,7	2.020	316.228	0%	0,0	0	0
2047	0	10.918.791	31,9	1.916	299.905	0%	0,0	0	0
2048	0	10.918.791	30,3	1.817	284.423	0%	0,0	0	0
2049	0	10.918.791	28,7	1.723	269.742	0%	0,0	0	0
2050	0	10.918.791	27,2	1.634	255.817	0%	0,0	0	0
2051	0	10.918.791	25,8	1.550	242.612	0%	0,0	0	0
2052	0	10.918.791	24,5	1.470	230.089	0%	0,0	0	0
2053	0	10.918.791	23,2	1.394	218.211	0%	0,0	0	0
2054	0	10.918.791	22,0	1.322	206.947	0%	0,0	0	0
2055	0	10.918.791	20,9	1.254	196.265	0%	0,0	0	0
2056	0	10.918.791	19,8	1.189	186.133	0%	0,0	0	0
2057	0	10.918.791	18,8	1.128	176.525	0%	0,0	0	0
2058	0	10.918.791	17,8	1.069	167.413	0%	0,0	0	0
2059	0	10.918.791	16,9	1.014	158.771	0%	0,0	0	0
2060	0	10.918.791	16,0	962	150.575	0%	0,0	0	0
2061	0	10.918.791	15,2	912	142.803	0%	0,0	0	0
2062	0	10.918.791	14,4	865	135.431	0%	0,0	0	0

NOTES:

Contenido de Metano en el Biogás: 50%

Índice de Generación de Metano (k): 0,053 1/año

Generación Potencial de Metano (L<sub>0</sub>): 83 m<sup>3</sup>/tonelada métrica

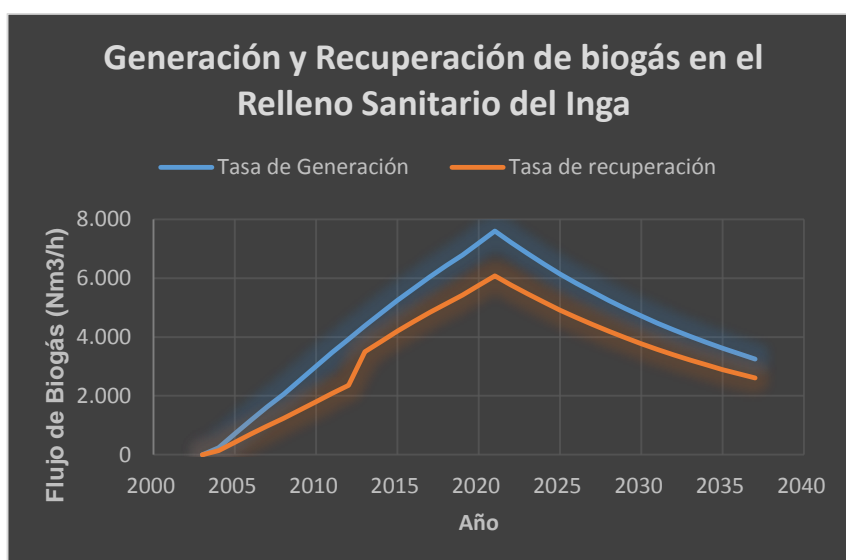
**Tabla 3.4:** Proyección de la generación y recuperación de biogás utilizando el modelo de degradación de primer orden (EPA).

**Fuente:** EPA, Hoja electrónica para el cálculo de biogás generado, 2013

**Autor:** Modificado por Luis Crisanto.

La Figura 3.1, permite una mejor comprensión y visualización de lo expuesto en la Tabla 3.4. Allí se muestra la cantidad de  $\text{m}^3/\text{h}$  de biogás generados en el Relleno del Inga desde el año 2003 hasta el año 2037, y los  $\text{m}^3/\text{h}$  de biogás recuperados.

Según este método se puede obtener biogás hasta el año 2037, con una generación mínima dada en ese mismo año, correspondiente a  $3255 \text{ m}^3/\text{h}$  aproximadamente y una recuperación mínima dada el año 2013 de más de  $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ .



**Figura 3.2:** Grafico de la proyección de generación y recuperación de biogás utilizando el modelo de degradación de primer orden (EPA).

**Fuente:** EPA, Hoja electrónica para el cálculo de biogás generado, 2013

**Autor:** Modificado por Luis Crisanto.

### 3.2 Cálculo de la energía eléctrica generada y proyección.

Basándose en el modelo de degradación de primer orden, la cantidad de diseño seleccionada, es la tasa de recuperación al año 2013 que corresponde a más de  $3500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , la cual servirá para realizar el diseño y selección de los equipos.

A la cantidad calculada de  $3500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , se debe considerar factores externos que afectan a este valor disponible, como la variación de temperaturas que hacen que el vapor de agua contenido en el biogás se condense, deslizamientos internos por efectos de la descomposición, ruptura de tuberías, y otros factores impredecibles que no permiten extraer en un 100% el biogás del relleno sanitario.

En base al criterio de la empresa Gasgreen S.A. auspiciante del presente trabajo de tesis, recomiendan considerar una pérdida de 10% al valor bruto de extracción, por lo que el valor será de 3152,7 m<sup>3</sup>/h y en base a su concentración presentada en la Tabla 3.5 en la cual se observa el valor promedio de los principales gases que componen el biogás del relleno sanitario.

CONCEPTO	VALOR PROMEDIO (%)	RANGO TIPICO (%)
Concentración de CH <sub>4</sub> (% v/v)	56	40 - 65
Concentración de CO <sub>2</sub> (% v/v)	40	35-50
Concentración de N <sub>2</sub> (% v/v)	4	0 - 5
Concentración de O <sub>2</sub> (% v/v)	1	0 - 2
Presencia de humedad	Gas saturado a T ambiente	
Trazas de otras sustancias (ppm)	-	100 - 500
Densidad (g/m <sup>3</sup> )	0,97	0,9 - 1.1
Poder calorífico (Kcal m <sup>3</sup> /)	4300	3500 - 5000
Temperatura (°C)	37	35 - 65

**Tabla 3.5:** Composición del biogás del Relleno Sanitario del Inga, 2012.

**Fuente:** Memoria técnica, Planta de biogás, Natura INC., 2008

**Autor:** Gasgreen s.a.

Para realizar el cálculo de la energía que se puede obtener del relleno sanitario de Quito se debe tener en cuenta algunos parámetros propios del sitio como son:

1. Concentración de metano en el relleno sanitario que según la Tabla 3.5 tenemos un valor de 56% de CH<sub>4</sub>
2. El valor calorífico del metano que es de 10 kWh/m<sup>3</sup>
3. La eficiencia promedio del motor de combustión interna que en este caso es de 38%

Con los datos descritos calculamos el potencial energético de 1 m<sup>3</sup> de biogás de relleno sanitario, aplicando la ecuación 3.2 tendremos:

$$Pot. \text{energetico de biogás} = \% CH^4 \times \text{valor calorifico} \quad (3.2)$$

$$Pot. \text{energetico de biogás} = 5,6kWh/m^3$$

Con el valor obtenido en la ecuación 3.2 calculamos la potencia eléctrica neta por año utilizando la Tabla 3.4 con lo que se obtiene un valor anual de energía utilizando la ecuación 3.3 se lo muestra en la Tabla 3.6.

$$P. elec. neta = Vol. biogás \times P. energético \times eficiencia gen. \quad (3.2)$$

Año	LFG Recovery from Existing and Planned System		Pot. energética	Pot. Elec. Neta
	(m3/min)	(m3/hr)		
2003	0	0,00	0	0
2004	2,411258555	144,68	810,18	307,87
2005	7,109306528	426,56	2388,73	907,72
2006	11,76577954	705,95	3953,30	1502,25
2007	16,28235457	976,94	5470,87	2078,93
2008	20,56678875	1234,01	6910,44	2625,97
2009	25,35645213	1521,39	8519,77	3237,51
2010	30,08172693	1804,90	10107,46	3840,83
2011	34,74593686	2084,76	11674,63	4436,36
2012	39,2316511	2353,90	13181,83	5009,10
2013	58,38566615	3503,14	19617,58	7454,68
2014	64,23654974	3854,19	21583,48	8201,72
2015	69,87405134	4192,44	23477,68	8921,52
2016	75,31006985	4518,60	25304,18	9615,59
2017	80,55590335	4833,35	27066,78	10285,38
2018	85,6222801	5137,34	28769,09	10932,25
2019	90,51937458	5431,16	30414,51	11557,51
2020	95,8158652	5748,95	32194,13	12233,77
2021	101,337406	6080,24	34049,37	12938,76
2022	96,10637038	5766,38	32291,74	12270,86
2023	91,14536074	5468,72	30624,84	11637,44
2024	86,44043836	5186,43	29043,99	11036,72
2025	81,97838401	4918,70	27544,74	10467,00
2026	77,74666085	4664,80	26122,88	9926,69
2027	73,73337918	4424,00	24774,42	9414,28
2028	69,92726307	4195,64	23495,56	8928,31
2029	66,31761862	3979,06	22282,72	8467,43
2030	62,89430398	3773,66	21132,49	8030,34
2031	59,64770079	3578,86	20041,63	7615,82
2032	56,56868722	3394,12	19007,08	7222,69
2033	53,64861229	3218,92	18025,93	6849,85
2034	50,8792716	3052,76	17095,44	6496,27
2035	48,25288423	2895,17	16212,97	6160,93
2036	45,76207095	2745,72	15376,06	5842,90
2037	43,39983342	2603,99	14582,34	5541,29

**Tabla 3.6:** Estimación de generación de energía eléctrica.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

### 3.3 Selección técnica del equipo

Para la selección técnica del equipo se realizará la selección mediante el uso de una matriz de decisión la cual ayudará a escoger la mejor maquinaria con las mejores prestaciones técnicas y que se adapte a las necesidades actuales y futuras del proyecto en cuestión.

#### 3.3.1 Parámetros para la selección del equipo.

Para cumplir con el objetivo principal mencionado en la denuncia de la presente tesis, en el cual se apunta a generar electricidad aprovechando el biogás que existe en el relleno. El Consejo Nacional de Electrificación CONELEC, en su REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11, la cual hace referencia a la energía producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales, y reconoce al biogás como una parte de éste, promueve la generación de electricidad mediante precios preferenciales de pago a las empresas que produzcan este bien, tal como se indica en la **Tabla 3.7**

CENTRALES	Territorio Continental	Territorio Insular de Galápagos
<i>EÓLICAS</i>	9.13	10.04
<i>FOTOVOLTAICAS</i>	40.03	44.03
<i>SOLAR TERMOELÉCTRICA</i>	31.02	34.12
<i>CORRIENTES MARINAS</i>	44.77	49.25
<i>BIOMASA Y BIOGÁS &lt; 5 MW</i>	11.05	12.16
<i>BIOMASA y BIOGÁS &gt; 5 MW</i>	9.60	10.56
<i>GEOTÉRMICAS</i>	13.21	14.53

**Tabla 3.7:** Precios preferenciales de pago para la generación de electricidad con Energía Renovables en (cUSD/kWh).

**Fuente:** Consejo Nacional de Electrificación, Regulación No. CONELEC-004/11, 2011

**Autor:** CONELEC

Los intereses de Gasgreen S.A. se enmarcan en la regulación del CONELEC en la categoría de biomas y biogás menores a 5MW, por lo que este será un parámetro a tomar en cuenta al momento de la selección de equipo.

Como se mencionó en el inciso 3.2, la cantidad de biogás que se extraerá del Relleno Sanitario del Inga será de 3503 Nm<sup>3</sup>/h para el año 2013, pero el diseño de la central se lo realizará para el año 2021 que es el de mayor producción de biogás, con un valor de 6080 Nm<sup>3</sup>/h. Se aplicará la reducción de 10% de este caudal, por variables

imponderables como temperatura, ruptura de tuberías y otros, que afectan a la recolección primaria del biogás, por lo que el valor real de recolección primaria es 5472 Nm<sup>3</sup>/h.

El biogás en su extracción primaria posee una pureza en CH<sub>4</sub>, que en el caso específico del Inga es del 56% y para que técnica sea viable se lo debe depurar con el fin de alcanzar una concentración en CH<sub>4</sub> de 90% a 96%. Es por ello que se debe colocar una unidad de purificación antes de que el CH<sub>4</sub> entre al motor de combustión interna y por ende al purificar el caudal de biogás este pierde volumen por lo que el volumen útil nos queda luego de aplicar la ecuación 3.3.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.3)$$

$$V_2 = 3405 \text{ Nm}^3$$

Para la resolución de la ecuación anterior, se tomó como base de cálculo 1 hora y un 90% de pureza del CH<sub>4</sub> como el peor de los escenarios con ello aseguramos una cantidad de biogás constante o superior.

### 3.3.2 Selección del equipo.

Una vez determinado el volumen de CH<sub>4</sub>, se procedió a solicitar a los fabricantes de generadores impulsados por biogás las características técnicas de las unidades generadoras de electricidad. Para realizar la selección del equipo se realiza una matriz de decisión en la cual se tomara en cuenta factores de mayor interés y en base a la experiencia de la empresa Gasgreen S.A. la cual ha recomendado lo siguientes puntos a analizar en la Tabla 3.8.

Marca	Modelo	Tipo de gas	Vel. (rpm)	Frec. (Hz)	% de CH <sub>4</sub>	Emisión Nox	Potencia generada (KW/h)	Efi. total	CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Asis. técnica
<b>Guascor Power</b>	SFGLD 480	Biogás	1800	60	62,5	<2	906	91,5	615	España
<b>AB Energy</b>	ECOMAX 10	Biogás	1800	60	>50	<2	918	96.7	603	Brasil
<b>Caterpillar</b>	G3516A	Biogás	1200	60	>60	5	824	78,6	675	U.S.A

**Tabla 3.8:** Parámetros hacer tomados en cuenta en la matriz de decisión.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

Para poder seleccionar el mejor tipo de generador técnicamente hablando se realiza una ponderación de acuerdo a los requerimientos mínimos necesarios por la empresa.

En la cual a cada ítem se lo valora en una escala del 1 al 5 siendo 1 la menor valoración que este pueda obtener o que este no cumpla y 5 la máxima valoración o cumple a cabalidad con lo requerido, como se muestra en la Tabla 3.9

<b>FABRICANTE</b>	<b>Emisión Nox</b>	<b>Asistencia técnica</b>	<b>Consumo</b>	<b>Potencia Generada</b>	<b>Eficiencia</b>
<b>Guascor Power</b>	5	2	3	2	3
<b>AB Energy</b>	5	4	4	5	5
<b>Caterpillar</b>	1	3	2	1	1
<b>Peso %</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>20%</b>	<b>20%</b>	<b>25%</b>

**Tabla 3.9:** Matriz de decisión para la selección de Generador eléctrico mediante biogás.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

Luego para poder comprender la matriz de decisión se realiza la sumatoria de los puntajes en base a cada uno de los porcentajes asignados para cada una de las características técnicas necesarias, así se obtiene la mejor puntuación la cual da como resultado la mejor opción que se pueda seleccionar vista desde su parte técnica. Esto se lo puede resumir en la Tabla 3.10

<b>FABRICANTE</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Guascor Power</b>	5,15	51,50%
<b>AB Energy</b>	8,35	83,50%
<b>Caterpillar</b>	2,35	23,50%

**Tabla 3.10:** Matriz de decisión para la selección de Generador eléctrico mediante biogás.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

En el análisis de la selección del tipo de generador que más se ajusta técnicamente a los requerimientos del Relleno Sanitario de Quito es el ofertado por la empresa AB Energy ya que con este generador se aprovecharía de mejor manera el recurso de biogás generado en el relleno como se lo muestra en la ficha técnica de la planta de

cogeneración de la oferta técnico-económico proporcionada por la empresa y que se la puede revisar en el Anexo 5.

### **3.4 SUSTENTABILIDAD TÉCNICA**

La sustentabilidad técnica del proyecto se basa en la cantidad y calidad del combustible que en este caso es el biogás generado en el Relleno Sanitario de Quito, el cual se extrae mediante un sistema activo de aspiradores los cuales son controlados desde la propia planta mediante un software, el cual está monitoreando constantemente el caudal y calidad del mismo para poder obtener la mejor combinación, ya que el biogás es una mezcla de gases pero que para nuestro caso el CH<sub>4</sub> es el principal por sus propiedades como combustible sin olvidar o dejar de lado el resto de su composición, ya que varios de sus elementos constitutivos pueden causar graves daños al grupo generador debido a la formación de óxidos y ácidos corrosivos para el motor de combustión es por ello que existen varias formas de “limpiar” este gas dejándolo más concentrado, por ende con un mayor porcentaje de CH<sub>4</sub> lo cual beneficia en el proceso de generación eléctrica, esta limpieza del CH<sub>4</sub> que se realiza ayuda a obtener un porcentaje de Metano puro que oscila entre el 94% al 97% de metano lo que puede ocasionar que el caudal disminuya por lo que se ha tomado en cuenta una reducción del caudal del 20%, porcentaje que no afecta en el consumo del combustible de cada generador.

Otro punto importante en la factibilidad técnica es el mantenimiento que se lo tiene que realizar ya que este tipo de motores necesita un mayor cuidado en su funcionamiento normal, todos los elementos necesarios para dicho mantenimiento deben tener un proveedor local ya que existen lubricantes exclusivos para este tipo de motores entre otros.



## **CAPÍTULO IV**

### **FACTIBILIDAD ECONÓMICA**

Para el análisis de factibilidad económica del proyecto se toma en cuenta los distintos valores que en este intervienen tanto como los egresos (inversiones, gastos, etc.) como los ingresos que este pueda generar por la implementación del proyecto (venta de energía y certificados de carbono).

Es necesario establecer los valores de ingresos y egresos que se podría obtener si el proyecto funcionase, para lo cual se utilizará métodos económicos que analizan el valor del dinero a través del tiempo y son: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y Periodo de Pago (Pay Back) para con ello determinar si el proyecto es factible tanto técnica como económicamente rentable.

#### **4.1 Potencia generada**

El cálculo de la potencia generada, que técnicamente se podría obtener se lo realizó en la Tabla 3.6, con este dato teórico de potencia generada se demostrará que el proyecto es técnicamente factible y económicamente viable.

##### **4.1.1 Planteamiento económico**

El proyecto de construcción de una central de generación eléctrica mediante el uso de biogás que se genera de la descomposición de la basura se concibe después de la caída del valor de los certificados de carbono (CER's)<sup>22</sup>, y de realizar un análisis económico de la presente actividad de la empresa que hasta inicio del 2012 todo el gas que se extraía del relleno sanitario se lo utilizaba para generar CER's los cuales han ido decayendo debido a la recesión que sufre Europa y que a su vez era el principal mercado de los certificados, la caída del valor económico de cada CER's que al momento de la creación de la primera fase del proyecto el cual era el primordial ingreso que se tenía para el financiamiento del proyecto global MDL, del cual en su segunda

---

<sup>22</sup> CER's; son un tipo de unidad de emisión (o créditos de carbono ) emitido por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), la Junta Ejecutiva de las reducciones de emisiones logradas por los proyectos MDL y verificado por una EOD bajo las reglas del Protocolo de Kyoto .

fase tenía la construcción de una planta de generación eléctrica, estos ingresos al momento de realizar la segunda fase oscilaban entre 12¢ y 17¢ de euro según los datos obtenidos en la página electrónica de la bolsa de SENDECO<sup>23</sup>, según la misma fuente en el mes de Agosto del 2013 el valor promedio de un CER´s está oscilando alrededor de los 61 centavos de euro, esto obliga a buscar nuevas formas de financiamiento para poder empezar con la fase de generación eléctrica.

#### 4.1.2 Bases económicas

La principal base económica para el proyecto de generación eléctrica es mejorar el actual ingreso que se genera de la obtención de los CER´s obtenidos del Relleno Sanitario del Inga por lo que se ha tomado muy en cuenta la política del Gobierno Ecuatoriano respecto a la matriz energética del país para empezar a realizar una central de generación.

Un punto importante económicamente hablando son las condiciones preferentes que tienen este tipo de centrales de generación de energía renovable no convencional en cuanto a los precios preferenciales, vigencia de los precios y despacho preferencial como lo dice el Consejo Nacional de Electricidad en su REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11<sup>24</sup> de la que se destacan la Tabla No. 4.1 donde se encuentran los valores a ser pagados, la resolución completa se encuentra en el Anexo 6

<i>CENTRALES</i>	<i>Territorio Continental</i>	<i>Territorio Insular de Galápagos</i>
<i>EÓLICAS</i>	9.13	10.04
<i>FOTVOLTAICAS</i>	40.03	44.03
<i>SOLAR TERMOELÉCTRICA</i>	31.02	34.12
<i>CORRIENTES MARINAS</i>	44.77	49.25
<i>BIOMASA Y BIOGÁS &lt; 5 MW</i>	11.05	12.16
<i>BIOMASA y BIOGÁS &gt; 5 MW</i>	9.60	10.56
<i>GEOTÉRMICAS</i>	13.21	14.53

**Tabla 4.1:** Precios Preferentes Energía Renovables en (cUSD/kWh).

**Fuente:** Consejo Nacional de Electrificación, Regulación No. CONELEC-004/11, 2011

**Autor:** CONELEC

<sup>23</sup> <http://www.sendeco2.com/>: página web tomada como referencia para el valor de Certificados de carbono

<sup>24</sup> REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11. Regulación denominada “Tratamiento para la energía producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales”.

## **4.2 Costos de implementación.**

Los costos para la implementación del Proyecto de Generación Eléctrica mediante el uso de Biogás se lo ha separado en grupos, para una mejor comprensión de los recursos que cada uno de estos necesite.

### **4.2.1 Inversión fija**

Para la inversión fija se considera al costo que se genera por la implantación del proyecto, en este costo se incluye los rublos de: permisos, estudios, construcción, equipos, puesta en marcha e imprevistos.

#### **I. Obtención de permisos y concesiones**

Para el proyecto de generación eléctrica en el Relleno sanitario del Inga hay que tomar en cuenta varios permisos que este necesita entre los más importantes tenemos:

- a) Permiso de uso de tierra, la extracción y uso de biogás; el cual se lo obtiene del Ilustre Municipio de Quito a través de su empresa EMGIRS-EP<sup>25</sup> la cual ha otorgado una concesión de 15 años.
- b) Permiso y concesión para ser parte del MEM<sup>26</sup> como generador eléctrico que se lo obtiene del CONELEC.
- c) Estudio de impacto ambiental para aprobación de Título Habilitante.
- d) Permisos y acuerdos con la empresa comercializadora para el uso de sus instalaciones que para el caso es la Empresa Eléctrica Quito (E.E.Q).

---

<sup>25</sup> EMGIRS-EP. Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos, encargada del manejo integral de relleno Sanitario de Quito.

<sup>26</sup> MEM. Mercado Eléctrico de Mayorista

<b>Rubro</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
Permisos Municipio	\$ 480,00
Permisos CONELEC	\$ 1.000,00
Estudio de impacto ambiental	\$ 4.000,00
Permisos E.E.Q	\$ 650,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 6.130,00</b>

**Tabla 4.2:** Costos de permisos y concesiones.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

## II. Equipos

La compra de los equipos se la debe realizar en base a la factibilidad técnica, la cual se definió que los generadores de AB Energy son los que se ajustan a las necesidades requeridas

<b>Rubro</b>	<b>Costo en Euros</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
Generadores 5 unidades ECOMAX® 10 BIO	\$ 2.743.750,00	\$ 3.649.187,50
sistemas de tratamiento de biogás,	\$ 281.250,00	\$ 374.062,50
Conexiones eléctricas (solo suministros de cables)	\$ 53.750,00	\$ 71.487,50
Celda de media tensión	\$ 231.500,00	\$ 307.895,00
transformadores elevadores 4 unidades	\$ 123.880,00	\$ 164.760,40
<b>TOTAL + i.s.c.<sup>27</sup></b>	<b>\$ 4.397.410,92</b>	

**Tabla 4.3:** Costos de equipos y auxiliares mayores.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

## III. Construcción civil

La obra civil que se tiene que realizar en el proyecto de generación tiene que ver con respecto a las obras de suelo donde van a estar situados los equipos de generación y sus transformadores, extracción de biogás y sus auxiliares, para lo cual se analizarán las propuestas presentadas a la fecha del análisis.

Se tiene un rublo de obras civiles complementarias el cual toma en cuenta la construcción de una bodega, servicios higiénicos, y pequeñas adecuaciones que se requiera.

<sup>27</sup> i.s.c. por sus siglas, impuesto de salida de capital

<b>Rubro</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
Obras complementarias	\$ 10.000,00
Estudios	\$ 4.520,00
Obras en plataformas	\$ 76.720,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 91.240,00</b>

**Tabla 4.4:** Costo de construcción de obra civil.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

#### **IV. Construcción eléctrica**

Para la construcción de la obra eléctrica esta se lo ha dividido en dos partes, la primera que tiene que ver con los requerimientos que necesitan los equipos auxiliares de extracción de biogás, esto incluye la obra eléctrica y la obra que requiera en la parte civil como la construcción de la cámara de transformación hasta la puesta en funcionamiento, la segunda parte tiene relación con las obras necesarias para transportar la energía generada hasta el punto de entrega con la empresa comercializadora la E.E.Q.<sup>28</sup>, lo que incluye los estudios, aprobación, construcción y puesta en funcionamiento del proyecto.

Dentro de la primera fase se tendrá que realizar un estudio previo el cual tendrá que arrojar la factibilidad técnica para que estas dos partes puedan llevarse a cabo y el costo que esto representaría dentro de la inversión que tiene que ver con la obra.

Para esto se ha invitado a varias empresas para la construcción de esta parte del proyecto, por lo cual se analizaran las propuestas presentadas a la fecha del análisis.

<b>Rubro</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
Estudios cámara de transformación de Auxiliares	\$ 2.700,00
Estudios de derivación en media tensión	\$ 950,00
Estudios de malla de puesta a tierra	\$ 1.600,00
Estudios de línea de evacuación de 5MW	\$ 2.800,00
Valor designado para la construcción	\$ 163.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 171.050,00</b>

**Tabla 4.5:** Costo de construcción de obra eléctrica.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

<sup>28</sup> E.E.Q. por sus siglas, Empresa Eléctrica Quito

## V. Servicios e insumos

En este ítem se ha contemplado los servicios e insumos más costosos para el proyecto pero que tienen una influencia económica no ligada directamente a algún ítem anterior. Como es el caso del movimiento de los generadores desde el punto de origen (Italia) hasta el sitio de disposición final (Quito), así como su desaduanización y legalización en Ecuador el cual es un costo no ligado directamente al contrato de compra-venta con la empresa proveedora.

Otro gasto que no está ligado directamente a un proveedor es la necesidad del uso de una grúa de gran envergadura para el posicionamiento de los generadores y equipos auxiliares del proyecto. También son tomados en cuenta los servicios básicos para la construcción como el agua, luz y logística los cuales se utilizan a lo largo de la construcción.

Rubro	Costo en Euros	Costo en dólares \$
Gastos de Importación( Flete internacional )+i.s.c.	\$ 134.625,00	\$ 188.003,81
Gastos locales Ecuador (Manipulación y envío)		\$ 12.486,60
Alquiler de grúas(3 servicios)		\$ 5.500,00
Logística		\$ 4.500,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 210.490,41</b>	

**Tabla 4.6:** Costo de servicios e insumos estimados.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

## VI. Costos de puesta en marcha

Para el rubro de puesta en marcha este contempla valores como: lubricantes, refrigerantes y demás insumos que se puedan necesitar en las diferentes pruebas necesarias hasta poner a punto los equipos. También tiene que tomarse en cuenta el costo del personal técnico del fabricante el cual no está incluido en la propuesta económica de la adquisición de los generadores

Para este ítem la Empresa Gasgreen al tener experiencia en el manejo de este tipo de proyectos recomienda en base a su experiencia un valor del 2% del valor de la maquinaria y equipos para respaldo por cualquier eventualidad.

<b>Rubro</b>	<b>Costo en Euros</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
Puesta en marcha del 2%	\$ 87.948,22	\$ 116.971,13
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 116.971,13</b>	

**Tabla 4.7:** Costo de puesta en marcha del proyecto.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

## VII. Imprevistos

El rubro por concepto de riesgo o imprevistos, está dado por el factor del azar, o una serie de factores difíciles de prever, tales como condiciones climáticas (temperaturas extremas, lluvias intensas y prolongadas, crecientes o inundaciones), conflictos obreros, factores económico-políticos, posibles multas por incumplimiento del plazo. Por estas razones y en base a la experiencia que la empresa Gasgreen tiene en este tipo de proyectos a nivel internacional recomienda un 5% de la suma de los rubros anteriores.

<b>Rubro</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
Imprevistos 5%	\$ 249.664,62
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 249.664,62</b>

**Tabla 4.8:** Costo de imprevistos en el proyecto.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

Luego de tener los valores referenciales para la inversión de los equipos y para el análisis económico.

<b>Rubro</b>	<b>Costo en dólares \$</b>
OBTENCIÓN DE PERMISOS Y CONCESIONES	\$ 6.130,00
COMPRA DE EQUIPOS	\$ 4.397.410,92
CONSTRUCCION CIVIL	\$ 91.240,00
CONSTRUCCION ELÉCTRICA	\$ 171.050,00
SERVICIOS E INSUMOS	\$ 210.490,41
COSTOS DE PUESTA EN MARCHA	\$ 116.971,13
IMPREVISTOS	\$ 249.664,62
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 5.242.957,09</b>

**Tabla 4.9:** Resumen de inversiones del proyecto.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

#### 4.2.2 Costos de operación.

El costo de operación del proyecto se lo puede explicar cómo el capital de operación, a los gastos que debe asumir la empresa para el funcionamiento y operación de la planta, estos pueden ser mano de obra directos o mano de obra indirectos y suministros.

##### I. Mano de obra indirecta.

El costo de mano de obra indirecta, para este caso se lo da por el personal que no está directamente en la parte productiva del proyecto.

Descripción	Cantidad (personas)	Sueldo mensual (Dólares)	Beneficio por ley (Dólares)	Tiempo (Meses)	Costo por obra (Dólares)
Presidente	1	\$ 3.500,00	\$ 1.216,50	12	\$ 56.598,00
Gerente General	1	\$ 5.500,00	\$ 1.896,50	12	\$ 88.758,00
Gerente Financiero	1	\$ 2.500,00	\$ 876,50	12	\$ 40.518,00
Contador	1	\$ 700,00	\$ 264,50	12	\$ 11.574,00
Asistente- Secretaria	1	\$ 400,00	\$ 162,50	12	\$ 6.750,00
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 204.198,00</b>

**Tabla 4.10:** Costo del mano de obra indirecta.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

##### II. Mano de obra directa.

Este ítem abarca los costos del personal que se encuentran bajo contrato de dependencia para la construcción, operación y funcionamiento del proyecto de generación mediante el uso de biogás.

Descripción	Cantidad (personas)	Costo mensual (Dólares)	Beneficio por ley (Dólares)	Tiempo (Meses)	Costo por obra (Dólares)
Gerente Técnico	1	\$ 2.200,00	\$ 774,50	12	\$ 35.694,00
Ingeniero 1	1	\$ 1.600,00	\$ 570,50	12	\$ 26.046,00
Ingeniero 2	1	\$ 1.200,00	\$ 434,50	12	\$ 19.614,00
Operadores	7	\$ 500,00	\$ 196,50	12	\$ 58.506,00
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 139.860,00</b>

**Tabla 4.11:** Costo del mano de obra directa.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto



### III. Suministros.

Los suministros que se tomaran en cuenta son aquellos que se utilizarán en el proceso de implementación durante el tiempo de duración del proyecto.

Descripción	Cantidad	Costo mensual (Dólares)	Tiempo (Meses)	Costo por obra (Dólares)
Energía eléctrica	1	\$ 750,00	12	\$ 9.000,00
Agua potable (tanqueros)	4	\$ 120,00	12	\$ 5.760,00
Aceite Pegasus 610	1000	\$ 6,13	12	\$ 73.560,00
Filtro de Aceite	1	\$ 61,75	12	\$ 741,00
Bujías	20	\$ 3,00	12	\$ 720,00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 89.781,00</b>

**Tabla 4.12:** Costo de suministros.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

Para que el proyecto de generación tenga un funcionamiento continuo durante el primer año se tiene un gasto promedio de \$ 433.839 con lo cual se garantiza el trabajo continuo del mismo.

Descripción	Costo (Dólares)
Mano de obra indirecta	\$ 204.198,00
Mano de obra directa	\$ 139.860,00
Suministros	\$ 89.781,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 433.839,00</b>

**Tabla 4.13:** Resumen de costos de operación.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

#### 4.2.3 Financiamiento

El rubro del financiamiento se lo tratará de acuerdo a los datos facilitados y entregados por parte de la Empresa Gasgreen s.a. los cuales se han designado como se muestra en la Tabla 4.14.

**Financiamiento Proyecto de Generación Gasgreen s.a.**

<b>Monto del proyecto</b>	\$ 6.035.920,09
<b>Monto capital propio</b>	\$ 2.500.000,00
<b>Monto hacer financiado</b>	\$ 3.535.920,09
<b>Frecuencia de pago</b>	Mensual
<b>Tipo interés nominal</b>	9,29%
<b>Tipo de interés efectivo</b>	0,007430362
<b>Duración en años</b>	5 Años
<b>Número total de pagos</b>	60

**Tabla 4.14:** Cuadro datos de financiamiento.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

Con los datos de la tabla anterior se calcula el monto mensual que se pagaría al banco, el interés nominal que se aplica está de acuerdo al autorizado por el Banco Central del Ecuador (BCE<sup>29</sup>) en su página web, y además publicado por uno de los bancos más importantes del Ecuador como es el Banco del Pichincha el cual aplica ésta tasa para sus créditos empresariales.

<b>Período</b>	<b>Mensualidad</b>	<b>Intereses</b>	<b>Amortización</b>	<b>Capital vivo</b>	<b>Capital Amortizado</b>
0				\$ 3.535.920,09	
1	\$ 73.256,56	\$ 26.273,17	\$ 46.983,40	\$ 3.488.936,69	\$ 46.983,40
2	\$ 73.256,56	\$ 25.924,06	\$ 47.332,50	\$ 3.441.604,19	\$ 94.315,90
3	\$ 73.256,56	\$ 25.572,36	\$ 47.684,20	\$ 3.393.919,99	\$ 142.000,09
4	\$ 73.256,56	\$ 25.218,05	\$ 48.038,51	\$ 3.345.881,49	\$ 190.038,60
5	\$ 73.256,56	\$ 24.861,11	\$ 48.395,45	\$ 3.297.486,04	\$ 238.434,05
6	\$ 73.256,56	\$ 24.501,51	\$ 48.755,05	\$ 3.248.730,99	\$ 287.189,10
7	\$ 73.256,56	\$ 24.139,25	\$ 49.117,31	\$ 3.199.613,67	\$ 336.306,41
8	\$ 73.256,56	\$ 23.774,29	\$ 49.482,27	\$ 3.150.131,40	\$ 385.788,69
9	\$ 73.256,56	\$ 23.406,62	\$ 49.849,95	\$ 3.100.281,45	\$ 435.638,63
60	\$ 73.256,56	\$ 540,31	\$ 72.716,25	\$ 0,00	\$ 3.535.920,09

**Tabla 4.15:** Cuadro de financiamiento bancario en periodo de 5 años.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

En la tabla 4.15 se puede obtener la cuota mensual por concepto de financiamiento para el proyecto que es de \$ 73.256,56 dólares de Estados Unidos de América.

<sup>29</sup> BCE: Banco Central del Ecuador

### 4.3 Análisis costo beneficio.

Para realizar el análisis del costo beneficio del Proyecto de Generación de Energía Eléctrica en el Relleno Sanitario del Inga nos basaremos en la REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11, la cual tiene referencia al *“Tratamiento para la energía producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales”* la cual se encuentra en su totalidad en el Anexo 6 y de la cual se analizará la factibilidad del proyecto.

Para el análisis económico se tendrá en cuenta la regulación del CONELEC ya que en esta se otorga un valor significativo por cada KW/h que se produzca y a su vez se tiene preferencias al momento del despacho y el tiempo de contrato, que para nuestro caso será de 14 años.

Para el cálculo de los posibles ingresos se toma el escenario donde cada motor trabajará 24 horas diarias 365 días al año menos el tiempo que estén en mantenimiento, pero para este caso se excluirá el tiempo de mantenimiento para facilitar los cálculos. Donde el generador tendrá los siguientes ingresos.

Por lo cual el primer año se tendrá una venta por \$ 3.494.275,20 dólares a lo que se tiene que restar el costo de operación propio que es \$ 792.963,00 dólares por los cinco motores al año, como se puede ver en la Tabla 4.17 aunque estos no se hayan instalados simultáneamente.

<b>Ingresos por venta de energía bruta</b>	\$ 3.494.275,20
<b>flujo de caja neto</b>	\$ 2.701.312,20

**Tabla 4.17:** Ingresos generados por los generadores el primer año.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

Para el segundo año en adelante se toma en cuenta los cinco generadores que estarán en funcionamiento permanente por lo que la tabla de ingresos de este período será constante desde el segundo año en adelante hasta que se cumpla el plazo del contrato con el CONELEC como se muestra en la Tabla 4.18

<b>Año 2 en adelante</b>	
kwh	4500
kwh/día	108000
Kwh/año	39420000
ingresos por venta de energía	\$ 4.355.910,00
flujo de caja neto	\$ 3.562.947,00

**Tabla 4.17:** Ingresos generados por los generadores para el segundo año en adelante.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

### 4.3.1 Análisis de rentabilidad económica.

Para realizar el análisis de rentabilidad económica de este o cualquier proyecto se toma en consideración que el propósito de invertir un capital de dinero tiene como propósito generar beneficios económicos, sociales, ambientales, entre otros para quienes invierten.

Para el presente estudio de este caso particular se tomará en cuenta el valor del dinero en el tiempo como es: el valor actual neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación del Capital Descontado (PRCD), este período permite conocer el tiempo de recuperación de la inversión, el cual nos ayudará para saber si el proyecto es rentable o no.

### 4.3.2 Cálculo del Valor Actual Neto.

Para el cálculo de VAN se resta la suma de los flujos descontados a la inversión inicial como se puede observar en la ecuación 4.1 [29]

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (4.1)$$

Donde:

$BN_t$ = Representa el beneficio neto del flujo en el período t,  $BN_t$  puede tomar valores positivos o negativos.

$i$ = Tasa de descuento.

$n$  = Representa el número de períodos sobre el cual se quiere capitalizar la inversión inicial.

$I_0$  = Inversión inicial en el momento cero

Criterios de referencia para catalogar al proyecto como aceptado o rechazado:

Si el VAN > 0 el proyecto es aceptable.

Si el VAN = 0 el proyecto es neutro, puede ser aceptado o rechazado.

Si el VAN < 0 el proyecto se rechaza.

### 4.3.3 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR representa la tasa de interés más alta que un inversionista puede pagar sin que este pierda dinero, siempre que los fondos para la inversión estén financiados y el préstamo se pague con el ingreso de la inversión a medida que estos se producen. La fórmula de cálculo de la TIR está en la ecuación 4.2.

$$\sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad (4.2)$$

Donde:

$BN_t$  = Representa el beneficio neto del flujo en el período  $t$ , este dato puede ser positivo o negativo.

$r$  = Tasa interna de retorno.

$n$  = Representa el número de períodos sobre el cual se quiere capitalizar la inversión inicial.

$I_0$  = Inversión inicial en el momento cero.

Luego de tener el dato calculado de VAN se debe tener en consideración que:

Si  $r \geq i$  se acepta el proyecto

Si  $r < i$  se rechaza el proyecto

Siendo  $i$  la tasa de descuento.

#### 4.3.4 Cálculo del periodo de recuperación del capital Descontado (PRCD).

Para el cálculo de período de recuperación del capital, este se debe expresar en el número de periodos necesarios para recuperar el valor de la inversión inicial  $I_0$ , donde cada flujo es descontado con una tasa de interés que representa el costo de oportunidad del inversor, mediante la ecuación 4.3.

$$PRCD \rightarrow \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} = I_0 \quad (4.3)$$

Donde:

$BN_t$  = Beneficio neto del flujo en el período t, puede ser positivo o negativo.

i = Tasa de descuento

n = Representa el número de periodos en el cual la sumatoria de flujos netos se iguala a  $I_0$ .

Para saber si un proyecto es aceptado o rechazado, esto dependerá del tiempo de recuperación, al igual que del tipo de proyecto que se esté realizando como base se puede decir que:

- Si el proyecto tiene una recuperación de capital de 1 año este tiene gran rentabilidad.
- Si el proyecto tiene una recuperación de capital de hasta 3 años este tiene una rentabilidad aceptable o promedio.
- Si el proyecto tiene una recuperación de capital de 6 años o más tiene una rentabilidad pequeña y tendría que ser analizada.

Rubro		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Ingreso venta de energia		3.494.275,20	4.355.910,00	4.355.910,00	4.355.910,00	4.355.910,00	4.355.910,00	4.355.910,00	4.355.910,00	4.296.240,00	4.296.240,00	4.296.240,00	4.296.240,00	4.296.240,00	4.296.240,00	4.296.240,00
monto del proyecto	6.035.920,09															
monto hacer financiado	3.535.920,09															
inflacion	8,81															
Gastos																
costo de operación		(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)	(792.963,00)
inflacion			(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)	(69.860,04)
Mantenimientos		(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)	(65.149,27)
Depreciacion anual		(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)	(349.530,47)
pago banco		(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)	(879.078,74)
Mantenimiento Mayor										(123.500,00)	(123.500,00)	(123.500,00)	(123.500,00)	(123.500,00)	(123.500,00)	(123.500,00)
Gastos totales		(2.086.721,48)	(2.156.581,52)	(2.156.581,52)	(2.156.581,52)	(2.156.581,52)	(2.156.581,52)	(2.156.581,52)	(2.156.581,52)	(2.280.081,52)	(2.280.081,52)	(2.280.081,52)	(2.280.081,52)	(2.280.081,52)	(2.280.081,52)	(2.280.081,52)
utilidad antes de impuestos		1.407.553,72	2.199.328,48	2.199.328,48	2.199.328,48	2.199.328,48	2.199.328,48	2.199.328,48	2.199.328,48	2.016.158,48	2.016.158,48	2.016.158,48	2.016.158,48	2.016.158,48	2.016.158,48	2.016.158,48
Trabajadores 15%		211.133,06	329.899,27	329.899,27	329.899,27	329.899,27	329.899,27	329.899,27	329.899,27	302.423,77	302.423,77	302.423,77	302.423,77	302.423,77	302.423,77	302.423,77
Impuesto a la Renta 22%		263.212,54	411.274,42	411.274,42	411.274,42	411.274,42	411.274,42	411.274,42	411.274,42	377.021,63	377.021,63	377.021,63	377.021,63	377.021,63	377.021,63	377.021,63
utilidad neta	(6.035.920,09)	933.208,11	1.458.154,78	1.458.154,78	1.458.154,78	1.458.154,78	1.458.154,78	1.458.154,78	1.458.154,78	1.336.713,07	1.336.713,07	1.336.713,07	1.336.713,07	1.336.713,07	1.336.713,07	1.336.713,07

**Tabla 4.18:** Ingresos generados por los generadores.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

<b>TASA DE DESCUENTO</b>	8,50%
<b>TIR=</b>	21%
<b>VAN=</b>	\$ 11.301.391,77
<b>PAY BACK</b>	3 A, 5 M, 22D

**Tabla 4.19:** Cálculo del VAN, TIR y PAY BACK.

**Fuente:** Propia

**Autor:** Luis Crisanto

El valor del TIR calculado es de 21%, esto indica que la tasa de rentabilidad es superior a la tasa establecida en el país para una rentabilidad de una inversión en un año, con respecto a la de un banco, esta tasa es de 5.65% según el Banco Central del Ecuador en el 2013. Por lo que el proyecto estaría aceptado al tener una tasa interna de retorno es aceptable como tal.

El valor de VAN calculado es de \$ 11.301.391,77 por lo que el valor obtenido indica que el proyecto puede ser aceptado en cuanto al valor actual neto.

El valor de Pay Back se establece en 3 años, 5 meses y 22 días por lo que este parámetro indica que el proyecto puede ser aceptado aunque el tiempo de recuperación del capital es muy largo para un proyecto común, sin embargo se debe tomar en cuenta que este tipo de proyectos son vistos en la parte política y ambiental como proyectos elite.

#### **4.4 Selección de la alternativa técnica y económicamente viable.**

Para la selección de la alternativa técnica y económica viable se ha tomado en cuenta las características de mayor importancia en cuanto a su funcionamiento, eficiencia, consumo de combustible (biogás) y las mejores prestaciones que el grupo de generación pueda ofrecer mediante los catálogos expuestos por cada una de las marcas presentadas a la empresa. Lo cual ha desembocado en la mejor opción técnica no solo por sus prestaciones sino por ser una de las mejores marcas en cuanto a elementos constructivos, además de ello se pone a consideración dicho generador debido a sus bajas emisiones de contaminación las cuales son más exigentes en Europa por lo que en nuestro país no se tendría ningún inconveniente en cuanto a contaminación y su legislación actual.

En el aspecto económico se ha tomado en cuenta el factor de financiamiento ya que este tipo de tecnología no es común en nuestro país por lo que se encarece la inversión y por lo tanto se buscó la empresa que cumpliendo con los requisitos técnico o superándolos tenga flexibilidad financiera para que los generadores puedan ser construidos ya que este tipo de maquinaria se lo hace bajo pedido a los fabricantes de acuerdo a ciertos parámetros referentes al tipo de combustible que se va a utilizar.



Es por ello que luego de analizar técnica y económicamente se propone la adquisición de los generadores ECOMAX Bio 10 debido a sus características técnicas, financiamiento amigable y asesoría en todo momento que se requiera durante el proyecto.

## **CONCLUSIONES.**

Del análisis realizado a la producción de biogás se puede concluir que la cantidad necesaria para la producción de energía eléctrica está garantizada durante el periodo que dura el contrato y extendiéndose varios años después. Con ello se puede afirmar que la planta de generación no tendrá inconvenientes al momento de entrar en funcionamiento a máxima capacidad de generación.

El proyecto analizado desde el punto de vista técnico como ambiental es factible pero en lo que respecta a su parte económica está limitado debido a la rentabilidad que se produce mediante la obtención del título habilitante que otorgo el CONELEC para las energías renovables no convencionales al momento de la recuperación del capital debido a que este tipo de generadoras tienden a recuperar su inversión en largos periodos de tiempo.

Otro punto importante es el ingreso de valores que se pudiera obtener de los CER's debido a que por la crisis mundial y en especial la europea estos certificados en la actualidad no cuentan con un valor base aceptable, ya que al inicio del proyecto MDL se asumió un valor promedio de 8 euros en el 2009 por certificado cayendo vertiginosamente hasta llegar a 0,36 centavos de euro a la fecha de realización del presente trabajo (octubre 2013), por lo que los ingresos quedan aún limitados exclusivamente a la generación de energía. Otro punto del análisis económico demuestra que el tiempo de recuperación de la inversión está en el límite admisible para declarar al proyecto como no apto debido a que para que el proyecto tendrá ingresos exclusivos como se lo menciono anteriormente.

Por todo lo anterior mencionado se concluya que el proyecto es técnicamente factible, social y ambientalmente viable pero desde el punto de vista económico requiere una adecuada gestión técnico-administrativa y política a fin de que pueda ser implementado con éxito y alcanzar expectativas. Las condiciones existentes en el Ecuador son muy buenas debido a la actualización y modificación tanto de la matriz energética como del medio ambiente.

## **RECOMENDACIONES.**

Para las recomendaciones se ha tomado en cuenta el combustible ya que el biogás al no tener una gran concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ) se lo tiene que purificar para mejorar la combustión, es por ello que se recomienda el uso de un sistema de purificación para poder eliminar elementos nocivos en el motor de combustión interna en el cual provocarían daños a corto y largo plazo, con ello encareciendo el funcionamiento normal del sistema o en casos extremos destruyendo por completo al generador.

Se recomienda realizar análisis periódicos del aceite del motor debido a que en este se depositan elementos corrosivos los cuales pueden dañar o acortar en gran medida la vida útil de los generadores. Y disminuir considerablemente la capacidad de destrucción del metano haciendo que este proceso no cumpla con su objetivo medioambiental principal el cual es emitir la menor cantidad de contaminación y ayudar a la mitigación del efecto invernadero.

En cuanto a las recomendaciones que se sugieren en la aspiración del biogás es recomendable realizar un análisis de gas completo para determinar de mejor manera el tipo de gas combustible que se está utilizando y el tipo de emisiones que este produce luego de la combustión en el motor de combustión interna del generador.

Una última recomendación es la acumulación de certificador de reducción de emisiones debido ya que por el momento el valor de estos es muy bajo y no es recomendable la venta, debido a que la producción de estos implica un gasto muy por encima del valor a recibir.

## GLOSARIO

**Biofiltro:** Los biofiltros, también denominados filtros biológicos, son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes desde una corriente de fluido (aire o agua) mediante un proceso biológico.

**Cogeneración:** La cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria). Si además se produce frío (hielo, agua fría, aire frío, por ejemplo) se llama trigeneración.

**Desgasificar:** El proceso de eliminación de gases disueltos en agua, usando aspiración o calor.

**Digestión anaeróbica:** La digestión anaeróbica es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Este proceso genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes (dependiendo del material degradado)

**Digestión aeróbica:** Se denominan aerobios o aeróbicos a los organismos que pueden vivir o desarrollarse en presencia de oxígeno diatómico, mientras que si lo necesitan se denominan aerobios estrictos.

**Monoetanolamina:** La etanolamina, también llamada 2-aminoetanol o monoetanolamina, abreviado como ETA o MEA, es un compuesto químico orgánico que es tanto una amina primaria, (debido a un grupo amino en su molécula) como un alcohol primario (debido a un grupo hidroxilo).

**Nm<sup>3</sup>:** la N, se refiere en condiciones normales: temperatura = 0 °C / 273 K y presión = 1 atmósfera; aunque a veces también se refiere a condiciones de 25 °C, que puede asimilarse a la temperatura ambiente)

**Pelets:** es una denominación genérica, utilizada para referirse a pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido. El término es utilizado para referirse a diferentes materiales.

**Ppbv:** Una parte por billón (debería decirse una parte por mil millones) es una unidad de medida para expresar concentraciones extremadamente pequeñas, trazas (del orden de  $10^{-2}$  -  $10^{-4}$  % en peso) de una sustancia extremadamente diluida en otra

**Sílica gel:** El gel de sílice es una forma granular y porosa de dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico. A pesar del nombre, el gel de sílice es sólido.

**Siloxanos:** Grupo de compuestos que contienen silicio, oxígeno e hidrógeno. Se polimerizan con facilidad dando siliconas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Costa, BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES, Madrid - España: Amvediciones, 2013 (1ª Edición).
- [2] A. H. López, «Valorización de residuos de biomasa en la industria,» [www.energia2012.es](http://www.energia2012.es), Sevilla, 2012.
- [3] C. D. M, Enciclopedia de Energía, Tomo 5, México-Barcelona, 2005.
- [4] S. K. Colmenares W, GENERACIÓN Y MANEJO DE GASES EN SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL, México, 2007.
- [5] F. Schmidt, «CSD Ingenieros SA,» 1999. [En línea]. Available: <http://www.resol.com.br/>. [Último acceso: 13 09 2012].
- [6] MIDUVI, Artist, *Censo de agua Potable, Alcantarillado y residuos Sólidos*. [Art]. MIDUVI, 2009.
- [7] J. Sara-Lafosse Rios, PRODUCCION DE BIOGAS APARTIR DE LA BASURA PROCESADA EN UN RELLENO SANITARIO Y SU USO COMO ENERGÍA MECÁNICA NO CONVENCIONAL, México D.F., 1996.
- [8] A. Demirbas, BIORENEWABLE GASEOUS FUELS, London: Springer London, 2008, pp. 233-235.
- [9] G. E. Espinel D., EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL USO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE PARA GENERAR ENERGÍA UTILIZANDO BIOGÁS PROVENIENTE DE UN RELLENO SANITARIO, Bogotá D.C., 2005.
- [10] Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino de España, «El sector del biogás agroindustrial en España. Mesa sobre materia prima agraria y biocombustibles,» Altercexa, Madrid, 2010.
- [11] J. M. H. V. José L. Arvizu F., «Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad,» ITESM, Mexico, 2003.

- [12] Guía Ambiental para Rellenos Sanitarios, 2002.
- [13] A. Zapata Cavidad, «CIPAV,» 25 10 2006. [En línea]. Available: <http://www.cipav.org.co>. [Último acceso: 17 05 2013].
- [14] U. Marchaim, Biogas processes for sustainable, Israel: MIGAL Galilee Technological Centre Kiryat Shmona, 1992.
- [15] R. Eva, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE RELLENOS SANITARIOS MUNICIPALES., Loja: Ed. Ded – Municipio de Loja, 2002.
- [16] o. H. Llana, Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás., 2010.
- [17] J. y. N. A. Morgan-Sagustume, Hydrogen sulfide removal by compost biofiltration, 2006.
- [18] M. Mitariten, «Landfill gas upgrading process,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.moleculargate.com>. [Último acceso: 3 10 2012].
- [19] E. Fernández, Procedimiento para la purificación de biogás, Cuba: Publicación CU 23003 Al., 2004.
- [20] H. M. y. o. c. autores, Chemical absorption of H<sub>2</sub>S for biogas purification, Braz. J. Chem. Eng., 2004.
- [21] J. Víquez, «Remoción del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S (g))/ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S (aq)) en el biogás.,» ECAG, n° ECAG N°53, pp. 16 - 21, 2010.
- [22] J. R. Marchant, «Biotamb S.A.,» 06 2009. [En línea]. Available: <http://www.redbiogas.cl/>. [Último acceso: 04 10 2012].
- [23] S. Pabon, «overblog,» overblog, 2010. [En línea]. Available: <http://afinautos.over-blog.com/>. [Último acceso: 18 11 2012].
- [24] F. D. P. J. G. Hernán G. Asís, PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS OBTENIDO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS, Córdoba -

Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco, Grupo GISENER, 2012.

- [25] M. P. CORP., «Generador tipo,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.chinagenerator.es/>. [Último acceso: 30 11 2011].
- [26] A. d. P. A. d. E. Unidos, «EPA,» 11 2011. [En línea]. Available: <http://www.epa.gov/>. [Último acceso: 27 11 2011].
- [27] Programa Landfill Methane Outreach de la EPA de los EE.UU. (LMOP), «EPA ONG,» EPA, 02 2009. [En línea]. Available: <http://www.epa.gov/>. [Último acceso: 14 01 2013].
- [28] Consejo Nacional de Electrificación, «REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11,» CONELEC, Quito, 2011.
- [29] G. V. Urbina, Evaluación de Proyectos 4<sup>a</sup> Edición, McGraw –Hill, Interamericana Editores S.A., 2001..
- [30] L. Crisanto, Artist, *Construccion de planta de aspiracion de biogas*. [Art]. Gasgreen s.a., 2012.
- [31] ONUDI, «Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.cubaenergia.cu/>. [Último acceso: 07 06 2012].
- [32] biomasanj, «Biomasa NJP,» 31 03 2011. [En línea]. Available: <http://biomasanjpruthmarta.blogspot.com>. [Último acceso: 11 08 2012].
- [33] Ministerio de Energia de Chile, «Ministerio de Energia de Chile,» bobierno de Chile, 2010. [En línea]. Available: <http://antiguo.minenergia.cl/>. [Último acceso: 08 2012].
- [34] M. F. Solíz, Artist, *Tesis doctoral de Ma. Fernanda Solíz UASB*. [Art]. UNIVERSIDAD AUTONOMA SIMON BOLIVAR, 2011.
- [35] J. P. V.M., Artist, *Wastes Manage*. [Art]. Laurijsens, 2011.



- [36] R. h. P. Don W. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, U.S.A.: McGraw - Hill Professional, 2007.
- [37] O. P. d. I. Salud, Artist, *Manual para la Elaboracion de Compost - Bases Conceptuales y Procedimientos*. [Art]. Organizacion Panamericana de la Salud, 2009.
- [38] Moncayo, Artist, *Dimensionamiento, diseño y construccion de biodegestores y plantas de biogás*. [Art]. 2008.
- [39] B. Satian, Artist, *FUNDAMENTOS DE LOS MOTORES POLI CILÍNDRICOS*. [Art]. blogspot, 2012.
- [40] Lucas., «aprende mecanica.com,» 08 2013. [En línea]. Available: <http://www.aprendermecanica.com.ar/>. [Último acceso: 06 10 2013].
- [41] G. Pillajo, Artist, *Generador AC Tesis de tecnologia..* [Art]. EPN, 2008.
- [42] Biotecnogas, «Memoria tecnica Planta de biogas,» Quito, 2008.
- [43] Greenleaf Ambiental Company Cía. Ltda, «Estudio de impacto ambiental definitivo(EIAD) para proyecto de generacion de energía electrica con el biogas producido en el relleno sanitario del Inga,» Greenleaf Ambiental Company Cía. Ltda, Quito, 2012.
- [44] Greenleaf Ambienta cia. ltda, «ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEFINITIVO DEL PROYECTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON EL BIOGAS PRODUCIDO EN EL RELLENO SANITARIO “EL INGA” I Y II DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO Y SU INTERCONEXIÓN CON LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO (EEQ),» Greenleaf Ambienta cia. ltda, Quito, 2012.
- [45] J. Jaramillo, GUÍA PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MANUALES, Antioquia, Colombia: OPS/CEPIS, 2002.

# Anexos

# **MAPAS DE CENSO NACIONALES**

# **ESTUDIO AMBIENTAL**

**CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN  
PROMEDIO ANUAL**

# **HOJA DE CÁLCULO EPA**

# **OFERTA ECONÓMICA AB ENERGY**

# **REGULACIÓN CONELEC 004/11**