



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“ESTUDIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL RELLENO  
SANITARIO DE MORELIA MICHOACÁN.”**

**PROYECTO DE TESIS**

**Que para obtener el Título de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Presenta**

**EDUARDO GUERRERO CHÁVEZ**

**Asesor de Tesis**

**INGENIERO ELECTRICISTA VÍCTOR QUINTERO ROJAS**

**Morelia Michoacán**

**Agosto del 2013.**

## **Agradecimientos.**

- A mis compañeros y amigos, por su constante apoyo en todo momento.
- A todas las personas pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo, por su aporte a mi formación profesional y al desarrollo de mi tesis.
- A mi asesor de tesis el profesor Víctor Quintero Rojas por su ayuda en la realización de la esta tesis.

# **Dedicatoria.**

- A Dios por ser la fuerza y guía de mis pasos.
- A mis padres, por el gran apoyo y estímulo que me han brindado para superar los retos. por ser mi ejemplo toda la vida y la gran herencia que de ellos he recibido, la educación superior.
- A mis hermanas y hermanos por el gran apoyo recibido.
- A todas la personas que ayudaron de una u otra forma a la realización de este trabajo.

## Resumen.

La disposición definitiva de los residuos sólidos es, hoy en día, uno de los problemas más importantes que afectan a la región América Latina en términos ambientales. El sistema más adecuado para la disposición final es el relleno sanitario.

El presente trabajo provee de información básica acerca de la generación, composición y manejo del gas producto de la disposición final de los residuos sólidos en un relleno sanitario y de las alternativas para su uso posterior a su recolección. Producto de la biodegradación de los residuos en estos rellenos sanitarios se tienen los lixiviados y a los gases, éste último denominado biogás.

La producción del biogás en rellenos grandes permite su aprovechamiento transformándolos en energía eléctrica teniendo una alta inversión inicial, pero que puede ser autofinanciable.

El biogás generado en rellenos sanitarios puede ser capturado utilizando un sistema de recolección de biogás que usualmente quema el gas por medio de quemadores. Alternativamente el gas recuperado puede usarse de diferentes maneras. Por ejemplo: producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas o microturbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua u otras instalaciones.

Además de los beneficios energéticos en el uso del biogás, la recolección y control del biogás generado ayuda a reducir emisiones atmosféricas contaminantes.

# Contenido.

|                                                                                                                           |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>AGRADECIMIENTOS .....</b>                                                                                              | <b>II</b>   |
| <b>DEDICATORIA .....</b>                                                                                                  | <b>III</b>  |
| <b>RESUMEN. ....</b>                                                                                                      | <b>IV</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                                                                                              | <b>VIII</b> |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES.....</b>                                                                             | <b>X</b>    |
| <b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....</b>                                                                                       | <b>1</b>    |
| 1.1 INTRODUCCIÓN. ....                                                                                                    | 1           |
| 1.2 ANTECEDENTES. ....                                                                                                    | 2           |
| 1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS. ....                                                                                           | 4           |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN. ....                                                                                                   | 4           |
| 1.5 METODOLOGÍA. ....                                                                                                     | 5           |
| 1.6 DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS. ....                                                                                    | 6           |
| <b>2 CAPÍTULO 2 TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS. ....</b>                                                                    | <b>7</b>    |
| 2.1 INTRODUCCIÓN. ....                                                                                                    | 7           |
| 2.2 EL MEDIO AMBIENTE EN EL MUNDO. ....                                                                                   | 7           |
| 2.2.1 PROTOCOLO KIOTO. ....                                                                                               | 8           |
| 2.2.2 BONOS VERDES. ....                                                                                                  | 8           |
| 2.2.3 EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES INVERNADERO. ....                                                                       | 9           |
| 2.3 GENERACIÓN ELÉCTRICA. ....                                                                                            | 9           |
| 2.3.1 EL CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....                                                                       | 10          |
| 2.3.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLES Y FUENTES PRIMARIAS PARA LA GENERACIÓN MUNDIAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....                   | 11          |
| 2.3.3 TENDENCIA MUNDIAL EN LA UTILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES Y OTRAS FUENTES PRIMARIAS PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD. .... | 12          |
| 2.3.4 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO. ....                                                                     | 13          |
| 2.4 ENERGÍAS RENOVABLES Y NO RENOVABLES. ....                                                                             | 14          |
| 2.5 ENERGÍAS RENOVABLES. ....                                                                                             | 15          |
| 2.5.1 CAPACIDAD TOTAL INSTALADA DE ENERGÍAS RENOVABLES A NIVEL MUNDIAL. ....                                              | 17          |
| 2.5.2 CAPACIDAD TOTAL INSTALADA POR ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO. ....                                                   | 17          |
| 2.5.3 EL POTENCIAL EN MÉXICO POR ENERGÍAS RENOVABLES. ....                                                                | 20          |
| 2.6 EL POTENCIAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN RELLENOS SANITARIOS. ....                                                        | 21          |
| 2.7 LA PRODUCCIÓN DE BASURA A NIVEL MUNDIAL. ....                                                                         | 21          |
| 2.7.1 LA PRODUCCIÓN DE BASURA EN MÉXICO. ....                                                                             | 21          |
| 2.7.2 RECOLECCIÓN DE LA BASURA. ....                                                                                      | 22          |

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.8 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....</b>                                                                    | <b>22</b> |
| 2.8.1 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN MEXICO. ....                                           | 22        |
| <b>2.9 RELLENO SANITARIO. ....</b>                                                                          | <b>23</b> |
| 2.9.1 EMISIONES DEL RELLENO SANITARIO.....                                                                  | 23        |
| 2.9.2 TIPOS DE RELLENO SANITARIO EN RELACIÓN CON LA DISPOSICIÓN FINAL.....                                  | 24        |
| 2.9.3 MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO. ....                                                 | 26        |
| 2.9.4 SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN. ....                                                                   | 30        |
| 2.9.5 CONTROL DE AGUA PLUVIAL. ....                                                                         | 31        |
| 2.9.6 GENERACIÓN DE LIXIVIADOS.....                                                                         | 32        |
| 2.9.7 COBERTURAS DEL RELLENO SANITARIO.....                                                                 | 35        |
| 2.9.8 CONTROL DE LOS GASES DEL RELLENO SANITARIO. ....                                                      | 35        |
| 2.9.9 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL RELLENO SANITARIO .....                                                   | 35        |
| 2.9.10 RESTRICCIONES PARA LA UBICACIÓN DEL SITIO.....                                                       | 38        |
| 2.9.11 IMPACTOS A LA SALUD Y AL MEDIO AMBIENTE PRODUCTO DE UN DEFICIENTE MANEJO DE<br>RESIDUOS SÓLIDOS..... | 38        |
| 2.9.12 USO FUTURO DEL RELLENO SANITARIO.....                                                                | 40        |

### **3 CAPÍTULO 3 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL BIOGÁS..... 41**

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1 INTRODUCCIÓN.....</b>                                                               | <b>41</b> |
| <b>3.2 LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....</b>                                                     | <b>41</b> |
| <b>3.3 BIOGÁS.....</b>                                                                     | <b>42</b> |
| 3.3.1 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL BIOGÁS.....                                            | 42        |
| 3.3.2 ¿POR QUÉ APROVECHAR EL BIOGÁS? .....                                                 | 45        |
| 3.3.3 USOS DEL BIOGÁS.....                                                                 | 46        |
| 3.3.4 UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS ALREDEDOR DEL MUNDO. ....                                     | 46        |
| 3.3.5 LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS.....                                  | 47        |
| <b>3.4 RENDIMIENTOS TEÓRICOS DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DISPUESTOS. 52</b> | <b>52</b> |
| 3.4.1 MODELOS PREDICTIVOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....                                  | 53        |
| 3.4.2 COMPARACIÓN DE DIFERENTES COMBUSTIBLES CON EL BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO....        | 57        |
| <b>3.5 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL BIOGÁS .....</b>                             | <b>57</b> |

### **4 CAPÍTULO 4 RELLENO SANITARIO DE MORELIA MICHOACÁN..... 59**

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1 INTRODUCCIÓN.....</b>                                   | <b>59</b> |
| <b>4.2 RELLENO SANITARIO MODERNO. ....</b>                     | <b>59</b> |
| <b>4.3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....</b> | <b>60</b> |
| 4.3.1 POZOS DE EXTRACCIÓN. ....                                | 60        |
| 4.3.2 SISTEMAS DE CONDUCCIÓN. ....                             | 64        |
| 4.3.3 EQUIPOS DE EXTRACCIÓN.....                               | 66        |
| 4.3.4 CONTROL EXTRACCIÓN. ....                                 | 67        |
| 4.3.5 ANALIZADORES DE BIOGÁS .....                             | 67        |
| <b>4.4 SISTEMA DE QUEMADO. ....</b>                            | <b>68</b> |
| 4.4.1 TIPOS DE QUEMADORES.....                                 | 68        |
| 4.4.2 INCINERACIÓN CON ANTORCHA.....                           | 70        |
| <b>4.5 PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS.....</b>                        | <b>72</b> |
| 4.5.1 ELIMINADOR DE HUMEDAD .....                              | 72        |

|                                                |                                                                                             |            |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.2                                          | ELIMINACIÓN DEL <b>H<sub>2</sub>S</b> .                                                     | 73         |
| <b>4.6</b>                                     | <b>CONVERSIÓN DE ENERGÍA CALORÍFICA A ELÉCTRICA.</b>                                        | <b>74</b>  |
| 4.6.1                                          | TURBINA DE GAS.                                                                             | 74         |
| 4.6.2                                          | TURBINAS DE VAPOR.                                                                          | 77         |
| 4.6.3                                          | MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.                                                              | 79         |
| 4.6.4                                          | MOTORES A GAS.                                                                              | 80         |
| 4.6.5                                          | MOTORES A GASOLINA.                                                                         | 81         |
| 4.6.6                                          | MOTORES A DIESEL.                                                                           | 81         |
| 4.6.7                                          | GENERADOR SÍNCRONO.                                                                         | 82         |
| <b>4.7</b>                                     | <b>GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL RELLENO SANITARIO DE MORELIA.</b>                  | <b>92</b>  |
| 4.7.1                                          | TIRADERO DE MORELIA.                                                                        | 92         |
| 4.7.2                                          | EL RELLENO SANITARIO DE MORELIA.                                                            | 92         |
| 4.7.3                                          | PREDICCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN MORELIA MICH. USANDO EL MODELO DE BIOGÁS MEXICANO. | 93         |
| <b><u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.</u></b> |                                                                                             | <b>101</b> |
| CONCLUSIONES .....                             |                                                                                             | 101        |
| TRABAJOS FUTUROS.....                          |                                                                                             | 103        |

# Lista de Figuras.

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2-1 CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA 16,816 TWH (TERA WATTS HORA).....                                                               | 10 |
| FIGURA 2-2 CONSUMO MUNDIAL DE COMBUSTIBLES Y UTILIZACIÓN DE FUENTES PRIMARIAS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD 1980-2008 PJ (PETAJOULES)..... | 11 |
| FIGURA 2-3 COMBUSTIBLES Y OTRAS FUENTES PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA MUNDIAL 2007-2025. ....                                                    | 13 |
| FIGURA 2-4 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO. ....                                                                                      | 13 |
| FIGURA 2-5 CAPACIDAD INSTALADA POR FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES 2.365 MW. ....                                                                 | 18 |
| FIGURA 2-6 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO. ....                                                                          | 23 |
| FIGURA 2-7 RELLENO SANITARIO OPERADO CON EQUIPO PESADO. ....                                                                                    | 24 |
| FIGURA 2-8 TRACTOR AGRÍCOLA ADAPTADO. ....                                                                                                      | 25 |
| FIGURA 2-9 TRACTOR AGRÍCOLA ADAPTADO CON VOLTEO HIDRÁULICO. ....                                                                                | 26 |
| FIGURA 2-10 MÉTODO DE TRINCHERA PARA CONSTRUIR UN RELLENO SANITARIO. ....                                                                       | 27 |
| FIGURA 2-11 MÉTODO DE ÁREA PARA CONSTRUIR UN RELLENO SANITARIO. ....                                                                            | 28 |
| FIGURA 2-12 MÉTODO DE ÁREA PARA RELLENAR DEPRESIONES. ....                                                                                      | 29 |
| FIGURA 2-13 COMBINACIÓN DE AMBOS MÉTODOS.....                                                                                                   | 29 |
| FIGURA 2-14 LOCALIZACIÓN DE POZOS DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LIXIVIADO EN UN RELLENO SANITARIO.....                                   | 34 |
| FIGURA 2-15 DEPÓSITO PARA COLECTAR MUESTRAS DEL LIXIVIADO. ....                                                                                 | 34 |
| FIGURA 3-1 USOS DEL BIOGÁS.....                                                                                                                 | 46 |
| FIGURA 3-2 FASES DE LA BIOGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....                                                                                | 51 |
| FIGURA 3-3 PÁGINA DE ALIMENTACIÓN. ....                                                                                                         | 56 |
| FIGURA 4-1 RELLENO SANITARIO MODERNO. ....                                                                                                      | 59 |
| FIGURA 4-2 TUBERÍA DEL POZO.....                                                                                                                | 62 |
| FIGURA 4-3 COLECTOR HORIZONTAL.....                                                                                                             | 63 |
| FIGURA 4-4 CABEZAL DEL POZO DE EXTRACCIÓN.....                                                                                                  | 64 |
| FIGURA 4-5 SISTEMA DE TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN Y CONECTADAS A LAS LÍNEAS DE CABEZALES O SUBCABEZALES.....                                         | 65 |
| FIGURA 4-6 TUBERÍA PRINCIPAL.....                                                                                                               | 65 |
| FIGURA 4-7 COMPRESOR DE PISTÓN CON SOPLADOR PARA BIOGÁS (ESTACIONARIO).....                                                                     | 67 |
| FIGURA 4-8 ANALIZADOR DE BIOGÁS. ....                                                                                                           | 68 |
| FIGURA 4-11 ELIMINADOR DE HUMEDAD. ....                                                                                                         | 72 |
| FIGURA 4-12 PRINCIPIO DE UNA TURBINA DE GAS. ....                                                                                               | 74 |
| FIGURA 4-13 DISEÑO DE DOS EJES. ....                                                                                                            | 75 |
| FIGURA 4-14 TURBINA DE GAS CON INCREMENTO DE EFICIENCIA. ....                                                                                   | 75 |
| FIGURA 4-15 SISTEMA DE GENERACIÓN COMPLETO CON COMBUSTIBLE BIOGÁS.....                                                                          | 76 |
| FIGURA 4-16 CADENA DE TRANSFORMACIÓN DEL CICLO DE VAPOR. ....                                                                                   | 77 |
| FIGURA 4-17 PROCESO SIMPLIFICADO. ....                                                                                                          | 78 |
| FIGURA 4-18 MOTOR A DIESEL .....                                                                                                                | 82 |
| FIGURA 4-19 ARREGLO DE UN GENERADOR CON EXCITADOR SIN ESCOBILLAS. ....                                                                          | 85 |
| FIGURA 4-20 GENERADOR CON EXCITADOR PILOTO. ....                                                                                                | 85 |
| FIGURA 4-21 GRÁFICA DE LA CURVA DE MAGNETIZACIÓN DEL CIRCUITO ABIERTO DEL GENERADOR. ....                                                       | 87 |
| FIGURA 4-22 REACCIÓN DEL INDUCIDO EN UN ROTOR DE DOS POLOS. ....                                                                                | 88 |
| FIGURA 4-23 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR. ....                                                                                            | 89 |
| FIGURA 4-24 CONEXIÓN TRIFÁSICA DEL GENERADOR (Y Y Δ).....                                                                                       | 90 |

# Lista de Tablas.

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 2-1 COSTOS DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN LOS PAÍSES DE LA OECD<br>PROYECTADO DE 2005-2030..... | 14 |
| TABLA 2-2 ENERGÍAS RENOVABLES. ....                                                                        | 15 |
| TABLA 2-3 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANO. ....                                          | 21 |
| TABLA 2-4 FACTORES DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS. ....                                                       | 32 |
| TABLA 2-5 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL RELLENO SANITARIO. ....                                              | 36 |
| TABLA 2-6 EJEMPLOS DE RESIDUOS PELIGROSOS Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA. ....                        | 39 |
| TABLA 3-1 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS DERIVADO DE DIVERSAS FUENTES. ....                                        | 43 |
| TABLA 3-2 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL CH <sub>4</sub> . ....                                            | 44 |
| TABLA 3-3 COMPOSICIÓN PROMEDIO DEL BIOGÁS DESDE QUE FINALIZÓ LA CONSTRUCCIÓN DE LA<br>CELDA.....           | 52 |
| TABLA 3-4 COMPARACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES DE GASEOSOS. ....                               | 57 |
| TABLA 4-1 TIPOS DE QUEMADORES. ....                                                                        | 68 |
| TABLA 4-2 TURBINAS DE GAS ADECUADAS A GAS DE BAJA TEMPERATURA. ....                                        | 77 |

## Lista de Símbolos y Abreviaciones.

|                            |                                                                                |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Ca}(\text{OH})_2$   | Cal hidratada.                                                                 |
| $\text{CH}_3\text{COOH}$   | Ácido acético.                                                                 |
| $\text{CH}_4$              | Metano.                                                                        |
| $\text{CO}_2$              | Dióxido de carbono.                                                            |
| EUA                        | Estados Unidos de América,                                                     |
| $\text{H}_2$               | Hidrógeno.                                                                     |
| $\text{H}_2\text{SO}_4$    | Acido sulfúrico.                                                               |
| $\text{H}_2\text{S}$       | Ácido sulfhídrico.                                                             |
| $\text{Km}^2$              | Kilómetro cuadrado.                                                            |
| $\text{m}^3/\text{hora}$   | Metros cúbicos por hora.                                                       |
| $\text{m}^3/\text{minuto}$ | Metros cúbicos por minuto.                                                     |
| $\text{N}_2$               | Nitrógeno.                                                                     |
| $\text{NaHCO}_3$           | Bicarbonato de sodio.                                                          |
| $\text{NH}_3$              | Amoníaco.                                                                      |
| $\text{N}_2\text{O}$       | Dióxido de nitrógeno.                                                          |
| $\text{O}_2$               | Oxígeno.                                                                       |
| $\text{SO}_2$              | Dióxido de azufre.                                                             |
| Atm                        | Atmósfera.                                                                     |
| Bars                       | Unidad de presión equivalente a un millón de barias.                           |
| CER                        | Certificados de Emisiones Reducidas.                                           |
| COV                        | Compuestos orgánicos volátiles.                                                |
| DBO                        | La demanda bioquímica de oxígeno.                                              |
| DQO                        | La demanda química de oxígeno.                                                 |
| EPA                        | Environmental protection agency, Agencia de protección del medio.<br>ambiente. |
| GEI                        | Gases de efecto invernadero.                                                   |
| GJ/año                     | Gigajoules por año.                                                            |
| GLP                        | Gas licuado del petróleo.                                                      |
| GW                         | Gigawatt.                                                                      |
| GWh/año                    | Gigawatt hora por Año.                                                         |

|                        |                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| GWP                    | Global Warming Potential, Potencial de calentamiento global. |
| HP                     | Caballos de fuerza por hora.                                 |
| HPDE                   | High density polyethylene, polietileno de alta densidad.     |
| Kcal/hr                | Kilocaloría por hora.                                        |
| Kcal/m <sup>3</sup>    | Kilocaloría por metro cubico.                                |
| Kg                     | Kilogramo.                                                   |
| Kg                     | Kilogramo.                                                   |
| Kg/hab                 | kilogramo por habitante.                                     |
| KW                     | Kilowatt.                                                    |
| KWh                    | Kilowatt-hora.                                               |
| kWh/día/m <sup>2</sup> | Kilowatts hora por día por metro cuadrado.                   |
| m                      | Metros.                                                      |
| m <sup>3</sup>         | Metro cúbico.                                                |
| m <sup>3</sup> /kg     | Metro Cúbico por kilogramo.                                  |
| MDL                    | Mecanismo de Desarrollo Limpio.                              |
| MW                     | Megawatts.                                                   |
| NIMBY                  | Not in my back yard, no en mi patio trasero.                 |
| Nm <sup>3</sup>        | Metro cúbico normal ,25 °C y 1 atmósfera.                    |
| °C                     | Grados centígrados.                                          |
| OCDE                   | Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos.    |
| pH                     | Potencial de hidrógeno.                                      |
| Pj                     | Petajoule.                                                   |
| PJ/año                 | Petajoule por año.                                           |
| PVC                    | Policloruro de vinilo.                                       |
| RSM                    | Residuos sólidos municipales.                                |
| S                      | Azufre.                                                      |
| Sedesol                | Subsecretaría de Desarrollo Social.                          |
| Sener                  | Secretaría de energía                                        |
| T/d                    | Toneladas por día.                                           |
| TMCA                   | Tasa Media de Crecimiento anual.                             |
| TWH                    | Terawatts hora.                                              |

# Capítulo 1 Introducción.

## 1.1 Introducción.

Quizás el momento más decisivo para la humanidad haya sido el descubrimiento del fuego, y gracias a él, la humanidad comenzó a ser capaz de controlar y modificar muchos procesos que hasta ese momento dependían únicamente de la naturaleza. Desde entonces la energía ha sido un elemento indispensable en la satisfacción de las necesidades cotidianas de todas las formas de organización social, partiendo de los usos y equipos más elementales, como la cocción de alimentos con los fogones de tres piedras, hasta los sofisticados aparatos electrónicos dedicados exclusivamente al ocio y el entretenimiento en las sociedades post-industriales.

Desde la perspectiva humana, la energía es entonces, ubicua y permanente. Ubicua, porque el hombre en tanto ente biológico y social depende de ella, ya sea como la radiación solar indispensable para las funciones biológicas o para los ciclos agrícolas, o como la fuerza motriz del viento o del agua requerida para impulsar los antiguos molinos de granos, o los modernos equipos de generación eléctrica. Y es permanente, porque las necesidades pasadas, presentes y futuras de energía son determinadas y conducidas por tres factores principales: el crecimiento de la población, el desarrollo económico y el progreso tecnológico.

En la actualidad la basura es uno de los problemas más importantes que existen en las grandes ciudades, al igual que el costo de la producción de la energía eléctrica, los ingenieros se dieron a la tarea de encontrar una solución que fuera viable y al mismo tiempo resolviera estos dos problemas. La solución fue la utilización de los rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica.

Hace poco menos de un siglo, en EUA (Estados Unidos de América) , surgió el relleno sanitario como resultado de las experiencias, de compactación y cobertura de los residuos con equipo pesado; desde entonces, se emplea este término para aludir al sitio en el cual los residuos son primero depositados y luego cubiertos al final de cada día de operación.

En la actualidad, el relleno sanitario moderno se refiere a una instalación diseñada y operada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por supuesto, en su óptima operación y control.

En México, como en otros países en desarrollo, la mayoría de los hogares no cuenta con trituradores de desperdicios alimenticios en las cocinas y, por la misma razón, aproximadamente el 45 por ciento de la basura está compuesta por desechos de ese tipo. Los desechos sólidos municipales se depositan en rellenos sanitarios, generalmente en ausencia de oxígeno, y se descomponen por una combinación de procesos químicos, físicos y biológicos denominados biogás y lixiviados. En México, muchas personas han hecho del reciclaje manual un gran negocio, pues la materia orgánica alcanza valores del orden de 90 por ciento. Por el momento, los rellenos sanitarios son la forma correcta para eliminar la basura y este método consiste en una excavación reticular en cuyos taludes y fondos se instala una geomembrana impermeable para contener los compuestos (biogás y lixiviados) que se generan cuando los desechos se encuentran en un ambiente sin oxígeno. En algunos casos, con el propósito de evitar la realización de excavaciones, se aprovechan los tiros de minas abandonadas o barrancas, siempre y cuando no se dañe la flora y la fauna del lugar.

En los rellenos sanitarios del país adquiere cada día mayor importancia la generación de biogás, y se pone énfasis en la calidad y la cantidad. Con el biogás se puede producir energía. Los rellenos sanitarios tienen un procedimiento mundialmente aceptado en cuanto a la disposición final de los desechos sólidos municipales.

## **1.2 Antecedentes.**

El crecimiento urbano ha propiciado un incremento en la generación de residuos provenientes de actividades que se desarrollan en casas habitación, sitios de servicios privados y públicos, construcciones, demoliciones, establecimientos comerciales y de servicios. La gestión de los residuos sólidos, desde el lugar de la producción hasta su disposición final, incluye varias etapas relacionados con el almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesado y disposición final de los mismos. El manejo integral de los desechos sólidos se debe de realizar de una manera eficiente y ordenada para proporcionar la solución más adecuada, en concordancia con los mejores principios de salud pública, economía, ingeniería, estética, aceptación social y preservación ambiental.

Al depositarse los residuos en los rellenos, éstos comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos complejos. Los productos principales de la descomposición son los

líquidos lixiviados y los gases. Tanto los líquidos como los gases pueden afectar la salud de las poblaciones de los alrededores.

La producción de metano se debe a la actuación de microorganismos como bacterias, que mediante procesos biológicos degradan los residuos, emitiendo éste y otros gases, y liberando otras sustancias químicas. Los gases producidos por la fermentación anaerobia de la materia orgánica de los residuos constituyen un problema difícil de resolver. Dependiendo de la cantidad de residuos que consideremos, la producción de gases puede ser importante y también larga.

Para sacar un mayor provecho se están construyendo plantas de biogás con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y su vez se genera energía eléctrica de manera limpia sin contaminar el medio ambiente.

Se sabe que el hombre conoce desde muy antiguo la existencia del biogás, pues este se produce en forma natural en los pantanos, de allí que se lo llama gas de los pantanos.

En 1808 Humphry Davy produce gas metano (principal componente del biogás) en un laboratorio. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás.

La India experimenta desde 1939 con diversos sistemas para aplicar en climas fríos o cálidos.

La creación y utilización del biogás de manera artificial se remonta a la segunda guerra árabe-israelí, a mediados de los años setenta del siglo XX, cuando el precio del petróleo subió al ser utilizado como arma política.

La preocupación por el control del gas que se genera en la acumulación de basuras surgió de la aparición en las décadas de los 60 y 70 de nuevas técnicas de disposición desarrolladas en el mundo industrializado para mitigar los impactos ambientales de la disposición de la basura.

En EUA existen cerca de 350 plantas y en Inglaterra se encuentran operando poco más de 200.

En Europa, existen más de 500 instalaciones productoras de este gas biológico, Holanda y Dinamarca son los países que marcan la pauta.

En México a partir del año 2000 se inició una acción concertada con la Sener (Secretaría de energía) para impulsar el desarrollo de esta tecnología y difundir su aplicación en todo el país, al tiempo que se identifican las barreras que típicamente impiden este desarrollo y se proponen estrategias para removerlas.

El proyecto Monterrey. Nació como un proyecto demostrativo promovido por la Sedesol (Subsecretaría de desarrollo social) para la captura y destrucción de las emisiones de metano del relleno sanitario de Salinas Victoria, Nuevo León, donde se deposita la basura de los municipios conurbados. Es el primer proyecto de generación de electricidad con biogás de un relleno sanitario en México, tiene una capacidad nominal de 8 MW (Megawatts) y fue inaugurado el 22 de septiembre de 2003.

### **1.3 Objetivos de la tesis.**

- Hablar acerca de los tipos de energías renovables y su futuro tanto a nivel mundial como en México.
- Hablar acerca de las experiencias de este tipo de energía alrededor del mundo y en México.
- Dar un panorama general de los rellenos sanitarios.
- Conocer como se produce el Biogás en los rellenos sanitarios así como la problemática que producen los desechos sólidos por medio de la descomposición anaerobia.
- Describir los procesos de la producción de Biogás y todo lo relacionado a éste.
- Identificar las diferentes unidades generadoras utilizadas en la generación eléctrica por medio de biogás.
- Realizar un estudio de la producción de biogás del relleno sanitario de Morelia Michoacán en la actualidad.
- Dar a conocer este tipo de energía renovable ya que no está muy difundida, hablar sobre los beneficios tanto ecológicos como económicos.

### **1.4 Justificación.**

Existen muchas maneras de eliminar los residuos sólidos municipales, pero sólo unas pocas ayudan a tratarlos y disponerlos adecuadamente. Algunas de las formas para evitar los problemas

que ocasiona la basura son: no produciéndola, reciclándola en un 100% ó creando un mercado ficticio donde su valor sea igual o mayor al del producto que le dio origen; en cualquier caso, estas alternativas no son del todo prácticas. La basura también se puede incinerar, segregar, reciclar parcialmente o disponer en rellenos sanitarios. De cualquier manera, la basura siempre ha existido y seguramente seguirá existiendo. Los rellenos sanitarios son en la actualidad la forma más utilizada para disponer la basura en nuestro país. Cuando ésto no se hace, la basura termina tirada en las calles, los bosques, o a la orilla de las carreteras, con los consecuentes impactos ambientales. Actualmente existen millones de toneladas de basura confinadas bajo el subsuelo nacional que, en menor o mayor grado, están emitiendo gases a la atmósfera y líquidos al subsuelo, y en algunos casos representan un riesgo potencial de incendio o explosión. La posibilidad técnica de convertir estos gases (conocidos genéricamente como biogás) en electricidad está plenamente probada; la tecnología para ello existe comercialmente, pero la práctica de aplicarla en un determinado entorno socio-político-económico, no está difundida en nuestro país. Pero es de esperarse que otras barreras, tales como la falta de información sobre la viabilidad técnica del proceso y sus características operativas. La oportunidad es propicia para atraer capitales frescos al sector eléctrico, desarrollar nuevas formas del negocio eléctrico, fomentar la creación de nuevas empresas y mitigar uno de los problemas ambientales más serios que ensucian el rostro del país: la basura. Es debido a todo esto que se escogió este tema para difundir esta tecnología y resolver los problemas antes mencionados.

## **1.5 Metodología.**

La metodología que se utiliza en el desarrollo de este proyecto es el método deductivo, partiendo de lo general a lo particular.

La recopilación de información es la investigación de diferentes libros y artículos científicos de todos los lugares donde sea útil la información, la tesis se divide en 4 capítulos que van desarrollando, definiciones, descripciones, técnicas y todo lo relacionado al tema. Se desarrolló un estudio sobre el relleno sanitario de Morelia Michoacán, sobre su construcción y su posible generación eléctrica. Para poder llegar así a la conclusión.

## **1.6 Descripción de los capítulos.**

En el capítulo 1, se da una breve introducción a este trabajo. Se mencionan algunos de los tantos beneficios que tiene esta energía renovable, los antecedentes en el mundo y en nuestro país, el objetivo que tiene la tesis y porque es importante tanto ecológica, como económicamente.

En el capítulo 2, se comenta la situación ecológica del mundo, cuales son las energías más utilizadas a nivel mundial, en México y el futuro de su utilización, se menciona los tipos de energías renovables que existen, su utilización actual y futura. También se habla sobre la basura generada a nivel mundial y en México. Se da un panorama general sobre los rellenos sanitarios: construcción, control y cierre.

En el capítulo 3, este capítulo está completamente enfocado al biogás, cómo es que se genera en un relleno sanitario las condiciones o fases que lo producen, sus propiedades y como puede ser utilizado debido a su potencial energético. También se habla de los rendimientos teóricos del biogás a partir de los rellenos sanitarios.

En el capítulo 4, se trata las características del equipo desde la captación el biogás hasta su utilización en los generadores eléctricos, estimación de la producción de biogás en el relleno sanitario de Morelia Michoacán.

Al final se presenta las conclusiones de la tesis y los trabajos futuros.

# **Capítulo 2 Tipos de Rellenos Sanitarios.**

## **2.1 Introducción.**

En el mundo como en México estamos teniendo un problema serio con la contaminación. Una de las fuentes principales de la contaminación es la basura generada día con día. La mejor solución no es dejar de generar basura, sino qué hacer con ella, sabemos que basura es algo que ya no sirve, estorba y contamina. La solución a este problema es depositarla en rellenos sanitarios. Pero se debe tener conocimientos en todo lo que respecta a un relleno sanitario ya que no solo se puede botar la basura en un lugar, hay que llevar una serie de pasos, desde cómo construir un relleno sanitario, cómo llevarlo en operación para que no cause daño a las personas y al medio ambiente.

## **2.2 El medio ambiente en el mundo.**

En la actualidad la contaminación y la destrucción de los recursos naturales han suscitado una creciente preocupación en la sociedad, y su debate alcanza todos los sectores de la comunidad. Ello ha obedecido, fundamentalmente, a la paulatina toma de conciencia acerca de los peligros que la degradación del ambiente entraña para el presente y el futuro de la humanidad, ya que en definitiva, lo que está en juego es la propia supervivencia de la especie humana.

La degradación ambiental por la emisión de CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono) a la atmósfera, se ha demostrado que sus moléculas generan el efecto invernadero al atrapar calor en la atmósfera, causando el recalentamiento de la tierra. Resultados de modelos numéricos indican que el incremento de CO<sub>2</sub> podría ocasionar condiciones atmosféricas extremas, destrozos en la agricultura y el comercio, inundaciones de los terrenos más bajos y áreas costeras, así como de propagación de enfermedades.

Los límites de los recursos naturales (petróleo, madera, minerales, biodiversidad, etc.) indican que el modo actual de vida es insostenible. El consumo en constante expansión somete a tensión al medio ambiente, con emisiones que contaminan la tierra y destruyen los ecosistemas. Se produce un agotamiento y la degradación en aumento de los recursos, la quema de combustibles fósiles se ha casi quintuplicado desde 1950; el consumo de agua dulce se ha casi duplicado desde 1960; la captura marina se ha cuadruplicado; el consumo de madera es ahora 40% superior a lo que era hace 25 años. Entre 1960 y 1998 mientras la población mundial se ha

duplicado, las emisiones de CO<sub>2</sub> por tres, el consumo de fertilizantes por cinco y la producción de energía por seis. Además, este nivel de consumo no repercute sólo en la naturaleza, sino también en la mayor parte de las personas de este planeta, puesto que sufren directamente los efectos de este irracional modelo de vida.

### **2.2.1 Protocolo Kioto.**

El Protocolo de Kioto es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases que causan el calentamiento global: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (Metano) y N<sub>2</sub>O (Dióxido de Nitrógeno), además de tres gases industriales fluorados.

El MDL (Mecanismo de desarrollo limpio) es un acuerdo suscrito en el Protocolo de Kioto que permite a los gobiernos de los países industrializados invertir en proyectos de reducción de emisiones en países en vías de desarrollo.

El MDL permite también la posibilidad de transferir tecnologías limpias a los países en desarrollo.

### **2.2.2 Bonos verdes.**

Los "bonos verdes" o bonos de carbono son un mecanismo desarrollado para reducir la emisión de GEI (Gases de Efecto Invernadero) mediante el cual, en un esquema de mercado, empresas de países industrializados pagan a otras en su mayoría son naciones en desarrollo, por su reducción en las emisiones de GEI por lo cual se expiden certificados. Estos certificados se conocen como CER (Certificados de Emisiones Reducidas). Por lo que referirse a Bonos de Verdes es equivalente a hablar de CER. Un CER equivale a una tonelada de CO<sub>2</sub> que se deja de emitir a la atmósfera.

Mediante el mercado de los bonos de carbono, con la firma del protocolo Kioto, los países industrializados se comprometieron a reducir sus emisiones a los niveles que se tenían en 1990, al menos del 5 u 8 por ciento en un periodo comprendido entre 2008 y 2012.

Muchos gobiernos al no querer reducir las emisiones directamente en su país por la afectación de su producción industrial, han decidido invertir en empresas que se dedican a la venta de bonos de carbono, para así alcanzar su compromiso ambiental de desarrollo limpio, el pago se realiza por tonelada de CO<sub>2</sub> que se dejó de emitir al medio ambiente por acciones como la quema de biogás, el mantenimiento de bosques (captura y secuestro de CO<sub>2</sub>) actividades de reforestación entre otras.

Para iniciar un proyecto de este tipo; el productor deberá firmar una carta de intercesión, para que posteriormente se haga una evaluación técnica del sitio, si se confirma que sí es económicamente rentable el proyecto, se prepara una serie de documentos sobre el diseño que se solicita, a la Organización de las Naciones Unidas.

Una vez que el diseño es avalado por las instancias correspondientes se otorga el sello de registro, y se da inicio a la construcción del proyecto. Cuando se empieza a producir biogás, una empresa certificada ante la organización de las Naciones Unidas verifica cada año que el volumen que indica el medidor sea el correcto.

Los bonos de carbono ya se encuentran en las bolsas de valores de varios países y su precio está sujeto a diferentes factores. El precio se cotiza en 14 dólares por tonelada a la venta, el precio se cotizó en septiembre del 2011.

Si se tiene en cuenta que una tonelada de metano, al ser quemado, genera 2.7 toneladas de CO<sub>2</sub>, el beneficio neto (de la quema de una tonelada) resulta igual a una reducción de emisiones y del potencial de calentamiento global equivalente a 18.3 toneladas de dióxido de carbono.

El volumen específico del CO<sub>2</sub>, a una temperatura de 21°C (Grados Centígrados) y 1 atm (atmósfera) es de 0.547m<sup>3</sup>/kg (Metro Cúbico por kilogramo). Por lo tanto, una tonelada (1000 kg) de CO<sub>2</sub>, en esas condiciones ocuparía 547 m<sup>3</sup>.

El volumen específico del CH<sub>4</sub> a una temperatura de 21°C y 1 atm es de 0.554 Kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, una tonelada de CH<sub>4</sub> en esas condiciones ocuparía 554 m<sup>3</sup>.

### **2.2.3 Evaluación de las Emisiones Invernadero.**

El GWP (Global warming potential o Potencial de calentamiento global) es una medida relativa del efecto radioactivo de los gases de efecto invernadero comparado al CO<sub>2</sub>. En otras palabras, el GWP indica cuantas toneladas de CO<sub>2</sub> es equivalente a 1 ton de emisión de cada gas (EPA 2012). De esta forma el GWP del CO<sub>2</sub> es 1 y el GWP del metano es 21, la emisión de metano tendrá efecto de calentamiento 21 veces mayor que la del CO<sub>2</sub>.

## **2.3 Generación eléctrica.**

Desde que Nikola Tesla descubrió la corriente alterna y la forma de producirla en los alternadores, se ha llevado a cabo una inmensa actividad tecnológica para llevar la electricidad a

todos los lugares habitados del mundo, por lo que, junto a la construcción de grandes y variadas centrales eléctricas, se han construido sofisticadas redes de transmisión y distribución. Sin embargo, el aprovechamiento ha sido y sigue siendo muy desigual en todo el planeta. La generación, en términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía no eléctrica, sea ésta química, mecánica, térmica o luminosa.

Dependiendo de la fuente primaria de energía utilizada, las centrales generadoras de energía eléctrica se clasifican en termoeléctricas, hidroeléctricas, nucleares, eólicas, solares, geotérmicas, biomasa y mareomotrices.

### 2.3.1 El consumo mundial de energía eléctrica.

Durante los años recientes, las regiones que han alcanzado los mayores niveles de estabilidad y madurez en sus mercados, se han caracterizado por registrar incrementos moderados y bajos en el consumo de energía eléctrica. Es el caso de los países miembros de la OCDE (Organización para la cooperación y desarrollo económicos) de Norteamérica, Europa Occidental, Asia y Oceanía, que durante los últimos 10 años registraron tasas de 1.3%, 1.5% y 2.1%, en aumento. Durante los últimos 10 años, el mayor crecimiento en el consumo de energía eléctrica se ha presentado en países de Asia y Medio Oriente no OCDE, con tasas de 8.8% y 5.8%, respectivamente. Este comportamiento, así como la participación de cada región en el consumo mundial, se puede observar en la Figura 2-1.

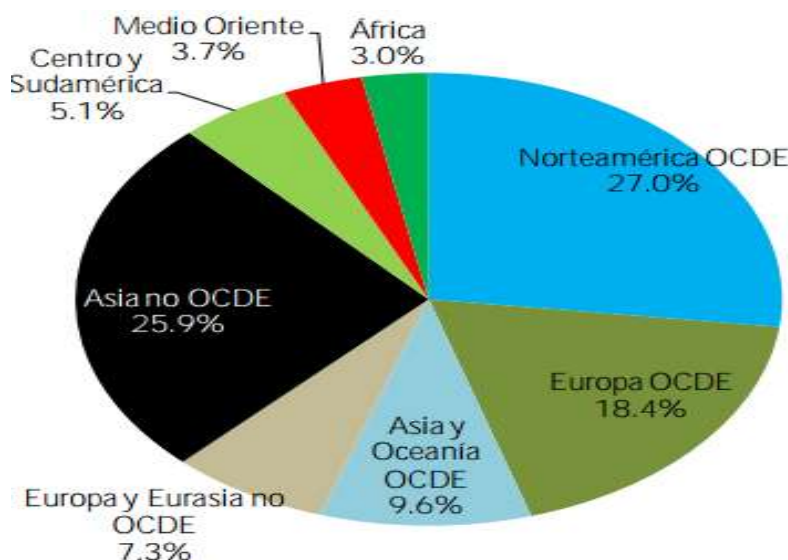


Figura 2-1 Consumo mundial de energía eléctrica 16,816 TWH (Tera watts hora).

### 2.3.2 Consumo de combustibles y fuentes primarias para la generación mundial de energía eléctrica.

El carbón es el combustible de mayor utilización para la generación de electricidad en el mundo. Desde hace décadas, su amplia disponibilidad, estabilidad en sus precios, así como su alto poder calorífico, entre otros factores. No obstante, en 2008 se registraron precios sensiblemente superiores respecto a otros años, con incrementos de 70 a 130% respecto a las cotizaciones de 2007 en mercados europeos y asiáticos, lo cual, aunado a las políticas de mitigación de emisiones de (GEI) en muchos países, ha incrementado la competitividad de otros combustibles como el gas natural e incluso la energía nuclear. A pesar de ello, en países como China, EUA, India, Sudáfrica y Australia, más de 50% de la energía térmica utilizada para generación de electricidad proviene del carbón. En la Figura 2-2 se puede apreciar el despegue que la utilización de dicho combustible ha mantenido respecto a otras fuentes de energía durante casi tres décadas, registrando un crecimiento promedio anual de 3.5%. En el caso de la energía nuclear, su mayor dinamismo se observó desde principios de la década de 1980 y en años recientes se ha iniciado la construcción de varios reactores, sobre todo en el sudeste asiático. El gas natural, ha mostrado un crecimiento importante desde principios de la década de 1990, con una pendiente más pronunciada a partir de 1993. Otros recursos, como la hidroelectricidad, representan la principal fuente primaria en países como Canadá, Brasil, Noruega e Islandia

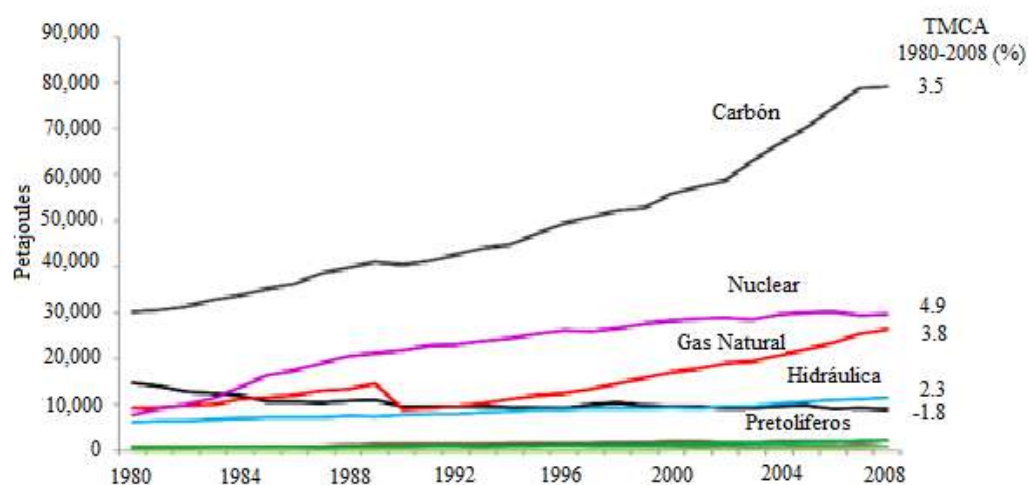


Figura 2-2 Consumo mundial de combustibles y utilización de fuentes primarias para la generación de electricidad 1980-2008 PJ (Petajoules).

### **2.3.3 Tendencia mundial en la utilización de combustibles y otras fuentes primarias para generación de electricidad.**

En el entorno internacional, el uso de la energía primaria y secundaria para generación de electricidad depende de diferentes factores que varían de una región a otra, así como de la disponibilidad de recursos económicamente competitivos. Adicionalmente, la utilización de dichas fuentes depende de las restricciones imperantes por la volatilidad en los precios de los energéticos, la disponibilidad de los combustibles, el impacto social, así como por la normatividad ambiental. Las estimaciones indican que durante los próximos años, los combustibles de mayor utilización para generación de electricidad en el mundo serán el carbón y el gas natural, en detrimento de la utilización de combustibles derivados del petróleo, como es el caso del combustóleo. Esto obedece a la volatilidad en los precios del combustible y a la disponibilidad de tecnologías de mayor eficiencia y con un impacto ambiental sensiblemente menor que las plantas convencionales que utilizan derivados del petróleo. Se estima que durante el periodo 2007- 2025, la fuente primaria de mayor crecimiento en la generación eléctrica serán las energías renovables Figura 2-3, que pasarán de 18.4% a 23.4%, lo cual complementará la participación mayoritaria del carbón que se mantendrá en 39.6% y al gas natural con 20.4% hacia ese último año.

Hacia el final del periodo, se estima que la energía nuclear se mantendrá prácticamente en el mismo nivel de participación, aunque los eventos de Fukushima Japón, generaron interrogantes sobre su uso en la generación de electricidad, la política de países como China, India, Rusia y Corea no ha cambiado, sigue considerando su expansión. Es importante destacar que la seguridad física de todas las plantas nucleares a nivel mundial ha sido sometida a fuerte crítica, se han tomado acciones para reforzar la seguridad de las plantas nucleoelectricas. Mientras que la participación de los derivados del petróleo se reducirá de 5% a 2.8% de la generación mundial de electricidad. Hacia 2025 y sólo después del carbón, las energías renovables (incluyendo las grandes hidroeléctricas a desarrollarse en Asia y Sudamérica) tendrán la mayor participación en la generación mundial de energía eléctrica, seguidas por el gas natural.

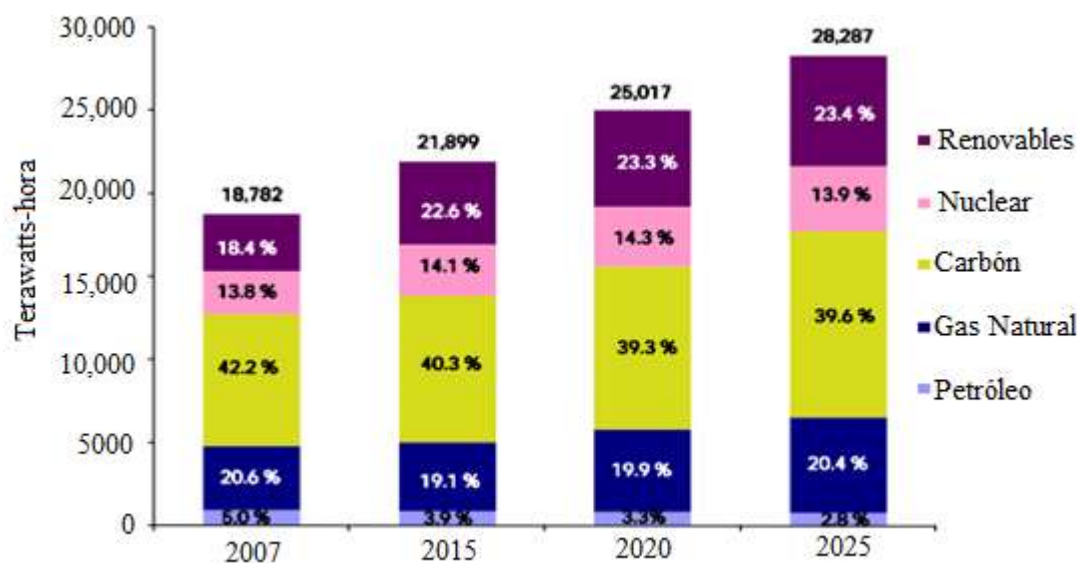


Figura 2-3 Combustibles y otras fuentes para la generación eléctrica mundial 2007-2025.

### 2.3.4 Generación de energía eléctrica en México.

Hasta Agosto de 2010 la capacidad total instalada para la generación de energía eléctrica en México es de 60,795 MW. La mayor parte es aportada por plantas termoeléctricas con un total de 43,231 MW ó 71% del total. Según la definición de fuentes de energías renovables del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, lo cual no contempla plantas hidroeléctricas con una capacidad mayor a 30 MW, se cuenta con una capacidad instalada a partir de dichas fuentes de 2,365 MW ó 4%. Con base en las metas del programa antes mencionado, aún será necesaria una capacidad adicional de fuentes renovables de 3.6% del total hasta 2012.

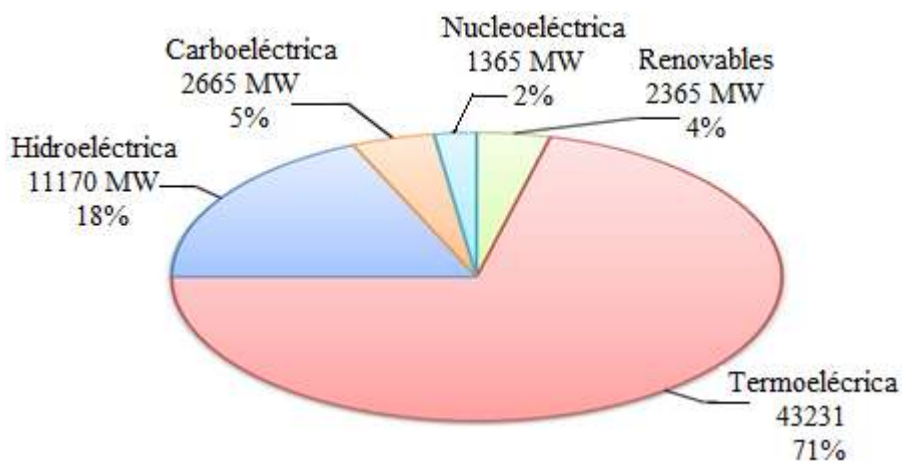


Figura 2-4 Generación de energía eléctrica en México.

Tabla 2-1 Costos de la generación de electricidad en los Países de la OECD proyectado de 2005-2030.

| Tecnología basada sobre:   | Costos de inversión (Dólares por kw)2005 | Costos de inversión (Dólares por kw)2030 | Costos de generación de electricidad típica2005(Dólares por kw) | Costos de generación de electricidad típica 2030(Dólares por kw) |
|----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Hidroeléctrica grande      | 1500-5500                                | 1500-5500                                | 30-120                                                          | 30-115                                                           |
| Hidroeléctrica chica <10MW | 1800-6800                                | 1000-3000                                | 60-150                                                          | 50                                                               |
| Aire de entrada            | 900-1100                                 | 800-900                                  | 30-80                                                           | 30-70                                                            |
| Aire de salida             | 1500-2500                                | 1500-1900                                | 70-220                                                          | 60-180                                                           |
| Geotérmica                 | 1700-5700                                | 1000-2000                                | 30-90                                                           | 30-80                                                            |
| Solar                      | 2000-2300                                | 1700-1900                                | 105-230                                                         | 90-190                                                           |
| Biomasa                    | 1000-2500                                | 400-1200                                 | 30-100                                                          | 30-100                                                           |
| Mareomotriz                |                                          |                                          | 55-160                                                          |                                                                  |
| Carbón                     | 1000-1200                                | 1000-1250                                | 20-60                                                           | 35-40                                                            |
| Gas natural                | 450-600                                  | 400-500                                  | 40-60                                                           | 35-45                                                            |
| Nuclear                    | 2000-2500                                | 1500-3000                                | 25-75                                                           | 47-62                                                            |

## 2.4 Energías renovables y no renovables.

Una fuente de energía es renovable cuando se convierte en inagotable, aunque sea intermitente, y su aprovechamiento no causa alteraciones graves al medio ambiente. Las fuentes de energía renovable son la radiación solar, el viento, el movimiento de las olas y las mareas, el desnivel del agua de los ríos, el calor de subsuelo terrestre y la energía acumulada por los seres vivos (biomasa).

La energía no renovable son aquellas fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en una cantidad limitada y que, una vez consumidas en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o extracción viable.

Fuentes de energía no renovables son: Las termoeléctricas, las de combustibles fósiles y nucleares.

## 2.5 Energías renovables.

Una energía renovable, o más precisamente una fuente de energía renovable es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación. El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. El concepto de "crisis energética" aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan, exige también una demanda igualmente creciente de energía. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, es inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser abastecida y todo el sistema colapse, salvo que se descubran y desarrollen otros nuevos métodos para obtener dicha energía. Estas son las energías alternativas.

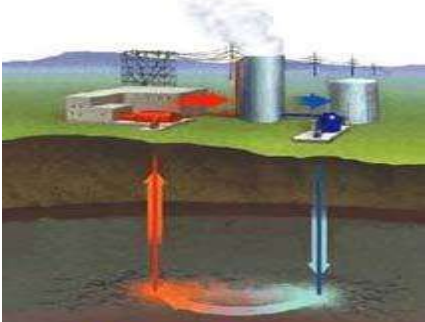
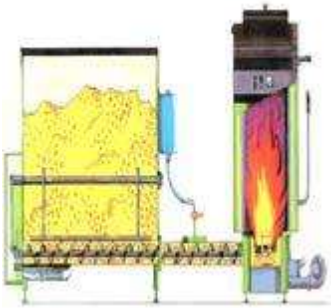
En la actualidad se siguen buscando soluciones para resolver esta crisis inminente. Las energías renovables en las que se trabaja actualmente son:

- Energía eólica.
- Energía hidroeléctrica.
- Energía mareomotriz.
- Energía solar.
- Energía geotérmica.
- Biomasa.

Las cuales se enlistan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Energías renovables.

|                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Energía Eólica</b><br> | Es la energía obtenida del viento, o sea la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en energía eléctrica.                                                                                                                                             |
| <b>Energía Hidroeléctrica</b>                                                                                | Se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura. La energía potencial, durante la caída, se convierte en cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que finalmente se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores. |

|                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <p><b>Energía mareomotriz</b></p>   | <p>Esta se obtiene de las mareas y a través de la energía de las olas.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p><b>Energía solar</b></p>         | <p>Recolectada de forma directa en forma de calor a alta temperatura en centrales solares o a baja temperatura mediante paneles térmicos domésticos, o bien en forma de electricidad mediante el efecto fotoeléctrico mediante paneles foto voltaicos.</p>                                                                                                                                            |
| <p><b>Energía geotérmica</b></p>  | <p>Es la energía en forma de calor que se produce en el centro de la tierra, liberándose en erupciones volcánicas. El calor del magma terrestre actúa sobre los mantos acuíferos subterráneos, por lo que al elevarse la temperatura del agua se eleva su presión tendiendo a escapar hacia la superficie. los géiseres pueden aprovechar el vapor que mueve turbinas y generar así electricidad.</p> |
| <p><b>La biomasa</b></p>          | <p>Es la energía acumulada en la madera, carbón de leña, bagazo de caña, basura y desechos urbanos de tipo orgánico que al quemarse producen energía calorífica que eventualmente se puede transformar también en energía eléctrica. Por descomposición de residuos orgánicos o bien por su quema directas como combustible.</p>                                                                      |

Dado el elevado costo de la energía renovable, su inserción en el mercado es lenta. Día a día, sin embargo, a medida que el costo de la energía convencional incrementa y los yacimientos

se agotan, las energías renovables son la mejor opción. Las ventajas en el uso de este tipo de recursos es sustancial:

- Mínimo impacto sobre el medio ambiente.
- No generan residuos difíciles de tratar, ni gases contaminantes como lo hacen los combustibles fósiles.

## **2.5.1 Capacidad total instalada de energías renovables a nivel mundial.**

### **Eólico.**

La energía eólica se ha desarrollado a pasos acelerados en el mundo durante los últimos años. En el año 2008, la capacidad instalada mundial llegó a los 120,800 MW.

### **Fotovoltaicos.**

En el Mundo existe una capacidad instalada fotovoltaica de 21 GW (Gigawatt) en conexión con la red eléctrica y entre 3 y 4 GW fuera de red. Además es la tecnología de generación eléctrica, que más rápido crece en el mundo. La capacidad de concentración solar, por su lado, alcanza los 662 MW de capacidad.

### **Minihidráulica.**

Existe en el Mundo una capacidad hidroeléctrica instalada de 860 GW.

### **Biomasa.**

Las tecnologías modernas de energía de la biomasa satisfacen el 4% de la demanda primaria de energía mundial, en forma de calor, electricidad y combustibles líquidos principalmente en países desarrollados.

### **Geotérmica.**

La capacidad de generación de electricidad a partir de recursos geotérmicos en el Mundo es de poco más de 10 GW.

## **2.5.2 Capacidad total instalada por energías renovables en México.**

En la Figura 2-5 se puede observar la distribución y capacidad instalada, de las energías renovables en México.

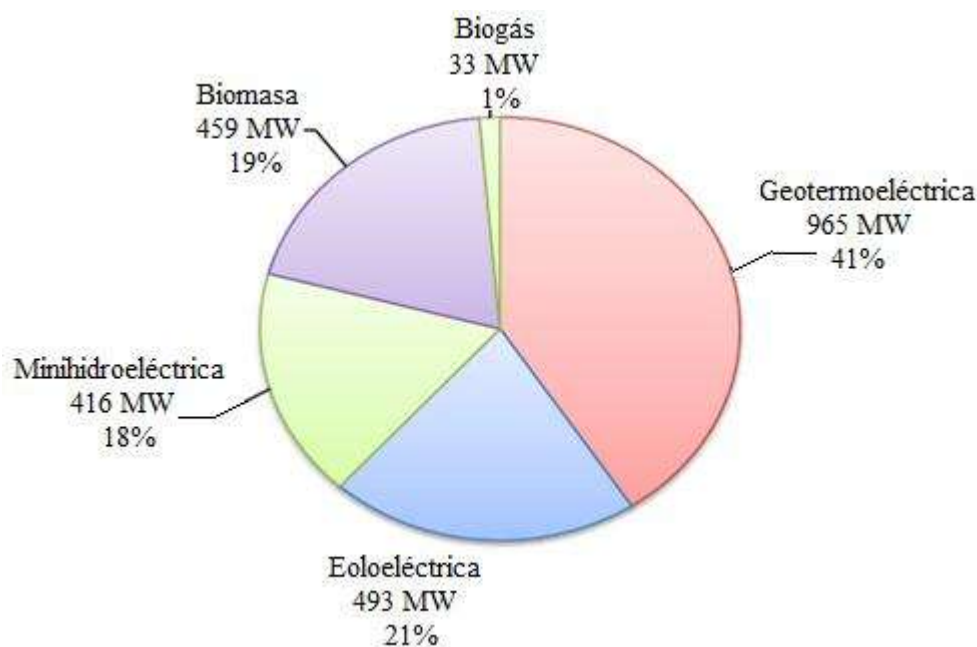


Figura 2-5 Capacidad instalada por fuentes de energía renovables 2.365 MW.

### **Eólico.**

En Mayo 2010 existen en México 492.3 MW de capacidad eólica en operación, que se dividen en:

Capacidad instalada en el Servicio Público. (CFE):

- 1.6 MW en el proyecto La Venta I.
- 83.3 MW en el proyecto La Venta II.

Capacidad instalada por el sector privado. (Permisarios; >500KW)

- 79.9 MW del proyecto Parques Ecológicos de México en Oaxaca desde el 31 de Enero 2009.
- 250 MW del proyecto EURUS en Oaxaca desde el 30 de Junio 2009.
- 10 MW del Municipio de Mexicali en Baja California desde 29 de Octubre de 2009.
- 67.5 MW de Eléctrica del Valle de México desde 01 de Abril 2010 en Oaxaca.

### **Fotovoltaicos.**

En 2009 se instaló en México una capacidad de 5.712 MW de sistemas fotovoltaicos. Eso se divide en 4.954 MW por sistemas en conexión con la red y 0.758 MW en zonas aisladas del país donde no hay conexión con la red. En total se acumuló hasta 2009 una capacidad instalada de 25.12 MW. En la actualidad se han desarrollado diversas instalaciones de paneles fotovoltaicos conectados a la red y año con año crecen en capacidad y generación. Podemos

destacar el Parque Solar Fotovoltaico “Bicentenario” que se instaló este 2010 en el Estado de Aguascalientes con una capacidad de 1 MW. Los sistemas cuentan con horas promedio de insolación de 5.2 h/día y un factor de planta de 25 %.

### **Minihidráulica.**

En México a su vez existen en 2009, 11 GW de capacidad hidroeléctrica instalada en el servicio público, tomando en cuenta grandes centrales con una capacidad mayor a 30 MW. En el panorama nacional de la minihidráulica se puede dividir en centrales públicas y privadas que se encuentran en operación y/o las que por alguna causa, están fuera de servicio. Actualmente se cuenta con 25 centrales privadas, 14 en operación, 1 inactivas y 10 en construcción, con permisos otorgados por la Comisión Reguladora de Energía con una capacidad instalada en operación de 122.4 MW, así como 49 centrales públicas en operación de la Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza con una capacidad de 293.5 MW. De estas últimas, sólo dos han sido construidas después de 1967: la central “Colina”, ubicada en San Francisco Conchos, Chihuahua, con una capacidad instalada de 3 MW y la central “Ixtaczoquitlán”, ubicada en Ixtaczoquitlán, Veracruz, con una capacidad instalada de 1.6 MW.

### **Biomasa.**

En México el bagazo de caña es, después de la leña, la principal fuente de bioenergía, que se utiliza en ingenios azucareros para la producción de calor y de electricidad para consumo del propio ingenio. Se estima que se aprovechan 98 PJ de bagazo al año, equivalentes al 1.33% de la oferta interna bruta de energía. Las tecnologías tradicionales de biomasa, por su parte, satisfacen el 6% de la demanda primaria de energía en el Mundo. En México, el uso tradicional de la leña aporta el 3% de oferta interna y el 28% de la energía consumida por el sector residencial en México. Se estima que este combustible es usado por alrededor de una cuarta parte de la población, por medio de fogones tradicionales.

### **Geotérmica.**

Nuestro país cuenta con aproximadamente la décima parte de esta capacidad a nivel mundial, 960 MW y ocupa el tercer lugar mundial. Se contempla la instalación de 161 MW adicionales de capacidad geotermoeléctrica correspondiente a las centrales Cerro Prieto V y Humeros Fases A y B hasta principios del año 2013 no se ha llevado a cabo.

Por lo que se refiere a las aplicaciones térmicas, actualmente se concentran mayormente en balnearios de aguas termales, aunque se reportan casos aislados de calefacción de edificios, secado de madera, invernaderos y cultivo de hongos.

### **2.5.3 El potencial en México por energías renovables.**

#### **Eólico.**

El potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva. Se han realizado, sin embargo, evaluaciones del recurso en regiones específicas. En particular el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos ha coordinado la realización de mapas eólicos para Oaxaca, Baja California Sur, las costas de Yucatán y de Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua. Estos mapas se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota.

#### **Radiación solar para generación de energía eléctrica.**

La irradiación solar global en México es en promedio de 5 kWh/día/m<sup>2</sup> ( Kilowatts hora por día por metro cuadrado), pero en algunas regiones del país se llega a valores de 6 kWh/día/m<sup>2</sup>. Suponiendo una eficiencia del 15%, bastaría un cuadrado de 25 km de lado en el desierto de Sonora o Chihuahua para generar toda la energía eléctrica que requiere hoy en día el país. Por ello, el potencial técnico se puede considerar prácticamente infinito.

#### **Minihidráulica.**

Existe un potencial importante en centrales de menor tamaño, pero, con la excepción de un estudio realizado en una región de los estados de Puebla y Veracruz, este potencial no se ha evaluado. De manera muy preliminar se ha estimado que el potencial nacional para pequeñas hidroeléctricas es de alrededor de 3 GW.

#### **Biomasa.**

El potencial de la bioenergía en México va mucho más allá del limitado aprovechamiento que se hace de ella en la actualidad. Se calcula que el potencial total es de entre 3,000 y 4,500 PJ/año (Petajoule por Año).

#### **Geotérmico.**

Debido al alto costo de la exploración geotérmica, no se ha realizado una evaluación minuciosa del potencial geotérmico en nuestro país. Se han hecho, sin embargo, algunas estimaciones. Por lo que se refiere a las reservas de alta temperatura (aptas para la generación de electricidad), se ha estimado un potencial de alrededor de 12 GW eléctricos.

#### **Energías Oceánicas.**

En México se tiene un importante potencial de energía en la región del alto Golfo de California (Mar de Cortés) en donde se podría tener en un área de embalse de 2590 Km<sup>2</sup>(Kilómetro Cuadrado), una potencia máxima instalada de 26 GW y una producción de

23,000 GWh/año (Gigawatt hora por Año) que representa aproximadamente la producción total de todas las centrales hidroeléctricas del país.

## **2.6 El potencial de energía eléctrica en rellenos sanitarios.**

Una disposición adecuada de todos los RSM (Residuos Sólidos Municipales) del país generaría entre 1.25 y 1.75 millones ton/año de CH<sub>4</sub> aprovechable y un potencial de generación eléctrica de 500 – 700 MW. 57% de los RSM se localizan en 7 Estados: DF, México, Puebla, Veracruz, Guanajuato, Nuevo León y Jalisco con generación de 0.75 – 1.00 millones de ton CH<sub>4</sub> por año y potencial de 300 – 400 MW (biogás).

## **2.7 La producción de basura a nivel mundial.**

La población mundial supera en la actualidad los 6000 millones de habitantes. La producción de residuos sólidos urbanos de cada uno de los habitantes de la tierra oscila ampliamente según el país, entre los valores de 0,4 y 1,2 kg/hab (Kilogramo por habitante) al día. La producción por continentes se muestra en la siguiente tabla Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Producción mundial de los residuos sólidos urbano.

| Continente          | Residuos (10 <sup>6</sup> t/año) |
|---------------------|----------------------------------|
| África              | 78                               |
| Asia                | 390                              |
| Europa              | 230                              |
| América             | 390                              |
| Australia y Oceanía | 14                               |
| Total               | 1.102                            |

### **2.7.1 La producción de basura en México.**

De acuerdo con cifras oficiales se generaron en nuestro país 103 mil toneladas de basura al día 58.1% rellenos sanitarios 9.4% en sitios controlados y el restante 32.5% a cielo abierto. En términos generales 1kg/hab por día.

### **2.7.2 Recolección de la basura.**

La etapa de recolección es la parte medular de un sistema de aseo urbano y tiene como objetivo principal preservar la salud pública mediante la recolección de los desechos en los centros de generación y transportarlos al sitio de tratamiento o disposición final o rellenos sanitarios en forma eficiente y al menor costo, ya que esta etapa es la que emplea un número considerable de recursos económicos. Con el fin de diseñar un sistema adecuado de recolección, los municipios deben contar con ciertos parámetros técnicos y demográficos como:

- Procedencia y volumen de los desechos sólidos
- Tipo de almacenamiento
- Frecuencia de recolección
- Método de recolección y tripulación
- Tipo de vehículos, etc.

Las siguientes estadísticas nos dan un panorama general de la situación actual de la recolección, entorno a algunos de estos factores, en ciudades medias de México.

- El 60.97% de los residuos sólidos generados proceden de fuentes domiciliarias y el restante 39.02% de las industrias, comercios y otras fuentes.
- Del volumen generado, se recolecta el 85% de los residuos.

## **2.8 Residuos Sólidos Urbanos.**

La generación de residuos urbanos tanto en cantidad como en calidad, depende del nivel de vida de la población, sus hábitos y nivel de consumo. Otro aspecto a considerar es que la composición de los residuos sólidos urbanos varía estacionalmente, es decir que ésta cambia dependiendo de la época del año, lo cual está ligado principalmente a la estacionalidad de los elementos que forman parte de la alimentación. En el verano aumentaría el consumo de frutas y verduras, y por lo tanto los restos orgánicos en los residuos sólidos, y en el invierno aumentaría el consumo de alimentos envasados, reduciéndose los restos orgánicos y aumentando los desechos de envases.

### **2.8.1 Composición de los residuos solidos urbanos en Mexico.**

En la Figura 2-6 podemos observar la composición de los residuos sólidos urbanos en México.

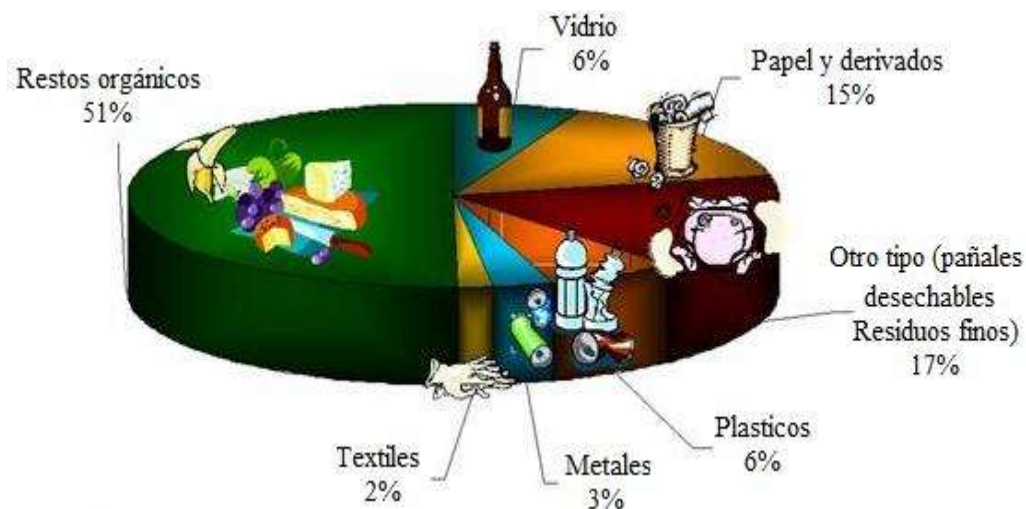


Figura 2-6 Composición de los residuos sólidos urbanos en México.

## 2.9 Relleno sanitario.

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha 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 por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

Se puede conceptuar un relleno sanitario como un reactor bioquímico con residuos y agua como entradas principales, y con gases de relleno y lixiviado como principales salidas.

### 2.9.1 Emisiones del relleno sanitario.

Los residuos sólidos urbanos depositados en un relleno sanitario presentan una serie de cambios físicos, químicos y biológicos de manera simultánea e interrelacionada, para evitar daños al medio ambiente es necesario predecir, controlar y tratar estas emisiones.

Los cambios físicos más importantes están asociados con la compactación de los residuos sólidos, la difusión de gases dentro y fuera del relleno sanitario, el ingreso de agua y el movimiento de líquidos en el interior y hacia el subsuelo y los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de la materia orgánica depositada.

Una vez que los residuos quedan compactados bajo capas de tierra, se va creando un ambiente libre de oxígeno que permite el desarrollo de diversos tipos de organismos anaerobios,

especialmente bacterias que biodegradan la materia orgánica contenida en los residuos sólidos. La descomposición progresiva de la materia orgánica implica la formación de compuestos intermedios (ácidos grasos volátiles y ácido sulfhídrico) que provocan los típicos malos olores de los residuos en descomposición.

## **2.9.2 Tipos de relleno sanitario en relación con la disposición final.**

### **Relleno sanitario mecanizado.**

El relleno sanitario mecanizado es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo, que va más allá de operar con equipo pesado. Esto último está relacionado con la cantidad y el tipo de residuos, la planificación, la selección del sitio, la extensión del terreno, el diseño y la ejecución del relleno, y la infraestructura requerida, tanto para recibir los residuos como para el control de las operaciones, el monto y manejo de las inversiones y los gastos de operación y mantenimiento. Para operar este tipo de relleno sanitario se requiere del uso de un compactador de residuos sólidos, así como equipo especializado para el movimiento de tierra: tractor de oruga, retroexcavadora, cargador, volquete, etc. en la Figura 2-7 se muestra el ejemplo.

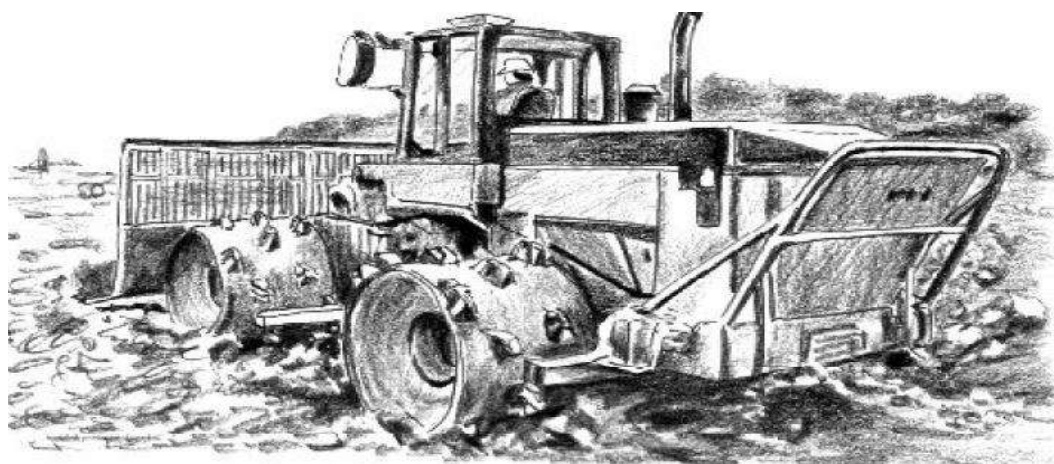


Figura 2-7 Relleno sanitario operado con equipo pesado.

### **Relleno sanitario semimecanizado.**

Cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos en el relleno sanitario, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, a fin de hacer una buena compactación de la basura, estabilizarlos terraplenes y dar mayor vida útil al relleno. En estos casos, el tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o

cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación puede ser un equipo apropiado para operar este relleno al que podríamos llamar semimecanizado. Se muestra en la Figura 2-8.



Figura 2-8 Tractor agrícola adaptado.

En México, después de 18 meses de estudios, pruebas y experimentos, la sedesol estableció: “Adaptando un tractor de 31 HP (Caballos de fuerza por hora), en 8 horas de trabajo y con un peón de ayuda, pueden confinar sanitariamente los residuos de poblaciones de hasta 80.000 habitantes, o sea, aproximadamente 40 t/d (Toneladas por día) de basura.

Con base en experiencias previas, se puede afirmar que es necesario el empleo de equipos de movimiento de tierras (tractores de orugas o retroexcavadoras) en forma permanente cuando al relleno sanitario se llevan más de 40 t/día de RSM. En la Región, esto equivale por lo general a poblaciones mayores de 40.000 habitantes.

Por su versatilidad, el tractor agrícola puede servir para prestar o apoyar el servicio de recolección de basura si de preferencia se le engancha un remolque con volteo hidráulico de unos 6 a 8 metros cúbicos de capacidad o bien una caja compactadora se muestra en Figura 2-9, dependiendo de las necesidades y recursos de la localidad. Ocasionalmente, este mismo equipo podrá emplearse en la realización de algunas obras públicas en el municipio, con lo que se aprovecharía al máximo la inversión realizada.

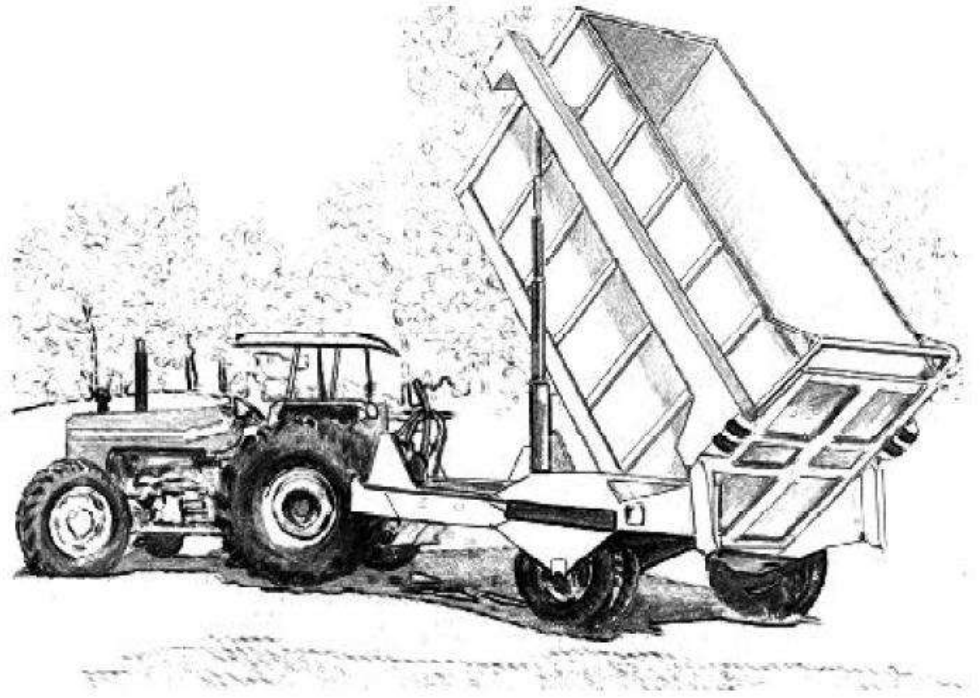


Figura 2-9 Tractor agrícola adaptado con volteo hidráulico.

### **Relleño sanitario manual.**

Es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen, menos de 15t/d, además de sus condiciones económicas, no están en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento.

El término manual se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutada con el apoyo de una cuadrilla de hombres y el empleo de algunas herramientas.

### **2.9.3 Métodos de construcción de un relleno sanitario.**

El método constructivo y la subsecuente operación de un relleno sanitario están determinados principalmente por la topografía del terreno, aunque dependen también del tipo de suelo y de la profundidad del nivel freático. Existen dos maneras básicas de construir un relleno sanitario.

#### **Método de trinchera o zanja.**

Este método se utiliza en regiones planas. Los desperdicios se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada.

Se debe tener especial cuidado en periodos de lluvias dado que las aguas pueden inundar las zanjás. De ahí que se deba construir canales perimétricos para captarlas y desviarlas e incluso proveer a las zanjás de drenajes internos. En casos extremos, se puede construir un techo sobre ellas o bien bombear el agua acumulada. Sus paredes deben estar cortados de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado.

La excavación de zanjás 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 no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación. Este método se muestra en la Figura 2-10.

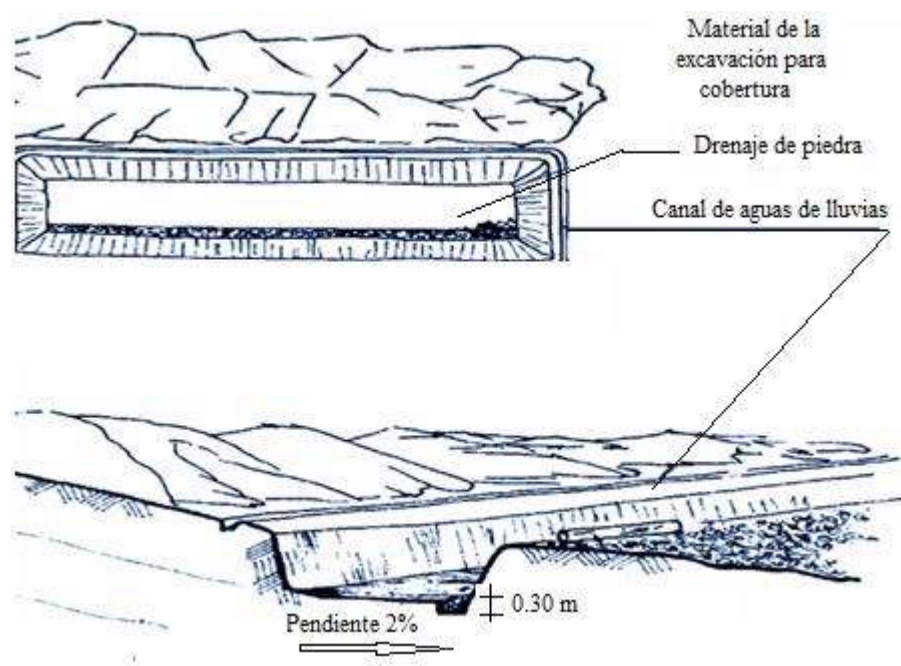


Figura 2-10 Método de trinchera para construir un relleno sanitario.

### **Método de área.**

En áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar la basura, esta puede depositarse directamente sobre el suelo original, el que debe elevarse algunos metros, previa impermeabilización del terreno. En estos casos, el material de cobertura deberá ser transportado desde otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial.

Las fosas se construyen con una pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno. Este método se muestra en la Figura 2-11.

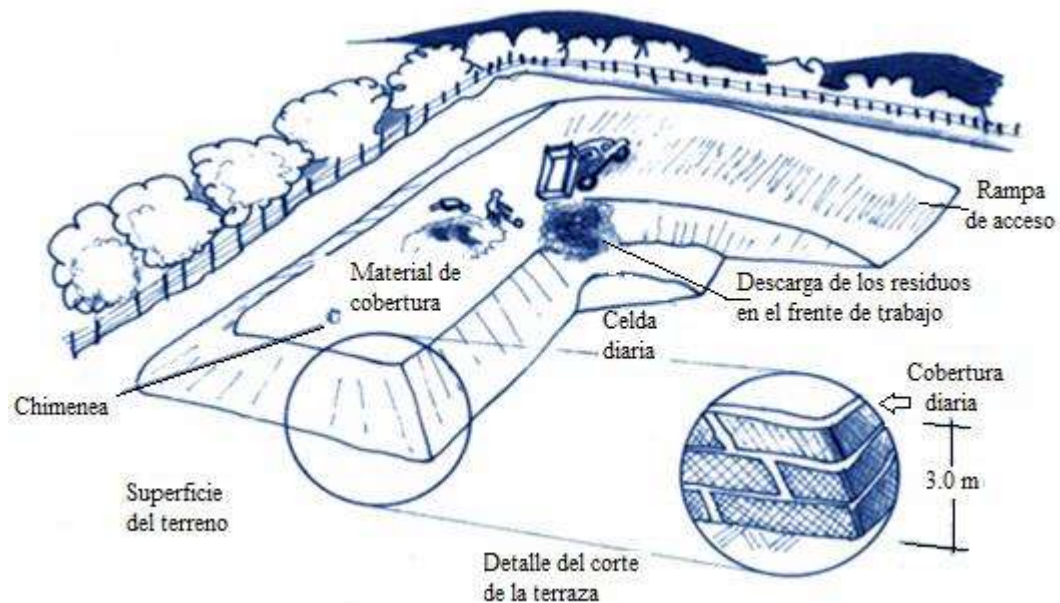


Figura 2-11 Método de área para construir un relleno sanitario.

### **Método de área para rellenar depresiones.**

El método de área sirve también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno o, en su defecto, de un lugar cercano para evitar los costos de acarreo. 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 descarga en la base del talud, se extiende y apisona contra él y se recubre diariamente con una capa de tierra. Se continúa la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave de unos 18.4 a 26.5 grados en el talud; es decir, la relación vertical/horizontal de 1:3 a 1:2, respectivamente, y de 1 a 2 grados en la superficie, o sea, de 2 a 3.5%. Este método se muestra en la Figura 2-12.

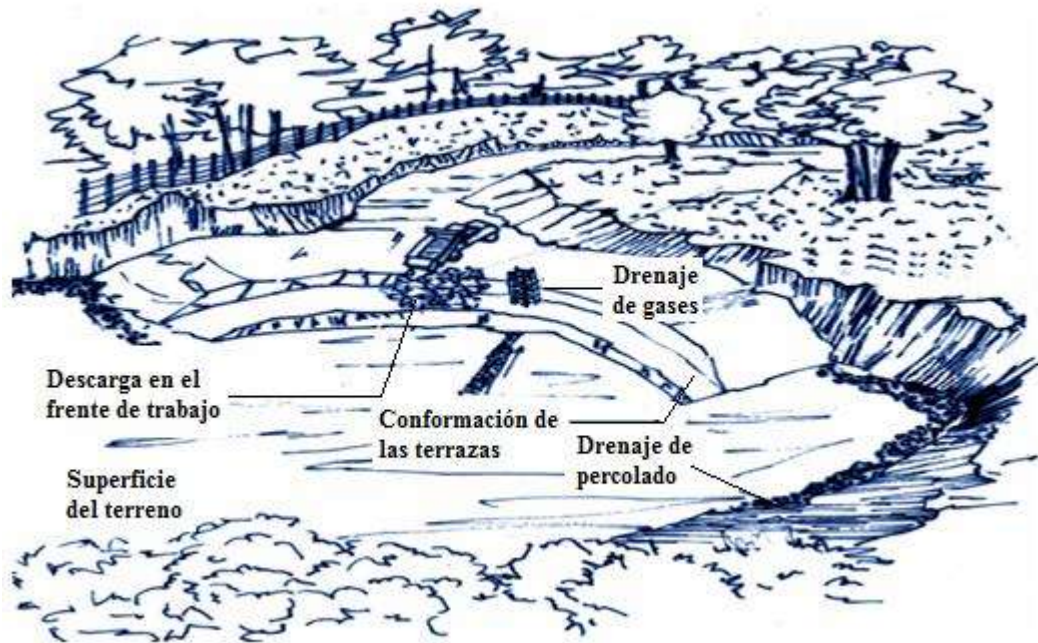


Figura 2-12 Método de área para rellenar depresiones.

### Combinacion de ambos metodos.

Dado que estos dos métodos de construcción de rellenos sanitarios tienen técnicas similares de operación, es posible combinar ambos para aprovechar mejor el terreno y el material de cobertura, así como para obtener mejores resultados (Figura 2-13).

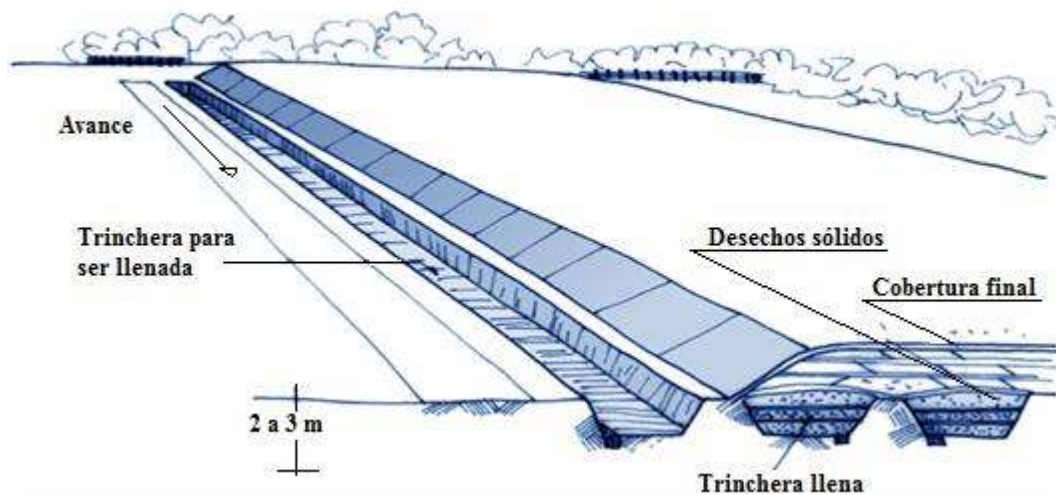


Figura 2-13 Combinación de ambos métodos.

#### **2.9.4 Sistema de impermeabilización.**

El agua subterránea es la fuente futura de abastecimiento más valiosa con que se cuenta para el desarrollo de las próximas generaciones, por lo que es imprescindible evitar su contaminación. Debido a lo anterior es necesario proteger los acuíferos. Su protección se puede efectuar de dos maneras: natural o artificial.

##### **Impermeabilización natural.**

El método de impermeabilización natural consiste en aprovechar las propiedades físicoquímicas del suelo y las características del material del subsuelo, para evitar la contaminación de las aguas subterráneas por la acción de los lixiviados.

De acuerdo con recomendaciones los sitios con alto contenido de arcillas (entre 0.30 y 1.00m de espesor) y/o con capas impermeables a poca profundidad son los mejores.

##### **Impermeabilización artificial.**

El método de impermeabilización artificial, consiste en colocar materiales naturales con artificiales con el fin de evitar que los lixiviados penetren al acuífero. Los materiales generalmente empleados son: Naturales y/o Artificiales.

Entre los naturales los más usados son las arcillas compactadas (4-6 pasadas) en la base del terreno con espesores de capa desde 20 hasta 60 cm y humedad óptima.

Entre los materiales artificiales o sintéticos más utilizados para la impermeabilización destacan el hule, polietilenos, PVC (Policloruro de vinilo) y geomembrana de polietileno de alta densidad, material que de acuerdo con estudios realizados en diversos rellenos sanitarios en la Unión Americana, resulta de mayor confiabilidad. La aplicación de materiales geosintéticos (polietileno de alta densidad) para prevenir y controlar la contaminación del suelo y los acuíferos, es un sistema de impermeabilización eficiente que arroja resultados muy satisfactorios, que evita la contaminación al subsuelo.

##### **Proceso de impermeabilización artificial.**

Con respecto a la impermeabilización de las fosas para lixiviados con geomembrana, el proceso a seguir será el siguiente:

- Como los resultados del análisis de suelos, indican que en el sitio presentan un tipo de suelo franco-arenoso esto combinado con el alto grado de compactación del material, infiere que el ángulo de fricción interna del sustrato en el sitio también es alto; por lo

tanto, no deberá colocarse geomembrana directamente sobre materiales propios del lugar debido a la alta fricción.

- Con el fin de eliminar la fricción entre la geomembrana y el sitio, colocara una capa de material de banco de tipo arcilloso.
- Se colocará un geotextil, cuyas características se muestran más adelante.

### **Selección de la geomembrana.**

Para realizar una correcta selección de la geomembrana se deben realizar una serie de revisiones mecánicas de acuerdo a las diferentes condiciones que se irán presentando durante la operación de la fosa para líquidos lixiviados.

### **Colocación de la geomembrana.**

La geomembrana es colocada manual o mecánicamente y dejando un traslape mínimo de 10 cm para la unión de las capas. Para lograr la completa impermeabilización, se realiza la unión de las membranas utilizando el proceso conocido como termofusión controlada. Durante la colocación de la membrana deberán realizarse ensayos de campo para verificar que las condiciones en las uniones son las recomendadas. Estas pruebas deben hacerse tomándose muestras de los extremos de cada unión, a las que se les prueba con un dinamómetro.

### **2.9.5 Control de Agua Pluvial.**

El agua pluvial es el agua producida por las lluvias.

#### **Drenajes fluviales.**

La función dentro diseño de los drenajes pluviales es captar y conducir los escurrimientos de lluvia externos e internos al área del relleno sanitario y dirigirlos hacia hacía el cauce natural, reduciendo al máximo a su volumen para evitar la formación de líquidos lixiviado

#### **Control de Agua de Lluvia**

- Zanjas.
- Paredes de tierra.
- Pendientes /Nivelaciones.
- Alcantarillas.
- Control de la erosión.

### **Técnicas para Manejo de aguas pluviales.**

- Mantener buenas pendientes.

- Reducir el flujo de superficie.
- Compactar la cobertura diaria.
- Evitar encharcamientos.
- Reparar daños de erosión lo antes posible.
- Trabajar con superficies operativas (celdas) adecuadas.

## 2.9.6 Generación de lixiviados.

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes que se producen como resultado de la percolación del agua a través de los residuos sólidos confinados y también por el metabolismo generado por microorganismos presentes en los residuos dentro del relleno sanitario, y potencialmente pueden impactar la calidad del agua subterránea, ya sea mantos freáticos o acuíferos, el líquido lixiviado, contiene una cantidad importante de sólidos suspendidos y disueltos, debido a reacciones químicas y bioquímicas, produciéndose inclusive gases como el CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> (Amoníaco), se estima que aun cuando se controle el ingreso de agua pluvial, existirá generación de lixiviados debido a la liberación del agua contenida en los mismos residuos confinados y la generada por actividad microbiana, ver la tabla 2-4.

Tabla 2-4 Factores de generación de lixiviados.

| FACTORES                        | ELEMENTOS                                                                |                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Infiltración de agua.           | Precipitación pluvial.<br>Cobertura de los Residuos sólidos Municipales. | Ubicación geográfica.<br>-Época del año / aspectos climatológicos<br>Evaporación/evapotranspiración<br>-Espesor impermeabilidad.<br>-Tipos de materiales.<br>-Compactación.<br>-Pendientes. |
| Característica de los residuos. | Tipología.                                                               | Composición.<br>- Orgánica.<br>-Inorgánica.<br>Compuestos contaminantes.<br>- Humedad.<br>Capacidad de absorción.                                                                           |

|                                                 |                                     |                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 |                                     | -Tamaño y grado de compactación.                                                                                                                 |
| Actividades microbiana.                         | Actividades aerobias,<br>Anaerobia. | -Naturaleza de los materiales<br>-Temperatura<br>-Relación carbono/nitrógeno<br>-Potencial de hidrógeno (PH)<br>-Contenido de sustancias tóxicas |
| Operación del relleno.<br>Operación del relleno | Eficiencia operativo                | -Bermas temporales<br>-Obras de desvío de aguas<br>-Cobertura diaria de los residuos sólidos municipales                                         |
| Intrusión de aguas subterráneas                 | Eficiencias constructiva            | -Impermeabilización adecuada                                                                                                                     |

### **Captura y escurrimiento de los Lixiviados.**

- Zanja perimetral.  
-puede utilizarse para el drenaje del lixiviado y llevarlo al sistema de tratamiento.
- Desagüe gravitacional subterráneo en el perímetro.  
- puede ser construido alrededor del relleno.
- Bombas para pozos verticales.  
- las bombas son eficaces pero caras.

### **Monitoreo lixiviados y aguas subterráneas.**

Es importante establecer un sistema de monitoreo rutinario que permita detectar anticipadamente un eventual paso de lixiviados a través de Para tales efectos los proyectos deben contener un programa de muestreo en forma sistemática en pozos ubicados aguas arriba y aguas abajo del relleno, de manera de poder determinar claramente cualquier variación de calidad química o bacteriológica de ésta. A lo menos uno de éstos debe estar inmediatamente aguas debajo de relleno con el fin de detectar lo más anticipadamente posible cualquier infiltración de lixiviado.

Factores importantes a considerar, entre otros, para dar inicio y determinar la frecuencia del muestreo son la profundidad y tamaño del acuífero, permeabilidad del terreno, precipitaciones en la zona, tamaño del relleno, etc.

Adicionalmente se debe de considerar un pozo de monitoreo ubicado en el sitio del rellenos se muestra en la Figura 2-14.



Figura 2-14 Localización de pozos de monitoreo de aguas subterráneas y lixiviado en un relleno sanitario.

El depósito para coleccionar muestras estará ubicado a nivel de la base del relleno. Pueden estar construido de asbesto-cemento o plástico, de un diámetro de aproximadamente 40 cm. Que permita la introducción de un bote de material resistente a la acidez sujetados a una madera o varilla como se ilustra en la imagen se muestra en la Figura 2-15.

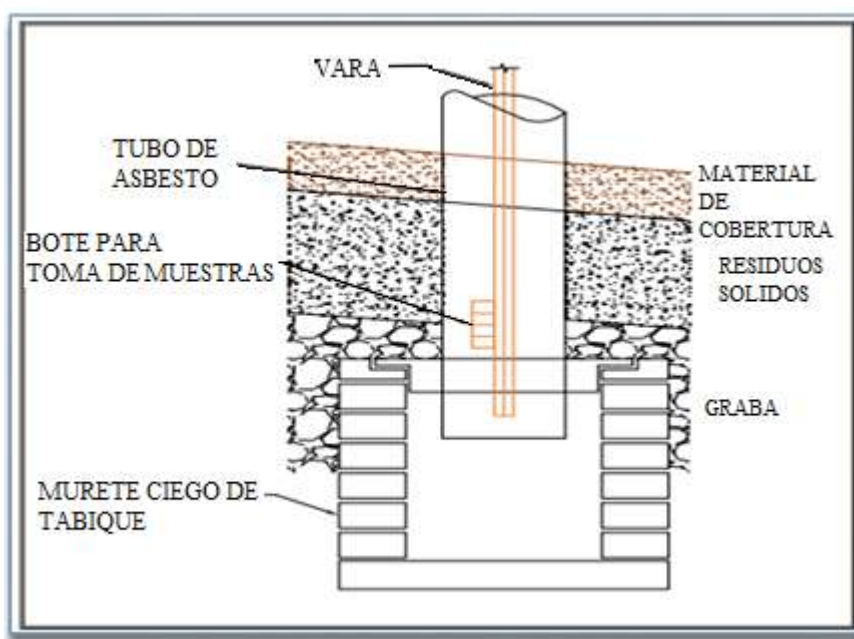


Figura 2-15 Depósito para coleccionar muestras del lixiviado.

### **2.9.7 Coberturas del relleno sanitario.**

La cobertura diaria es al final de la jornada y permite controlar los olores, proliferación de insectos y aves de rapiña, previene la generación de fuegos espontáneos, humos y el esparcimiento de los residuos por el viento y arrastre de líquidos por las lluvias cubrimiento diario con una capa de 0.10 a 0.20 m de tierra o material similar.

La cobertura final es todos los residuos y tiene por objetivo asegurar la mantención del relleno por largo tiempo de fenómenos meteorológicos, físicos, así como de procesos dinámicos de reasentamiento; y soportar el crecimiento de la vegetación u otras posibles utilidades.

Para efectuar el diseño de la cubierta final de un sitio de disposición final de residuos sólidos, se colocan uniformemente capas de suelos de diferentes texturas. La cubierta final comúnmente utilizada no debe ser menor de 0.60m.

La celda se define como la unidad básica de construcción del relleno sanitario y está constituida por la cantidad de basura que se entierra en un día y por la tierra necesaria para cubrirla.

### **2.9.8 Control de los Gases del Relleno Sanitario.**

El primer paso para implementar cualquier alternativa de solución es decidir en qué forma se controlará el flujo del gas y para ello existen tres opciones generales utilizadas actualmente en los rellenos de varios países: venteo natural, venteo pasivo y extracción activa o recarga.

El venteo natural es la emisión superficial a través del material de cobertura. El venteo pasivo se basa en los mecanismos de presión natural en el interior del relleno. Utilizan tubos colectores o trincheras para interceptar el gas en movimiento y canalizarlo al exterior. Como el relleno se encuentra bajo una presión positiva, debido a la generación de gases de descomposición y el tubo colector se encuentra prácticamente a presión atmosférica o muy cerca de ésta, se induce el movimiento del gas al punto de colección.

El drenaje activo consiste en la succión del gas mediante un soplador. Cuando se hace el drenaje activo, se controla la difusión natural de los gases, con el fin de evacuarlos solamente por los orificios previstos, se logra una mayor eficiencia pero los costos son mucho más elevados.

### **2.9.9 Ventajas y limitaciones del relleno sanitario.**

En la Tabla 2-5 se resumen las principales ventajas y desventajas del relleno sanitario.

Tabla 2-5 Ventajas y limitaciones del relleno sanitario.

| Ventajas                                                                                                                                                     | Limitaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. La inversión inicial de capital es inferior a la que se necesita para instaurar el tratamiento de residuos mediante plantas de incineración o de compost. | 1. La adquisición del terreno es difícil debido a la oposición de los vecinos al sitio seleccionado, fenómeno conocido como NIMBY (no en mi patio trasero), por diversas razones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La falta de conocimiento sobre la técnica del relleno sanitario.</li> <li>• Se asocia el término <i>relleno sanitario</i> al de botadero a cielo abierto.</li> <li>• La evidente desconfianza mostrada hacia las administraciones locales que no garantizan la calidad ni sostenibilidad de la obra.</li> <li>• La falta de saneamiento legal del lugar.</li> </ul> |
| 2. Tiene menores costos de operación y mantenimiento que los métodos de tratamiento.                                                                         | 2. El rápido proceso de urbanización, que limita y encarece el costo de los pocos terrenos disponibles, lo que obliga a ubicar el relleno sanitario en sitios alejados de la población.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3. Un relleno sanitario es un método completo y definitivo, dada su capacidad para recibir todo tipo de residuos.                                            | 3. La vulnerabilidad de la calidad de las operaciones del relleno y el alto riesgo de transformarlo en un botadero a cielo abierto, principalmente por la falta de voluntad política de las administraciones municipales para invertir los fondos necesarios a fin de asegurar su correcta operación y mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 4. Genera empleo de mano de obra poco calificada, disponible en abundancia en los                                                                            | 4. No se recomienda el uso del relleno clausurado para construir viviendas,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| países en desarrollo.                                                                                                                                                                                                | escuelas, etc.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 5. Recupera gas metano en los rellenos sanitarios que reciben más de 500 t/día, lo que puede constituir una fuente alternativa de energía para algunas ciudades.                                                     | 5. La limitación para construir infraestructura pesada por los asentamientos y hundimientos después de clausurado el relleno.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 6. Su lugar de emplazamiento puede estar tan cerca del área urbana como lo permita la existencia de lugares disponibles, lo que reduce los costos de transporte y facilita la supervisión por parte de la comunidad. | 6. Se requiere un monitoreo luego de la clausura del relleno sanitario, no solo para controlar los impactos ambientales negativos, sino también para evitar que la población use el sitio indebidamente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 7. Permite recuperar terrenos que se consideraban improductivos o marginales, tornándolos útiles para la construcción de parques, áreas recreativas y verdes, etc.                                                   | 7. Puede ocasionar impacto ambiental de largo plazo si no se toman las previsiones necesarias en la selección del sitio y no se ejercen los controles para mitigarlos.<br><br>En rellenos sanitarios de gran tamaño conviene analizar los efectos del tráfico vehicular, sobre todo de los camiones que transportan los residuos por las vías que confluyen al sitio y que producen polvo, ruido y material volante. En el vecindario el impacto lo generan los líquidos, gases y malos olores que pueden emanar del relleno. |
| 8. Un relleno sanitario puede comenzar a funcionar en corto tiempo como método de eliminación de residuos.                                                                                                           | 8. Los predios o terrenos situados alrededor del relleno sanitario pueden devaluarse.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 9. Se considera flexible porque puede recibir mayores cantidades adicionales de residuos con poco incremento de personal.                                                                                            | 9. En general, no puede recibir residuos peligrosos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

#### **2.9.10 Restricciones para la ubicación del sitio.**

Además de cumplir con las disposiciones legales aplicables, las condiciones mínimas que debe cumplir cualquier sitio de disposición final son las siguientes:

- No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas, a excepción de los sitios que estén contemplados en el plan de manejo de éstas.
- En localidades mayores de 2500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m (metros) contados a partir del límite de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano.
- No debe ubicarse en zonas de: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas.
- El sitio de disposición final se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no existirá obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integren el sitio de disposición final.
- La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe ser de 500 m como mínimo.

#### **2.9.11 Impactos a la salud y al medio ambiente producto de un deficiente manejo de residuos sólidos.**

El manejo inadecuado de los residuos puede generar significativos impactos negativos para la salud humana. Si bien algunas enfermedades no pueden ser atribuidas a la exposición de los seres humanos a los residuos sólidos, el inadecuado manejo de los mismos puede crear condiciones en los hogares que aumentan la susceptibilidad a contraer dichas enfermedades. Por otro lado prácticamente no existen sitios adecuados para procesamiento y disposición de residuos tóxicos.

Los contaminantes biológicos y químicos de los residuos son transportados por el aire, agua, suelos, y pueden contaminar residencias y alimentos (por ejemplo: carne de cerdo criados en botaderos que transmite cisticercosis) representando riesgos a la salud pública y causando contaminación de los recursos naturales.

La población más expuesta a los riesgos directos son los pepenadores que tienen contacto directo con los residuos, muchas veces sin protección adecuada, así como también a las personas

que consumen restos de alimentos extraídos de los residuos. Los pepenadores, y sus familias, que viven en la proximidad de estos sitios pueden ser, a su vez, propagadores de enfermedades al entrar en contacto con otras personas.

La disposición final de residuos a cielo abierto constituye una amenaza para la salud pública. En un tiradero a cielo abierto es común la presencia de animales que se alimentan con los residuos y que muchas veces amenazan la seguridad de la aviación civil, cuando están en las proximidades de los aeropuertos.

El polvo transportado por el viento desde un tiradero a cielo abierto puede portar patógenos y materiales peligrosos. En estos sitios, durante la biodegradación o quema de la materia orgánica se generan gases orgánicos volátiles, tóxicos y algunos potencialmente carcinógenos (por ejemplo, bencina y cloruro vinílico), así como subproductos típicos de la biodegradación (metano, sulfuro de hidrógeno y bióxido de carbono). El humo generado de la quema de residuos en estos sitios constituye un importante irritante respiratorio e influye en que las poblaciones expuestas sean mucho más susceptibles a las enfermedades respiratorias.

Los residuos sólidos pueden contener sustancias orgánicas e inorgánicas perjudiciales a la salud humana, y al ambiente natural. Un gran número de enfermedades de origen biológico o químico están directamente relacionadas con los residuos y pueden transmitirse a los humanos y animales por contacto directo de los desechos.

Tabla 2-6 Ejemplos de residuos peligrosos y sus efectos sobre la salud humana.

| <b>Tipo de sustancia</b>                                                 | <b>Síntoma/enfermedad</b>                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bario                                                                    | Efectos tóxicos en el corazón, vasos sanguíneos y nervios.                                                                                 |
| Cadmio                                                                   | Acumulación en el hígado, riñones y huesos.                                                                                                |
| Arsénico                                                                 | Toxicidad crónica o aguda (por acumulación), pérdida de energía y fatiga cirrosis, dermatitis. Se acumula en los huesos, hígado y riñones. |
| Compuestos orgánicos (benceno, hidrocarburos ,insecticida spolicíclicos, | Cancerígenos.                                                                                                                              |

|                                                                          |                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Cromo                                                                    | Tumores de pulmón.                                                        |
| Mercurio                                                                 | Vómitos, náuseas, somnolencia, diarrea sanguinolenta, afecciones al riñón |
| Pesticidas, organofosforados, organoclorados, carbamatos, clorofenóxidos | Afecciones al cerebro y sistema nervioso.                                 |
| Plomo                                                                    | Anemia, convulsiones, inflamaciones.                                      |

### 2.9.12 Uso futuro del relleno sanitario.

El uso futuro de un relleno sanitario depende del clima, de su localización respecto al área urbana, de su distancia de las zonas habitadas, de su extensión o área superficial y de las características constructivas. Estas últimas tienen que ver con la configuración final del relleno, la altura y el grado de compactación y, por supuesto, la capacidad económica de la población. Se debe tener especial cuidado ya que hay desechos que no pueden ser recibidos en el relleno sanitario, los desechos son: tóxicos, explosivos o inflamables, patógenos, radiactivos.

El terreno de un relleno sanitario clausurado se presta para desarrollar programas de recuperación paisajística y social como un parque, un campo deportivo o una zona verde.

Por fortuna ya existe en la experiencias de aprovechamiento de estos sitios transformados en parques y áreas recreativas, no se recomienda la construcción de edificaciones, viviendas, escuelas ni tampoco infraestructura pesada sobre la superficie del relleno, debido a su poca capacidad para soportar estructuras pesadas, además de los problemas que pueden ocasionarlos hundimientos y la generación de gases, aunque hay países que se han especializado que si lo hacen, tal es el caso de Japón.

Para la recuperación del paisaje es conveniente la siembra de plantas de raíces cortas y césped o grama. En muchos casos, después de la cobertura final, el pasto crece en forma espontánea

# Capítulo 3 Potencial de Generación de Energía del Biogás.

## 3.1 Introducción.

La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente. La generación de biogás en los rellenos sanitarios depende de muchos factores y al mismo tiempo es posible mejorar estos factores, es importante saber el potencial energético del biogás y donde se puede utilizar este potencial energético, los países generadores de tecnología anaeróbica con mayor desarrollo en la actualidad son China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, Estados Unidos, Filipinas y Alemania.

## 3.2 La digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. La materia prima preferentemente utilizada para someterla a este tratamiento es la biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente los residuos ganaderos, los rellenos sanitarios y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas. Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología.

Las variables que influyen en el proceso son las siguientes:

- Temperatura: se encuentra un funcionamiento óptimo alrededor de los  $35^\circ \text{C}$ .
- Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6.6 y 7.6.
- Contenido en sólidos: se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10% en sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad. Pero en un relleno sanitario es imposible tener esta condición.
- Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.

### 3.3 Biogás.

El biogás es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno). La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente. Este proceso que genera biogás es una fuente de energía renovable. Cada año, la actividad microbiana libera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano a la atmósfera. Cerca del 90% del metano emitido proviene de la descomposición de biomasa. El resto es de origen fósil, o sea relacionado con procesos petroquímicos. La concentración de metano en la atmósfera en el hemisferio norte es cerca de 1.65 partes por millón.

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de los 700 ° C (Diesel 350 ° C, gasolina y propano cerca de los 500 ° C). La temperatura de la llama alcanza 870 ° C. El biogás está compuesto por alrededor de 60 % de CH<sub>4</sub> y 40% de CO<sub>2</sub>. El biogás contiene mínimas cantidades de otros gases, entre otros, 1% de H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico). Entre más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido de metano, y con esto el poder calorífico. Con tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%. Con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.

El biogás se puede generar tanto de forma natural y en este sentido el gas natural no es más que un tipo de biogás surgido por el mismo proceso a partir de residuos orgánicos que quedaron enterrados o de forma artificial. En teoría, una tecnología adecuada puede aprovechar cualquier residuo orgánico para crear biogás y los usos que pueden dársele son los mismos que cuando se utiliza gas natural porque, en definitiva, no es más que otra forma de biogás.

#### 3.3.1 Composición y propiedades del biogás.

El biogás es una mezcla de gases compuesta principalmente de:

- CH<sub>4</sub>: 40-70% del volumen.
- CO<sub>2</sub>: 30-60 volumen %.
- Otros gases: 1-5 volumen %; incluyendo H<sub>2</sub> (Hidrógeno): 0-1 vol. % y H<sub>2</sub>S: 0-3 volumen % y trazas de vapor de agua.

La Tabla 3-1 resume la composición promedio del biogás según la fuente.

Tabla 3-1 Composición del biogás derivado de diversas fuentes.

| Gases                | Desechos agrícolas | Lodos cloacales | Desechos industriales | Rellenos sanitarios | Propiedades                |
|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| Metano               | 50-80%             | 50-80%          | 50-70%                | 45-65%              | combustible                |
| CO <sub>2</sub>      | 30-50%             | 20-50%          | 30-50%                | 34-55%              | ácido<br>asfixiante        |
| Vapor de agua        | saturación         | saturación      | saturación            | saturación          | corrosivo                  |
| Hidrógeno            | 0-2%               | 0-5%            | 0-2%                  | 0-1%                | combustible                |
| Sulfuro de hidrógeno | 100-7000ppm        | 0-1%            | 0-8%                  | 0.5-100ppm          | Corrosivo.<br>Olor. tóxico |
| Amoniaco             | trazas             | traza           | trazas                | trazas              | corrosivo                  |
| CO                   | 0-1%               | 0-1%            | 0-1%                  | trazas              | tóxico                     |
| Nitrógeno            | 0-1%               | 0-3%            | 0-1%                  | 0-20%               | inerte                     |
| Oxígeno              | 0-1%               | 0-1%            | 0-1%                  | 0-5%                | corrosivo                  |

El CH<sub>4</sub> es la base energética del biogás, el CO<sub>2</sub> es el segundo componente de importancia, siendo un componente no energético su proporción es función de la naturaleza del influente y/o de la técnica empleada en la fermentación.

El N<sub>2</sub> (Nitrógeno) se debe a filtraciones de aire exterior en la fermentación o a arrastres por el influente, el O<sub>2</sub> (Oxígeno) es igualmente por filtraciones de aire, su presencia resulta tóxica para las bacterias metanógenas, su exceso en el biogás acarrea potenciales peligros de explosividad para concentraciones altas comprendidas entre 8 y 20% del volumen total.

El H<sub>2</sub>S es un gas combustible, pero su gran inconveniente es su alto poder corrosivo al formarse H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Acido sulfúrico) en la mezcla con agua y toxicidad a partir de cierta concentración. La existencia de amoniaco es señal de que existe O<sub>2</sub> en el proceso y por lo tanto que se ha producido un proceso aerobio.

El H<sub>2</sub> (Hidrógeno) es un componente energético, el cual denota una fermentación no estabilizada y poco optimizada al presentarse en exceso. Además se posee vapor de agua el cual es importante contaminante del biogás al mezclarse con el H<sub>2</sub>S.

El  $\text{CH}_4$  es el resultado de la unión de un átomo de carbono con cuatro átomos de hidrógeno, su fórmula molecular es  $\text{CH}_4$ . Por sus propiedades físicas este gas fija la pauta para los demás miembros de la familia de alcanos; la molécula de metano es muy simétrica y debido a ésta característica molecular las polaridades de los enlaces individuales de carbono e hidrógeno se anulan, por lo que su molécula no es del todo polar. La fuerza de atracción que existe entre estas moléculas de carbono e  $\text{H}_2$  es débil debido a la limitación de las fuerzas de atracción que mantienen unidas las moléculas no polares según las fuerzas de atracción de Van der Waals.

Por ésta debilidad de atracción entre moléculas resulta sencilla su separación mediante energía térmica por lo que a temperaturas relativamente bajas, comparadas con otras moléculas, se lleva a cabo la fusión y ebullición, siendo su punto de fusión a una temperatura de  $-183\text{ }^\circ\text{C}$  y su punto de ebullición a un rango de temperatura entre  $-161.5$  y  $-161.6\text{ }^\circ\text{C}$ . Debido a esto se puede decir que el metano es un gas a temperaturas ordinarias. Cuando se encuentra en estado líquido es incoloro y menos denso que el agua y también menos soluble que ella, pero su propiedad particular es que es muy soluble con líquidos orgánicos como el alcohol y con combustibles como la gasolina con lo que su reacción a la combustión es muy buena.

La Tabla 3-2 muestra las principales propiedades del metano, por ser este el componente que aporta la energía en el biogás:

Tabla 3-2 Propiedades fisicoquímicas del  $\text{CH}_4$ .

| Propiedad del metano               | Valor                    |
|------------------------------------|--------------------------|
| Peso molecular                     | 16,04 Kg/Kg mol          |
| Densidad específica                | 0,554 Kg/m <sup>3</sup>  |
| Peso del gas líquido               | 350 g/m <sup>3</sup>     |
| Poder calorífico superior          | 8851 Kcal/m <sup>3</sup> |
| Poder calorífico inferior          | 7973 Kcal/m <sup>3</sup> |
| Límite de inflamabilidad           | 5 – 15 %                 |
| Temperatura de ignición espontánea | 573                      |

Como en cualquier otro gas, algunas de las propiedades características del biogás dependen de la presión y la temperatura. También son afectadas por el contenido de humedad. Los factores más importantes para caracterizar el biogás son los siguientes:

- Como cambia el volumen cuando cambian la presión y la temperatura.
- Como cambia el valor calorífico cuando cambian la temperatura, presión y/o contenido de agua.
- Como cambia el contenido de vapor de agua cuando cambian la temperatura y/o la presión.

El valor calorífico del biogás es cerca de 6 kWh (Kilowatt-hora) por metro cúbico eso depende del contenido de  $\text{CH}_4$  que posea pero usaremos este valor para fines prácticos que es el 60% de  $\text{CH}_4$ . Es decir que un metro cúbico de biogás es equivalente a aproximadamente medio litro de combustible diesel.

El gas de relleno o biogás es explosivo e inflamable, si no se evacua de manera adecuada, se dispersa sin control dentro del relleno e invade también terrenos adyacentes. Puede causar incendios o explosiones. Ya se observaron casos en los cuales el gas de relleno se infiltró dentro del sótano de edificios o dentro del alcantarillado y causó explosiones. Otros impactos del gas de relleno consisten en la dispersión en el suelo, donde el  $\text{CH}_4$  puede dañar a las raíces de las plantas, impidiendo el suministro de la planta con  $\text{O}_2$  y aire. El metano también tiene un impacto venenoso en los seres humanos expuestos durante largo tiempo (por ejemplo, los obreros del relleno, recicladores trabajando en el relleno). Además, el  $\text{CH}_4$  tiene alto impacto como gas de invernadero y daña a la atmósfera y al clima.

### **3.3.2 ¿Por qué aprovechar el biogás?**

- Una fuente de combustible local.
- La captura y su aprovechamiento son relativamente sencillos.
- Fuente de energía renovable.
- Suministro constante - 24 horas, 7 días a la semana.
- Existen tecnologías comprobadas para el uso de biogás.
- Recurso energético que se perdería si no se provecha.
- Ayuda a reducir emisiones al ambiente.

### 3.3.3 Usos del biogás.

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. La Figura 3-1 resume las posibles aplicaciones.

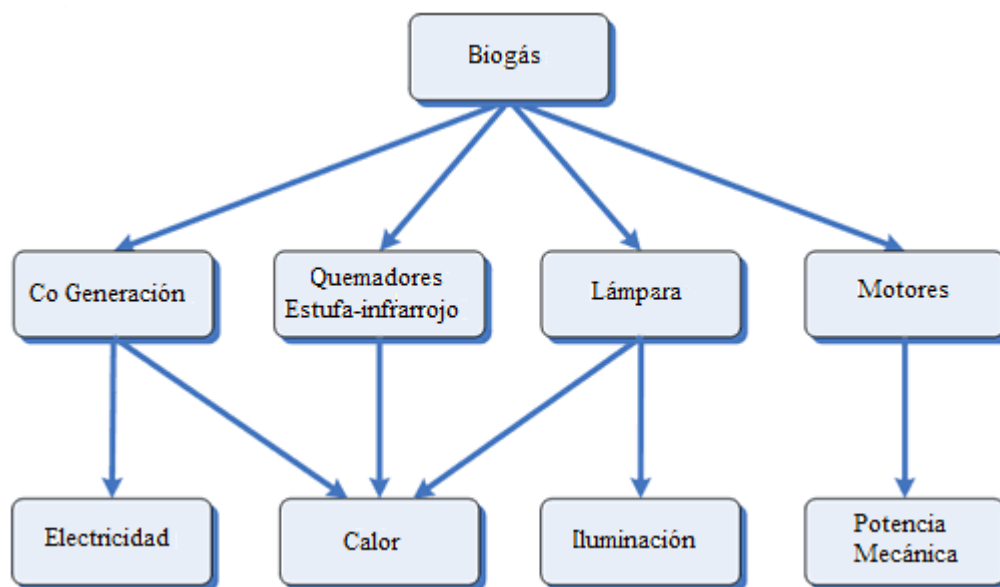


Figura 3-1 Usos del biogás.

### 3.3.4 Utilización del biogás alrededor del mundo.

- Asia es el continente que más instalaciones de biogás ha construido. En 1973 se creó la Oficina de Difusión del Biogás y posteriormente el Centro Regional de Investigación en Biogás para Asia y el Pacífico.
- En China, el 70% del combustible para uso doméstico en las zonas rurales proviene de la descomposición de la paja y los tallos de cultivos.
- En la India, más de medio millón de personas se han servido de plantas de biogás como combustible doméstico, y hoy en día existen plantas demostrativas multifamiliares donde el gas se hace llegar por tuberías a cada vivienda por un precio módico.
- En Estados Unidos, existen incluso algunas plantas de biogás de gran tamaño, mientras que en América Latina se hacen esfuerzos aislados en distintos países.
- En Japón, presentaban el año pasado un sistema que consigue fermentar también el hidrógeno, además del metano, separadamente, lo que amplía los residuos a utilizar para la obtención de biogás, como los desechos de las cocinas, por ejemplo.
- En Europa, existen más de 500 instalaciones productoras de este gas biológico.

### **3.3.5 La generación de biogás en rellenos sanitarios.**

En un relleno, los variados componentes de los residuos sólidos se degradan anaeróbicamente a diferentes tasas. Por ejemplo, los alimentos se descomponen más rápido que los productos de papel. Aunque el cuero, la goma y algunos plásticos también son materias orgánicas, usualmente se resisten a la biodegradación. Algunos materiales lignocelulósicos, plásticos, textiles y otras materias orgánicas son muy resistentes a la descomposición vía organismos anaeróbicos. A pesar de la falta de uniformidad de la descomposición anaeróbica, se han desarrollado algunas fórmulas empíricas para predecir la cantidad de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  que se genera de la descomposición de la celulosa y otros materiales orgánicos. El período de tiempo que se requiere para que los residuos sólidos domésticos se degraden y se produzca biogás dependerá de varias variables: el número de organismos presentes en la basura, nutrientes, temperatura, acidez pH (Potencial de hidrógeno), contenido de humedad, cobertura y densidad de compactación:

#### **Variables de las que depende la producción de biogás.**

- Composición de la basura: A mayor cantidad de restos de comida presentes en la basura más rápido se generará biogás. El papel y materias orgánicas similares se degradan a una tasa menor y se resisten a la biodegradación.
- Contenido de humedad: El contenido de humedad es uno de los parámetros más determinantes en un relleno sanitario. Si éste se aumenta levemente se acelera el proceso de generación de gas considerablemente. De ahí que en los rellenos sanitarios se recomienda recircular los líquidos lixiviados para adicionar humedad a la basura, o incluso agregar agua, disminuyendo al mismo tiempo los impactos ambientales de su descarga y los costos de tratamiento. El clima es uno de los elementos determinantes del contenido de humedad en un relleno, y su efecto depende en alguna medida de las características de la cobertura y el grado de impermeabilidad de la base del relleno. En un relleno sanitario generalmente el contenido de humedad va en aumento con la edad de éste. La humedad también aumenta con la profundidad en el relleno debido a que el agua fluye naturalmente en forma descendente.
- Nutrientes: Los organismos anaeróbicos se desarrollan naturalmente entre los residuos sólidos urbanos, estos se encuentran en la materia orgánica en descomposición, fecas humanas y de animales. Los elementos del carbono (en forma de carbohidratos) y  $\text{N}_2$

(como proteínas, nitratos, amoníaco, etc.), son los nutrientes principales de las bacterias anaeróbicas. El carbono se utiliza como energía y el  $N_2$  para la construcción de las estructuras de las células. Estas bacterias usan carbono 30 veces más rápido de lo que usan el  $N_2$ . Otros elementos esenciales son el fósforo y potasio contenidos en los residuos sólidos.

- Mezcla: En un relleno sanitario, al mezclar la basura logra poner en contacto los organismos anaeróbicos con su fuente alimenticia. Lo mismo hace la recirculación de líquidos lixiviados.
- Cobertura: La cobertura periódica y sistemática de la basura evita que ésta entre en contacto con el aire permitiendo la generación de condiciones anaeróbicas que la degradan y producen biogás. Mientras se den estas condiciones más rápido comienza a degradarse la basura.
- Compactación: La compactación de la basura genera el contacto con los nutrientes y la humedad, y tiende a expulsar el oxígeno presente, lo que a su vez tiende a reducir el tiempo en que se inicia la biodegradación anaeróbica.

Algunos autores, sugieren que en los vertederos o basurales abiertos, en los cuales la basura no es compactada ni cubierta, ocurre una baja descomposición anaeróbica puesto que la basura se encontraría en contacto con el aire primando un proceso de oxidación. En estos casos donde la descomposición de la basura ocurre en condiciones aeróbicas donde se generaría en su mayor parte  $CO_2$  y agua, prácticamente nada de  $CH_4$ . Bajo condiciones anaeróbicas entonces, el  $CH_4$  y el  $CO_2$  son los principales gases que se generan en un relleno sanitario.

Así mismo, cuando la degradación se genera bajo condiciones que no son controladas, el proceso ocurre en forma aleatoria en la basura depositada y es muy difícil predecir el nivel de biodegradación que ocurre en el relleno y el horizonte de tiempo en que ésta se desarrolla.

### **Fases de la biodegradación de los residuos sólidos.**

Los tipos de bacterias presentes en el proceso son las siguientes:

- a) Las hidrológicas, que producen ácido acético, de compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonados.
- b) Las acetogénicas, productoras de hidrógeno.

- c) Las homoacetogénicas, que pueden convertir una cantidad considerable de compuestos multicarbonados o monocarbonados en  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (Ácido acético).
- d) Las metanogénicas, productoras del gas metano, principal componente del biogás, con una proporción de 40 a 70 %  $\text{CH}_4$ , de 30 a 60 %  $\text{CO}_2$ .

Tras años de experiencia práctica y de investigaciones conducidas en el mundo más desarrollado se ha logrado alcanzar algún grado de entendimiento acerca de los procesos de biodegradación de la basura y de la producción de biogás y sus composiciones.

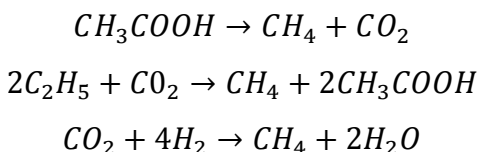
En general la biodegradación de los residuos sólidos sigue un patrón de cinco etapas (véase en la Figura 3-2):

**Fase 1:** Esta fase es aeróbica que sucede inmediatamente después que la basura es depositada. Las sustancias de fácil biodegradación se comienzan a degradar a partir de su contacto con el oxígeno del aire. Esta primera fase de descomposición microbiana de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos se realiza bajo condiciones aerobias, mientras se ejecutan las operaciones necesarias para introducir la materia orgánica en un medio que posea condiciones anaerobias: túneles de fermentación, digestor, vertedero, etc. Se produce  $\text{CO}_2$  y la temperatura comienza a elevarse. En general es una etapa relativamente corta.

**Fase 2:** Fase de transición, esta etapa también es una etapa aeróbica, durante la cual aún no se desarrollan condiciones anaeróbicas. Ocurre un proceso de fermentación, donde se desarrollan ácidos en los líquidos lixiviados y se produce una caída importante en el pH. En estas condiciones el biogás está compuesto básicamente de  $\text{CO}_2$ . Se caracteriza esta fase por el paulatino descenso de las condiciones aerobias, presencia de oxígeno, hasta su completa desaparición, comenzando la etapa anaerobia. El oxígeno desaparece del metabolismo respiratorio, siendo sustituido por compuestos inorgánicos oxidados, como el nitrito y el sulfito, los cuales, sometidos a un potencial de oxidación-reducción, se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. En estas condiciones, el potencial reductor del medio irá incrementándose, comenzará la generación de metano. Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica comienzan un proceso que se resume en la conversión del material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios. El pH de la fase líquida, si es que existe, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de  $\text{CO}_2$  dentro del medio.

**Fase 3:** Fase ácida, en esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase anterior con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. Esta fase, predominada por las bacterias denominadas no metanogénicas o acidogénicas, pueden resumirse en: Transformación enzimática o hidrólisis, de compuestos con alto peso molecular como los lípidos, polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, etc., en otros compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y como transformación a carbono celular. Conversión microbiana o acidogénesis de los compuestos resultantes del primer paso de este proceso, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. Las características propias de la fase ácida son: Generación de diversos compuestos gaseosos, principalmente  $\text{CO}_2$ , además de gas de  $\text{H}_2$ . El pH de la fase líquida del medio, si existe, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 ó menos, por la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de  $\text{CO}_2$ . La demanda bioquímica de oxígeno, DBO (La demanda bioquímica de oxígeno), la demanda química de oxígeno, DQO (La demanda química de oxígeno), y la conductividad del medio líquido se incrementarán significativamente debido a la disolución de ácidos orgánicos. Disolución de algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, y de algunos nutrientes en el medio líquido, debido a los bajos valores del pH.

**Fase 4:** Esta fase, dominada por microorganismos que comienzan a desarrollarse hacia el final de la fase ácida, estrictamente anaerobios y denominados metanogénicos, se caracteriza por la conversión del ácido acético y el gas de hidrógeno, producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida, en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Es también la fase anaeróbica donde la producción de  $\text{CH}_4$  alcanza su más alto nivel, con una concentración de  $\text{CH}_4$  estable en el rango de 40% a 60% por volumen de biogás. Los ácidos orgánicos en los líquidos lixiviados se descomponen inmediatamente en biogás. La carga orgánica de los lixiviados es baja y consiste principalmente de componentes orgánicos de alta biodegradabilidad. Como las condiciones son eminentemente anaeróbicas los lixiviados tendrán una alta concentración de amoníaco. Debido a la transformación de los ácidos y el gas de  $\text{H}_2$  en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , el pH de la fase líquida subirá a valores más neutros, en el rango de 6.8 a 8, reduciendo las concentraciones de DBO y DQO, así como el valor de conductividad del líquido. Con este incremento de pH, disminuye la concentración de los constituyentes inorgánicos en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el líquido también se reducirá.



**Fase 5:** Fase de maduración, esta fase mucho menos activa en cuanto a la generación de gases se refiere, viene caracterizada por una disminución de la humedad y la conversión del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. La velocidad de generación del gas de vertedero disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han diluido en el medio líquido durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el medio sólido son de una degradación lenta. Las fases 1 y 2 pueden tener una duración de entre semanas a dos o más años. En general, una mayor temperatura ambiental tenderá a acelerar los procesos de biodegradación. Altas tasas de compactación y acumulación de la basura en capas delgadas también tendrán el mismo efecto. La acumulación de la basura en celdas pequeñas también acelerará las reacciones tendiendo a reducir la duración de estas etapas. Las fases 3 y 4, en tanto, pueden llegar a durar aproximadamente 5 años en su nivel más elevado para luego decaer progresivamente, dependiendo de las condiciones de operación del relleno y en particular del contenido de humedad de la basura. Como la humedad tiende a acelerar las bioreacciones que ocurren en la basura, las precipitaciones tenderán a reducir la duración de estas etapas y a aumentar la generación de biogás en el tiempo. La recirculación de los líquidos percolados hacia las celdas de disposición contribuirá al contenido de humedad de la basura y a acelerar las reacciones. La fase 5 del ciclo de vida de un relleno sanitario dependerá en gran parte de las condiciones de operación desarrolladas desde un principio en un relleno. Sin embargo, puede tomar décadas e incluso siglos para que la basura depositada en un relleno finalmente se estabilice.

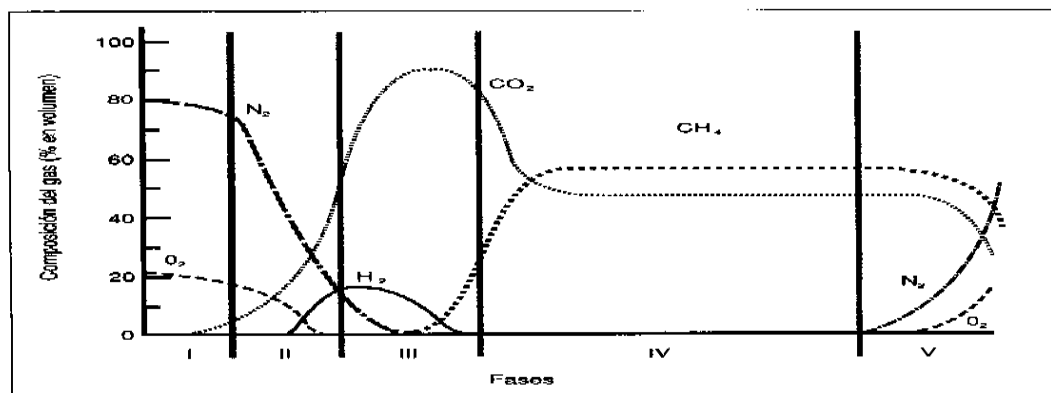


Figura 3-2 Fases de la biogradación de los residuos sólidos.

En la Tabla 3-3, se muestra la composición promedio del biogás detectada en sitios de disposición final de residuos sólidos, en función del tiempo desde que finaliza la construcción de la celda.

Tabla 3-3 Composición promedio del biogás desde que finalizó la construcción de la celda.

| <b>TIEMPO<br/>DESDE QUE SE CONSTRUYO LA<br/>CELDA (MESES)</b> | <b>COMPOSICIÓN<br/>PORCIENTO DE LOS GASES</b> |                       |                       |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                               | <b>N<sub>2</sub></b>                          | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>CH<sub>4</sub></b> |
| 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                    |
| 42-48                                                         | 0.4                                           | 51                    | 48                    |

### **3.4 Rendimientos teóricos de biogás a partir de los residuos sólidos dispuestos.**

El CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> son los principales constituyentes del biogás y se producen durante la descomposición anaeróbica de la celulosa y las proteínas en la basura de los rellenos. La descomposición anaeróbica ocurre en ausencia de oxígeno. Además de los gases nombrados en los rellenos también se genera una pequeña proporción de compuestos orgánicos no metanogénicos. Estos compuestos incluyen contaminantes atmosféricos peligrosos y COV (Compuestos orgánicos volátiles).

La descomposición es un proceso complejo que requiere que se den ciertas condiciones, como ya se indicó más arriba, factores ambientales como la cantidad de materias orgánicas y el contenido de humedad de la basura, la concentración de nutrientes, la presencia y distribución de microorganismos, el tamaño de las partículas de la basura, la inmisión de agua, pH, y temperatura, afectan la descomposición de la basura y la generación de biogás. Debido al

complejo conjunto de condiciones que deben ocurrir para que se genere biogás, se estima que la basura debería llevar depositada al menos un año o más para que se comience a desarrollar la descomposición anaeróbica y comience la generación de biogás. La basura acumulada en un relleno puede generar gas durante 20 ó 30 años. Sin embargo, en botaderos sin control donde la basura está en exposición al aire, resulta una descomposición aeróbica que sólo emite CO<sub>2</sub> y agua. En teoría, la cantidad de biogás que se genera de una tonelada de carbono biodegradable corresponde a 1,868 Nm<sup>3</sup> (Metro cúbico normal). En países industrializados, la cantidad teórica es de 370 Nm<sup>3</sup> de biogás por cada tonelada de basura depositada. En general, la evidencia empírica en los países desarrollados ha demostrado que la biodegradación ocurre en forma dispareja e imperfecta, por lo que se considera que la generación de biogás se aproximaría más a los 200 Nm<sup>3</sup> por cada tonelada de basura depositada que a la cifra anterior.

### **3.4.1 Modelos predictivos de la producción de biogás.**

#### **El Método A: Aproximación Simple.**

Es como su nombre lo indica una aproximación gruesa basada en la cantidad de basura depositada en un relleno. El procedimiento se basa en una razón empírica entre cantidad de basura y flujo de biogás observada en los muchos y variados proyectos de recuperación de biogás de rellenos sanitarios estudiados por este programa. Es un reflejo de las características del relleno promedio y puede no representar con precisión las distintas características de la basura, 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 basura depositada en el relleno de interés y se nutre del juicio y experiencia de expertos de la industria, que han establecido que la generación de biogás varía entre 0.05 y más de 0.20 piés cúbicos (pc) al año por cada libra (lb) de basura. Lo que da la siguiente ecuación:

$$\text{Generacion anual de biogas (pc)} = 0,10 \frac{\text{pc}}{\text{lb}} \times 200 \frac{\text{lb}}{\text{ton}} \times \text{cantidad de basura depositada (ton)} \quad (3-1)$$

#### **Modelo de Biogás Mexicano.**

El modelo proporciona valores precalculados para el índice de generación de CH<sub>4</sub> (k) y la generación potencial de CH<sub>4</sub> (L<sub>0</sub>), los cuales fueron desarrollados usando datos específicos del

clima, datos de la caracterización de residuos y datos específicos sobre el biogás de sitios representativos en México. Estos datos permiten que los usuarios puedan generar índices de generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios localizados en diversas regiones de México.

El modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el programa *Landfill Methane Outreach* de la EPA. Este Modelo puede ser utilizado para estimar generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios mexicanos que cuenten o planeen tener un sistema de recolección de biogás. El Modelo está elaborado en una hoja de cálculo en Excel y está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas referente a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio. El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de  $\text{CH}_4$  (k) y la generación potencial de  $\text{CH}_4$  (L0) para cada uno de los estados y estima la eficiencia de captura en base a las respuestas proveídas. Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de México y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades y índices de generación de biogás. También se evaluó información de recuperación de biogás actual en cuatro rellenos sanitarios en México para ayudarnos en la selección de los valores de k y L0. El Modelo fue desarrollado con el objetivo de proveer proyecciones de generación y recuperación de biogás más exactas y conservadoras.

El Modelo requiere que el usuario alimente algunos datos, como son:

- a) Año de apertura del relleno.
- b) Año clausura estimado.
- c) La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario, o el índice de aceptación anual estimado.
- d) Precipitación promedio anual.
- e) Eficiencia del sistema de recolección.

El modelo estima los siguientes datos:

El volumen de generación de biogás en  $\text{m}^3/\text{minuto}$  (metros cúbicos por minuto (metros cúbicos por minuto) y  $\text{m}^3/\text{hora}$  (metros cúbicos por hora). También calcula el contenido de energía en el biogás generado en  $\text{GJ/año}$  (Gigajoules por año). La generación de biogás se estima multiplicando la generación de  $\text{CH}_4$  por dos (Se asume que el biogás está compuesto de 50%  $\text{CH}_4$  y 50%  $\text{CO}_2$ ). El modelo, el cual es una hoja de cálculo en Excel, está acompañado por un Manual del Usuario. Ambos la hoja de cálculo y el manual pueden descargarse de la página de internet de la Epa. En la Figura 3-3 podemos observar Sección de Alimentación de la Hoja de Alimentación para observar las preguntas que se tienen que contestar.



| PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS |                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| PAGINA DE ALIMENTACION                                                        |                                                                                             |            |
| 1                                                                             | Nombre del Sitio:                                                                           | Morelia    |
| 2                                                                             | Ciudad:                                                                                     | Morelia    |
| 3                                                                             | Estado:                                                                                     | Michoacán  |
| 4                                                                             | Región:                                                                                     | Oeste 2    |
| 5                                                                             | ¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión? | No         |
| 6                                                                             | Año de apertura del sitio:                                                                  | 2008       |
| 7                                                                             | Disposición anual del año mas reciente:                                                     | 354.000 Mg |
| 8                                                                             | Año de disposición (arriba):                                                                | 2011       |
| 9                                                                             | Año de clausura o año de clausura proyectado:                                               | 2014       |
| 10                                                                            | Incremento anual estimado de la disposición:                                                | 1,0%       |
| 11                                                                            | Profundidad promedio del relleno sanitario:                                                 | 25 m       |
| 12                                                                            | Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:                                         | 2          |
| 13a                                                                           | ¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?                                          | No         |
| 13b                                                                           | Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total:                 | 0%         |
| 13c                                                                           | Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio:              | 1          |
| 14                                                                            | Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):                                   | 2014       |
| 15                                                                            | Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:                                    | 85%        |
| 16                                                                            | Porcentaje del área con residuos con cubierta final:                                        | 100%       |
| 17                                                                            | Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:                                   | 0%         |
| 18                                                                            | Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:                                       | 70%        |
| 19                                                                            | Porcentaje del área con residuos sin cobertura:                                             | -70%       |
| 20                                                                            | Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:          | 100%       |
| 21                                                                            | ¿Se compactan los residuos regularmente?                                                    | Si         |
| 22                                                                            | ¿La disposición de residuos se hace en una área específica?                                 | Si         |
| 23a                                                                           | Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?           | Si         |
| 23b                                                                           | Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?                        | Si         |
| 24                                                                            | Eficiencia de captura estimada:                                                             | 82%        |

Figura 3-3 Página de alimentación.

Por lo anterior, cualquiera de los métodos teóricos para estimar el potencial de generación de biogás de un relleno sanitario tendrá altos grados de imprecisión. Incluso los test de bombeos

en terreno son considerados imprecisos para estimar emisiones a futuro, debido a que representan una medición instantánea en un momento o período dado del tiempo y las condiciones de un relleno pueden variar en plazos más largos.

### 3.4.2 Comparación de diferentes combustibles con el biogás de relleno sanitario.

El biogás en comparación a otros combustibles es de bajo poder calorífico, esto se debe principalmente a que es un gas saturado, se define poder calorífico (H) de un combustible, como la cantidad de calor que este libera en la combustión al enfriar los productos hasta una condición original de referencia (generalmente 25 °C y 1 atmósfera). La Tabla 3-4 muestra una comparación de diferentes combustibles con el biogás de relleno sanitario.

En respuesta a la incertidumbre concerniente a la eficiencia del sistema de recolección, la EPA propuso lo que considera niveles de eficiencia razonables para sistemas de recolección instalados en rellenos de Estados Unidos y que cumplen con los estándares americanos de diseño. De acuerdo con la EPA, la eficiencia de recolección en estos rellenos, típicamente varían entre 60% y 85%, con un promedio de 75%.

Tabla 3-4 Comparación del Poder Calorífico de Combustibles de Gaseosos.

| Combustible | Poder calorífico superior (Kcal/m <sup>3</sup> P) |
|-------------|---------------------------------------------------|
| Metano      | 8851                                              |
| Biogás      | 5000                                              |
| Propano     | 21360                                             |
| Gas Natural | 14422                                             |
| Butano      | 28035                                             |

## 3.5 POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL BIOGÁS.

La EPA recomienda utilizar las siguientes relaciones para estimar el potencial de generación de energía del biogás de rellenos sanitarios:

Potencial de generación de energía bruto (kw): Esta es la capacidad instalada de generación que el flujo de biogás obtenido de un relleno puede soportar y está dado por la siguiente fórmula:

$$Kw = \frac{\text{Flujo de biogás (m}^3/\text{hora)} * \text{Contenido de energía (Kcal/m}^3) * \text{Eficiencia del sistema}}{859.804}.$$

(3-2)

Donde:

- Flujo de biogás se refiere a la cantidad neta de biogás por día que es capturada por el sistema de recolección, procesada y entregada al equipo de generación eléctrica (usualmente se supone que esta alcanza entre el 75% y el 85% del total de gas producido en el relleno) m<sup>3</sup>/hora.
- Contenido de energía del biogás, depende del contenido del metano y su poder calorífico que es 8851 Kcal/m<sup>3</sup> (Kilocaloría por metro cubico).
- Eficiencia del sistema se refiere a la eficiencia del sistema a usar.
- 1 kw es igual a 859.804 Kcal/hr (Kilocaloría por hora).
- Factor de capacidad anual: Es el porcentaje de horas al año que el equipo produce electricidad a su capacidad de diseño. Para el caso de proyectos de biogás se estima entre 80 y 95%, considerando un porcentaje de parada de 4 a 10%. Se asume normalmente un 90% para este factor.

Electricidad anual generada: Este es la cantidad de electricidad generada en un año, medida en kWh, que es igual al potencial de energía neto multiplicado por el número de horas operacionales al año. Ósea:

$$Kwh = KwN \times hrs \quad (3-3)$$

El potencial de generación, el valor mínimo de interés comercial es de 0.8 MW considerado por la (EPA 2011) También EPA sugiere ciertas condiciones mínimas para pensar en desarrollar proyectos de generación de energía de biogás:

- Que el relleno tenga más de 1 millón de toneladas de basura acumuladas.
- Que el sitio esté recibiendo basura o se encuentre cerrado por menos de 5 años, ya que el pick de generación se alcanza poco después de cerrado un relleno.
- Que tenga una profundidad no menor a 13 m.

# Capítulo 4 Relleno Sanitario de Morelia

## Michoacán.

### 4.1 Introducción.

La extracción de biogás y su utilización requieren de equipos especializados, por lo que la ingeniería juega un papel muy importante, los equipos de un relleno sanitario moderno son pozos de extracción, cabezales, tuberías, soplador, secadores, filtros eliminadores de  $H_2S$ , chimeneas, generadores. Cada uno de estos juega un papel importante en la generación de energía eléctrica comercialmente existen todos ellos, solo se necesita tener conocimientos sobre ingeniería para poder escoger el adecuado equipo que se utilizará o también se pueden diseñar.

### 4.2 Relleno sanitario moderno.

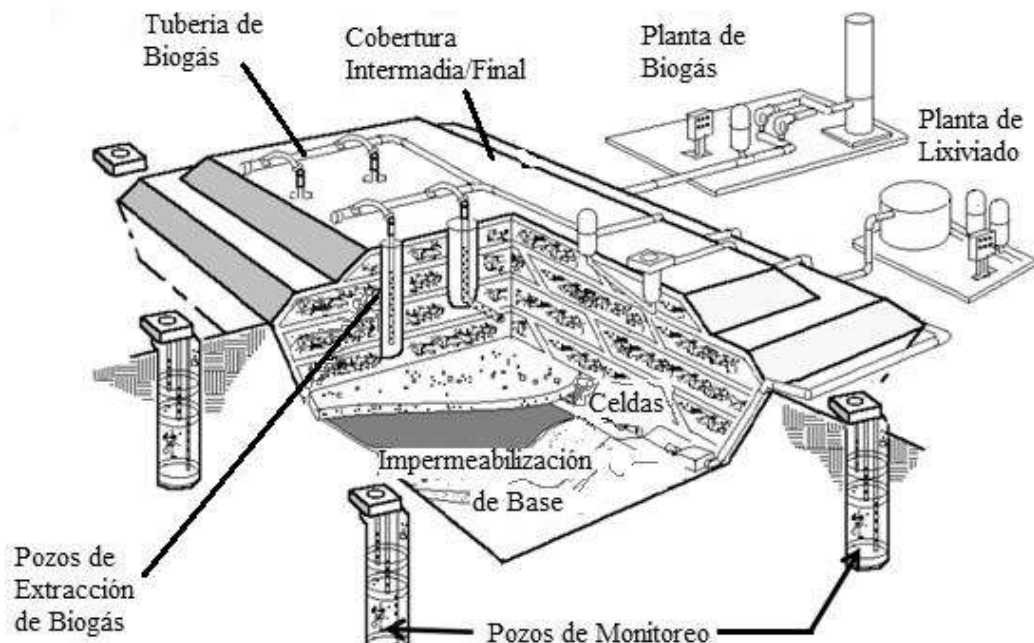


Figura 4-1 Relleno sanitario moderno.

### **4.3 Componentes del sistema de captación de biogás.**

#### **4.3.1 Pozos de extracción.**

La extracción de biogás de un vertedero presenta muchos problemas específicos ya que cada vertedero tiene unas características propias, tanto por su ubicación como por la composición de los residuos sólidos de sus basuras.

Para la extracción del biogás se perforan una serie de pozos que conduzcan el biogás desde el vertedero a la planta de tratamiento a través de un sistema de líneas de conducción.

#### **Radio de influencia de los pozos de extracción.**

El radio de influencia de los pozos de extracción normalmente depende del grado de compactación, tipo de residuos sólidos, de la profundidad del pozo y del flujo de salida del biogás (residuos de mercados, domésticos, de construcción etc.). Ahora bien, hay que considerar que dentro de los estratos de residuos sólidos no existe una uniformidad en cuanto a las características de los residuos sólidos, así como de su acomodo. Esto origina que el cálculo para determinar la ubicación de los pozos de extracción sea difícil de llevar a cabo. En la actualidad, se tiene reportado por la literatura diversos criterios, uno de los cuales establece que el número de pozos de extracción, será de 2 a 6 piezas por hectárea; otro establece, para determinar el número de los mismos y consiste en ubicar un pozo de extracción por cada 7,500 m<sup>3</sup> de residuos sólidos; y finalmente, un tercer criterio conforme a la experiencia en campo, indica que los mejores resultados, se han obtenido con un espaciamiento de pozos, que va desde los 15 hasta los 50 metros, con un intervalo recomendado de 20 a 30 metros.

Para el cálculo del radio de influencia de los pozos de biogás, se tomarán en cuenta los criterios anteriores y se determinará de manera analítica. De acuerdo con experiencias en la medición de flujos en sitios de disposición final, se ha detectado un flujo de 30-50 m<sup>3</sup>/hr en pozos de buena producción de biogás y en sitios recién rellenados. Asumiendo un flujo inicial de 50 m<sup>3</sup> por pozo, es posible calcular el radio de influencia.

De acuerdo con la ecuación que representa la relación entre el flujo de biogás, las características de los residuos sólidos y del sistema de extracción de biogás, se tiene que:

$$R = [(Q_w)(C)(K)(T)(PV)(H)]. \quad (4-1)$$

Donde:

R (Radio de influencia)

Qw (Flujo del biogás a través de los pozos)  $\text{Mm}^3/\text{año}$ .

H (Profundidad promedio del pozo) m.

PV (Peso volumétrico de los residuos)  $\text{Kg.}/\text{m}^3$

T (Tasa de producción de metano)  $\text{Mm}^3/\text{año}$ .

C (Fracción de concentración de metano) 0.50.

K (Constante de corrección)  $3.8 \times 10^{-8}$

Conforme al criterio que dicta la experiencia en campo, que como ya se mencionó, la mayoría de los autores reportan que los mejores resultados se han obtenido con un espaciamiento máximo de pozos de 50 metros, que implica un radio de influencia del orden de 29 metros, lo anterior sugiere que una separación mayor de 50 metros será ineficiente. Por ésta razón y considerando que a menor separación se incrementa la cantidad de pozos y con ello el presupuesto requerido para su construcción, se estima conveniente el uso del máximo valor permitido, según los datos anteriormente citados o sea los 50 metros de separación.

#### **Distribución de los Pozos de extracción.**

Los pozos de biogás serán distribuidos de acuerdo al radio de influencia y las características topográficas del sitio.

#### **Profundidad de los pozos.**

Otro criterio aceptado internacionalmente y que se aplica en México desde hace varios años, es que los pozos de extracción deben penetrar un 80-90% del espesor de los residuos.

#### **Instalación del sistema de extracción.**

La instalación del sistema de extracción se compone de una serie de pasos, una vez realizada la perforación del pozo.

- Construcción interior del pozo. El pozo se compone de una parte ranurada por donde se capta el biogás y otra ciega, en la zona cercana a la superficie, por donde no va a entrar el biogás, impidiendo de este modo su fuga y la entrada de oxígeno.

- Instalación de la tubería de captación. El material empleado para esta tubería suele ser de HDPE (Polietileno de alta densidad), con la parte inferior ranurada o perforada como mínimo un 8% de su superficie una parte ciega en lo más alto, introducida en el pozo.
- Relleno del espacio existente entre la tubería y la pared del pozo con material granular detrítico de 30-40 mm. En ningún caso el material de relleno debe ser de naturaleza calcárea ya que se disolvería por el conjunto biogás-condesados-lixiviados.
- Relleno de los últimos metros del pozo, donde la tubería es ciega, con bentonita, u otro material arcilloso que actúe de aislante evitando la entrada de oxígeno al pozo.
- Material de separación entre la capa de relleno detrítica y la arcillosa (junta de plástico, caucho, etc.) para impedir la entrada de oxígeno a los conductos de transporte del biogás.
- Unión flexible entre el pozo y la tubería de transporte de biogás, para que pueda curvarse y absorber cargas de impacto por el trabajo pesado en el relleno sanitario. Esta resistencia y flexibilidad permitirán a la tubería absorber sobrepresiones, vibraciones y tensiones causadas por movimientos del terreno.

En Figura 4-2 se puede observar lo anterior mencionado

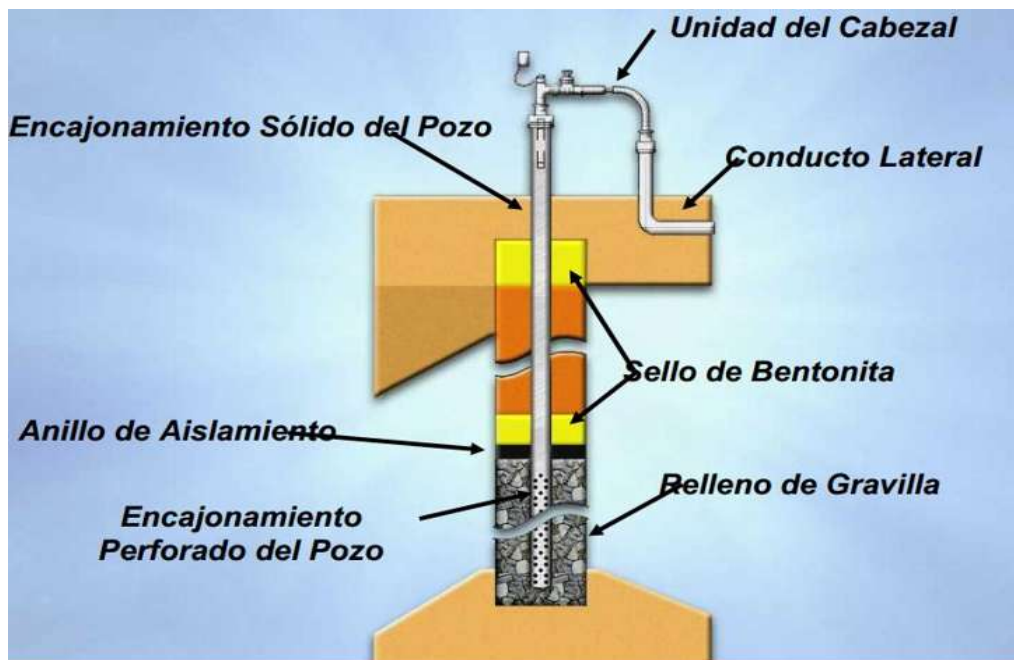


Figura 4-2 Tubería del pozo.

### **Pozos de extracción verticales.**

- Método más común de la captura de biogás.
- Se instala en áreas de disposición existentes o en operación.
- Profundidad ideal de los residuos > 10 metro.

En estos casos se logran rendimientos mayores de recolección. Sin embargo esta modalidad usualmente acarrea problemas operacionales al interrumpir las operaciones de descarga de los camiones, dificultades para realizar la compactación cerca de los pozos y asentamiento disperejo de la basura alrededor de ellos.

### **Pozos de extracción horizontales.**

- Un método alternativo para la captura de biogás.
- Se instala en áreas con residuos poco profundos.
- Se instala en áreas de disposición existentes o en operación.
- Puede ser utilizados en rellenos sanitarios con altos niveles de lixiviados.
- Pueden ser una alternativa cuando se instalan a conforme el relleno sanitarios va avanzando en profundidad.

En la Figura 4-3 podemos ver un colector horizontal.



Figura 4-3 Colector horizontal.

### **Cabezal del pozo de extracción.**

En el cabezal del colector Figura 4-4 se pueden tener los medidores de presión y temperatura



Figura 4-4 Cabezal del pozo de extracción.

### **4.3.2 Sistemas de conducción.**

El sistema de conducción consiste en la construcción de una red de tuberías de HDPE para transportar el biogás desde los pozos de captación hasta la planta de extracción., Cada línea HDPE dispondrá de un sistema de regulación del caudal de biogás en función de la composición y del consumo del mismo necesario para el funcionamiento del motor. En cada línea se controla el caudal y la composición del biogás. Con el fin de estimar el diámetro de tuberías adecuadas se debe efectuar el siguiente procedimiento:

- Elaboración del esquema de la red de tuberías.
- Cálculo de longitudes reales de los tramos que componen la red.
- Cálculo de flujo en  $\text{m}^3/\text{h}$  de cada tramo.
- Se asumirán los diámetros a utilizar y con éste y los accesorios, se determinaran las longitudes equivalentes.
- Las líneas de cabezales y las líneas laterales constituyen el sistema de conducción de biogás, el cual es transportado posteriormente hasta los sistemas de tratamiento. Las

líneas de cabezales conectan el sistema de tuberías de conducción para poder conectar a la tubería principal Figura 4-5.



Figura 4-5 Sistema de tuberías de conducción y conectadas a las líneas de cabezales o subcabezales.

Las líneas de cabezales pueden ser un tanque o un tubo. Se recomienda ubicar el punto de recolección en un nivel abajo de la tubería y de las chimeneas, con el fin de poder condensar en este lugar las aguas contenidas en el gas de relleno ya que es un gas altamente saturado, para poder regresar el agua al relleno sanitarios.

### **Tubería principal.**

En la Figura 4-6 se muestra el ejemplo de la tubería principal.



Figura 4-6 Tubería principal.

También es preciso señalar que la eficiencia de cualquier sistema de captación de biogás se ve afectada por varios factores, entre ellos:

- Pérdidas por migración superficial.
- Fugas en el sistema de captación.
- Producción no homogénea en el relleno (sectores de bajo poder calorífico).
- Ingreso de aire a la masa del relleno.

#### **Uso del HDPE.**

Este material ofrece mayores alternativas de diseño garantizando una larga vida útil, economía en instalación y minimiza los costos de mantención, además las condiciones de operación están dentro de las capacidades de temperatura y presión del material.

Otras ventajas de este material son:

- Resistente a la corrosión.
- Es liviano, fácil de transportar.
- De fácil manejo e instalación.
- Es dúctil y resistente al impacto, incluso a bajas temperaturas.
- Las uniones son seguras y fáciles de realizar.

#### **4.3.3 Equipos de extracción.**

Debido a que la presión del gas en la red de captación es poca, es necesario utilizar compresores para obtener el volumen requerido por los motores generadores. El procedimiento de cálculo de potencia de una bomba consiste en tener configurada la red de conducción, es decir, tener bien definidos los diámetros, longitudes, número de accesorios como codos, válvulas, etc. y de ahí comenzar a calcular por la ecuación de Bernoulli, las caídas de presión en los diferentes puntos de la línea de tubería hasta llegar al soplador. Es un análisis complejo de mecánica de fluidos. Además de estos parámetros se necesitan conocer propiedades del biogás, que para el cálculo de la bomba son: temperatura, viscosidad, densidad, velocidad, presión barométrica y manométrica. Figura 4-7.



Figura 4-7 Compresor de pistón con soplador para biogás (estacionario).

Tubo de aspiración de gas: Este es el tubo que conecta el punto de colección con el soplador. 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.

Comercialmente ya existen sopladores especiales para biogás por lo que solo tenemos que conocer los parámetros necesarios antes mencionados para adquirir el soplador ideal que se necesita para el relleno.

#### 4.3.4 Control extracción.

La extracción del biogás debe seguir un control para lo cual será necesario disponer de un equipo analizador para metano y oxígeno, de modo que se obtenga un biogás lo más homogéneo posible en cuanto a su composición, previniendo la aparición de mezclas explosivas debido a la presencia de oxígeno en ciertas concentraciones.

#### 4.3.5 Analizadores de biogás

Comercialmente ya existen analizadores de biogás muy completos con una gran diversidad de funciones, entre ellas medir  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  (Oxígeno) y  $\text{H}_2\text{S}$ . También se puede controlar el flujo desde el analizador. Ejemplo en la Figura 4-8.



Figura 4-8 Analizador de biogás.

## 4.4 Sistema de quemado.

El sistema de quemado tiene el propósito de disponer de los excedentes del biogás que se utilizan para su aprovechamiento en la planta de generación de energía. En la mayoría de los casos el biogás captado en los rellenos sanitarios que no es utilizado o aprovechado, generalmente es quemado.

### 4.4.1 Tipos de quemadores.

Tabla 4-1 Tipos de quemadores.

| Tipo “Elevado o candela” Figura 4-9         | Tipo “Piso o Cerrado. Figura 4-10                                                            |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cuesta menos que un quemador tipo “cerrado” | La flama está encerrada dentro de la estructura del quemador.                                |
| Es más fácil de operar generalmente         | Pueden efectuarse pruebas para obtener índices de emisiones.                                 |
|                                             | Generalmente ofrecen más altas eficiencias de destrucción de compuestos orgánicos volátiles. |

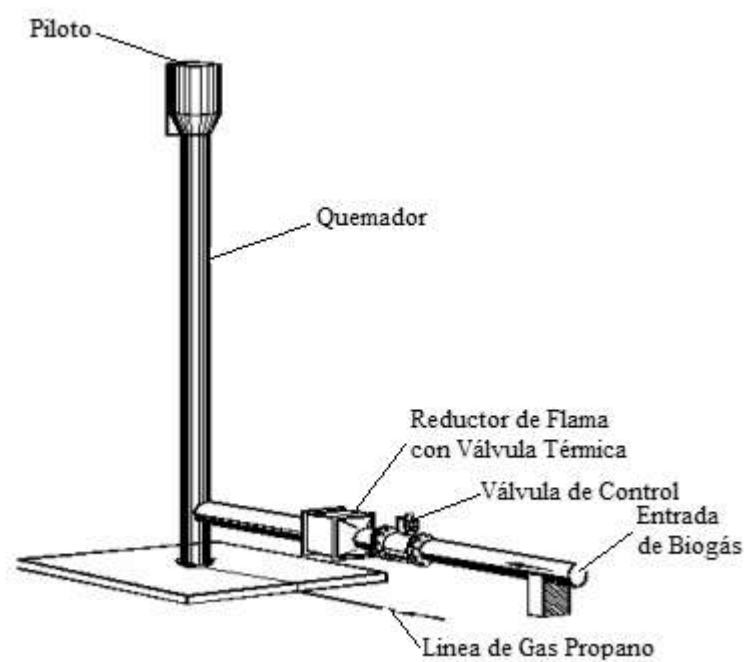


Figura 4-9 Quemador tipo elevado.



Figura 4-10 Quemador tipo cerrado.

#### 4.4.2 Incineración con antorcha.

Flaring con antorcha es la técnica más común para controlar y tratar el gas de relleno sanitario. El  $\text{CH}_4$  es convertido en  $\text{CO}_2$ , resultando una gran reducción del impacto generado por la emisión de gases de efecto invernadero.

La quema con antorcha es un proceso de control por combustión, en el cual el gas es conducido por medio de tuberías a una localidad remota, quemados en una flama utilizando una boquilla de quemador diseñada especialmente, un combustible auxiliar, y vapor o aire para promover la mezcla. La totalidad de la combustión en una antorcha está gobernada por la temperatura de la flama, el tiempo de residencia en la zona de combustión, el mezclado turbulento de los componentes de la corriente de gas para completar la reacción de oxidación, y oxígeno disponible para la formación de radicales libres. La combustión es completa si todo el  $\text{CH}_4$  es convertido a  $\text{CO}_2$  y agua. La combustión incompleta tiene como consecuencia que algunos de los COV no sean alterados o sean convertidos a otros compuestos orgánicos tales como aldehídos o ácidos.

Si el gas que sale de una chimenea no es capaz de combustionarse por sí sola, ya sea por un bajo flujo de gas o niveles mínimos de metano, se puede realizar una colección del gas de las diferentes chimeneas y conducirlos a una antorcha general. La combustión o el quemado es más eficiente cuando el gas de relleno sanitario contiene por lo menos 20% de metano en volumen, a esta concentración de metano, el gas forma una mezcla combustible con el aire ambiente, solo faltaría una fuente de ignición para operar la antorcha, si el gas contiene menos del 20 % de metano en volumen, se requiere un combustible adicional para iniciar la quema incrementando mucho los costos.

Las antorchas se categorizan por lo general de dos maneras: (1) por la altura de la boquilla de la antorcha (esto es, al nivel del suelo o elevadas), y (2) por el método de mejorar el mezclado en la boquilla de la antorcha (esto es, asistidas por vapor, aire o presión, o no asistidas). La elevación de la antorcha puede evitar condiciones potencialmente peligrosas al nivel del suelo donde la flama abierta (o sea, la fuente de ignición) está localizada cerca de una unidades susceptibles a incendiarse.

En la mayoría de las antorchas, la combustión ocurre por medio de una flama de difusión. Una flama de difusión es aquella en la cual el aire se difunde a través del límite entre la corriente de combustible y la corriente del producto de combustión hacia el centro del flujo de combustible, formando la envoltura de una mezcla combustible alrededor de un núcleo de gas

combustible. Esta mezcla, al encendido, establece una zona de flama estable alrededor del núcleo de gas sobre la boquilla del quemador. Este núcleo interno de gas es calentado por la difusión de los productos de combustión desde la zona de la flama. El craqueo puede ocurrir con la formación de pequeñas partículas calientes de carbón que imparten a la flama su luminosidad característica. Si existe una deficiencia de oxígeno y si las partículas de carbón son enfriadas por debajo de su temperatura de ignición, se genera humo. En flamas grandes de difusión, se pueden formar vórtices de producto alrededor de las porciones encendidas del gas y obturar el suministro de oxígeno. Esta inestabilidad localizada causa la vacilación de la flama, el cual puede ser acompañado de la formación de hollín. Como en todos los procesos de combustión, se requiere un suministro de aire adecuado y un buen mezclado para completar la combustión y minimizar el humo. Los varios diseños de antorchas difieren principalmente en su realización del mezclado.

Los criterios generales para el diseño de los quemadores de biogás son los siguientes:

Suministro de aire: Para los quemadores a inducción natural, se debe calcular cuidadosamente la presión de la caja de mezclado a partir de sus dimensiones y la temperatura de los gases de combustión. El suministro de aire al quemador debe estar protegido contra las variaciones de la velocidad del aire que pueden causar apagones y regresos de flama.

Aire en exceso: Para una combustión completa, es necesario suministrar suficiente aire en exceso. Un buen diseño de quemador especifica el mínimo aire en exceso posible, compatible con los requerimientos de la combustión. De modo empírico se sabe que cada 10% de aire en exceso extra se traduce en una pérdida de 0.7% en términos de eficiencia.

Especificaciones de combustible: El diseño de quemadores está directamente ligado al tipo de combustible a ser quemado, algunas de las propiedades que deben conocerse claramente son; poder calorífico inferior, composición química promedio, presión y temperatura en el quemador.

Sistema de ignición: Se requiere un encendido suave en cualquier quemador por razones de seguridad. Los quemadores pueden ser encendidos manualmente o mediante el sistema de encendido comúnmente conocidos como piloto e inclusive mediante sistemas automáticos de tipo eléctrico.

La mejor propuesta es utilizar un quemador comercial. Al hacer la cotización del quemador se pedirá una serie de parámetros que no solo incluyen propiedades del biogás, sino que también se incluyen datos relacionados al sitio y además: temperatura del biogás,

composición del biogás, poder calorífico, presión del biogás al quemador, flujo del biogás, densidad y respecto a datos del sitio son: altura a nivel del mar, velocidad del viento, temperatura ambiente y zona sísmica.

## 4.5 Purificación del biogás.

El biogás contiene  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , trazas de  $\text{H}_2\text{S}$  e hidrocarburos clorados y generalmente se encuentran saturados de vapor de agua. Cuando el biogás es extraído del relleno se encuentra caliente y también, puede contener pequeñas cantidades de  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  proveniente del aire atmosféricos.

La purificación del biogás es importante por dos razones principales: (1) para aumentar el poder calorífico del biogás y, (2) cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, etc.)

Es importante determinar las concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  presentes en la mezcla, puesto que solo en el caso de que este sea muy baja, es posible eliminar el sistema de tratamiento o limpieza, dejando únicamente un equipo para eliminar la humedad presente en el biogás.

El sistema de tratamiento del biogás incluirá remoción de humedad y de partículas.

### 4.5.1 Eliminador de humedad

A continuación se muestra un método para el secado por medio de un condensador Figura 4- 11.

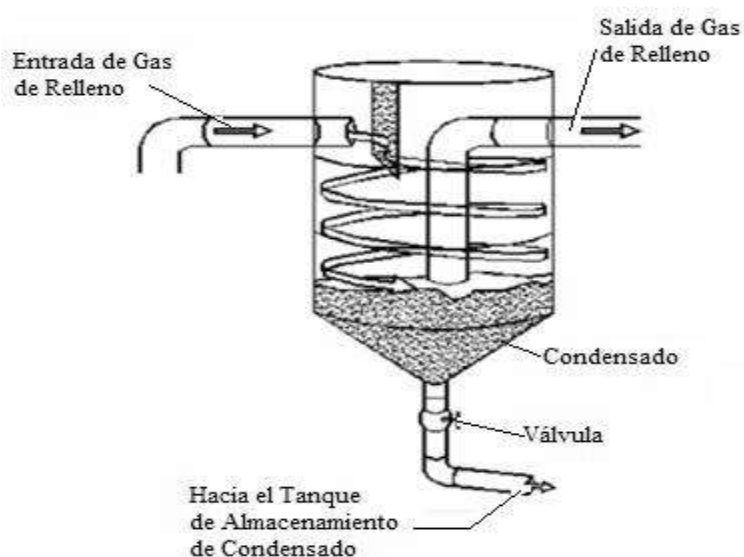


Figura 4-9 Eliminador de humedad.

#### 4.5.2 Eliminación del H<sub>2</sub>S.

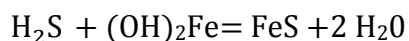
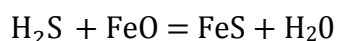
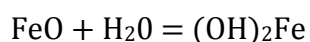
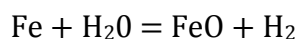
Este compuesto al reaccionar con agua se convierte en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. El H<sub>2</sub>S es posiblemente el compuesto que causa mayores problemas, ya que es extremadamente venenoso y al quemarse forma óxidos de azufre con los riesgos de corrosión y contaminación que conlleva.

Existen diferentes métodos para reducir o eliminar el contenido de H<sub>2</sub>S en gases. El tratamiento convencional, consistente en la precipitación del H<sub>2</sub>S mediante lechada de cal, nos parece poco práctico, ya que representa un coste de vertido muy alto, ya que se producen grandes cantidades de residuos a verter, y si el gas contiene CO<sub>2</sub> éste gas reacciona también con la cal aumentando el volumen de residuos a tratar, el sistema consiste en un sistema de lavado, en una torre con agua y cal. La Ca(OH)<sub>2</sub> (Cal hidratada) en contacto con el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S forma un compuesto que es insoluble y por lo tanto precipita, eliminándolo de la corriente de gas. Este precipitado pasará a la fase líquida. Para la optimización del sistema, el agua que se recoge por la parte inferior de la torre de lavado, mediante una bomba se recircula otra vez a la parte superior (ducha).

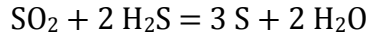
Para evitar la acumulación del precipitado, se instala un filtro para retenerlo. El gas, libre de contaminantes, sale por la parte superior del sistema, y pasa por un filtro de hierro mojado, para acabar de eliminar las pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>S, que pudieran quedar. También se puede dosificar NaHCO<sub>3</sub> (Bicarbonato de sodio) para la eliminación selectiva de H<sub>2</sub>S.

Otra forma de eliminar H<sub>2</sub>S es la filtración sobre limaduras de hierro. El filtro de acero es la tecnología más empleada para la eliminación de pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico presentes en el biogás.

Las reacciones son:



Una alternativa algo más compleja pero que consideramos mejor es la precipitación del SH<sub>2</sub> como azufre elemental utilizando anhídrido sulfuroso gaseoso. Químicamente el proceso es el siguiente:



De esta forma, el subproducto obtenido, azufre elemental, es valorizable. (En tratamiento de residuos rara vez se realiza un negocio económicamente hablando, y lo que se pretende es disminuir los costes). Por cada Kg de  $\text{H}_2\text{S}$  eliminado se obtienen 1.9 Kg de **S** (Azufre) elemental.

## 4.6 Conversión de energía calorífica a eléctrica.

### 4.6.1 Turbina de gas.

Las turbinas de gas tienen un gran rango de aplicaciones en plantas industriales para el manejo de equipos como compresores y bombas, además de las utilidades eléctricas en la generación de energía.

El principio de una turbina de gas se muestra en la Figura 4-10 y la Figura 4-11. El aire comprimido (generalmente de 10 a 25 bars) reacciona con el gas combustible inyectado. Los gases calientes del combustible se expanden en la turbina, impulsando así el generador.

El diseño de dos ejes de la Figura 4-11 incrementa la flexibilidad del sistema, ya que permite diferentes velocidades de rotación en el compresor y el generador.

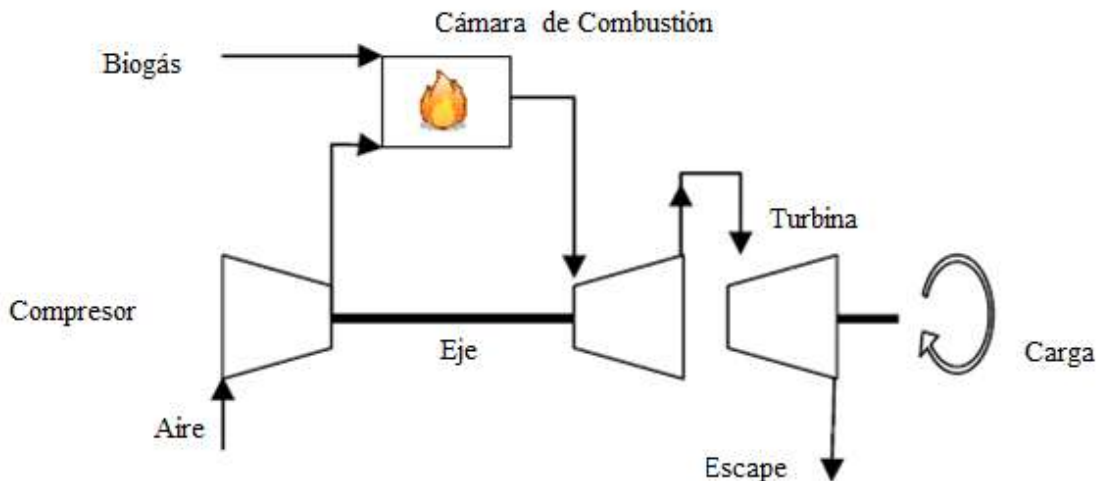


Figura 4-10 Principio de una turbina de gas.

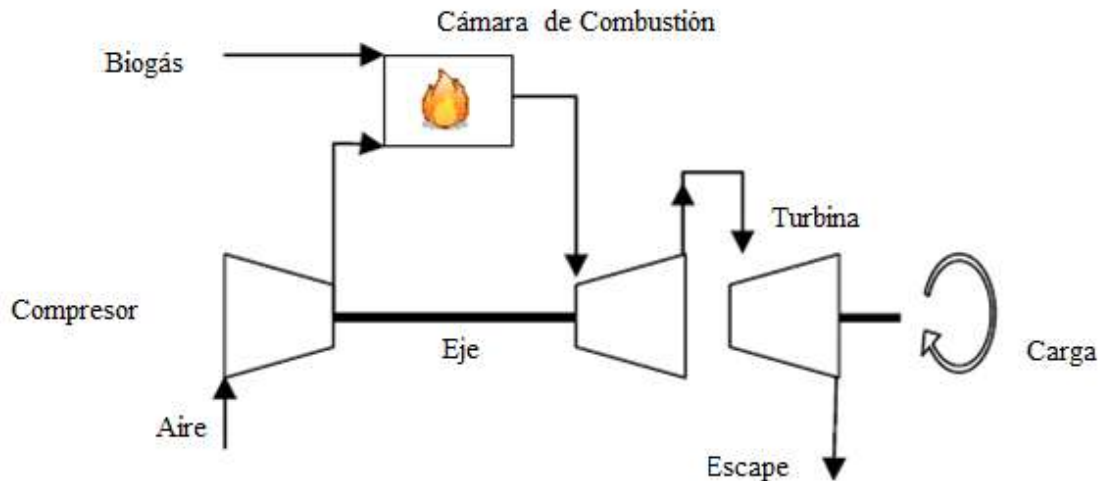


Figura 4-11 Diseño de dos ejes.

Los gases provenientes de la cámara de combustión que llegan a la turbina tienen una temperatura elevada (superior a los  $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mayor que la temperatura del vapor (de  $525$  a  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Por lo tanto la eficiencia termodinámica es elevada con las turbinas de gas. Los desarrollos recientes en turbinas de gas a gran escala permiten una eficiencia de más del 40%. Para turbinas de gas a escala media y baja los porcentajes de eficiencia son del 20 al 35%.

La eficiencia se incrementa recuperando el calor expulsado del escape, esto se realiza calentando el aire proveniente del compresor como se ve en la Figura 4-12.

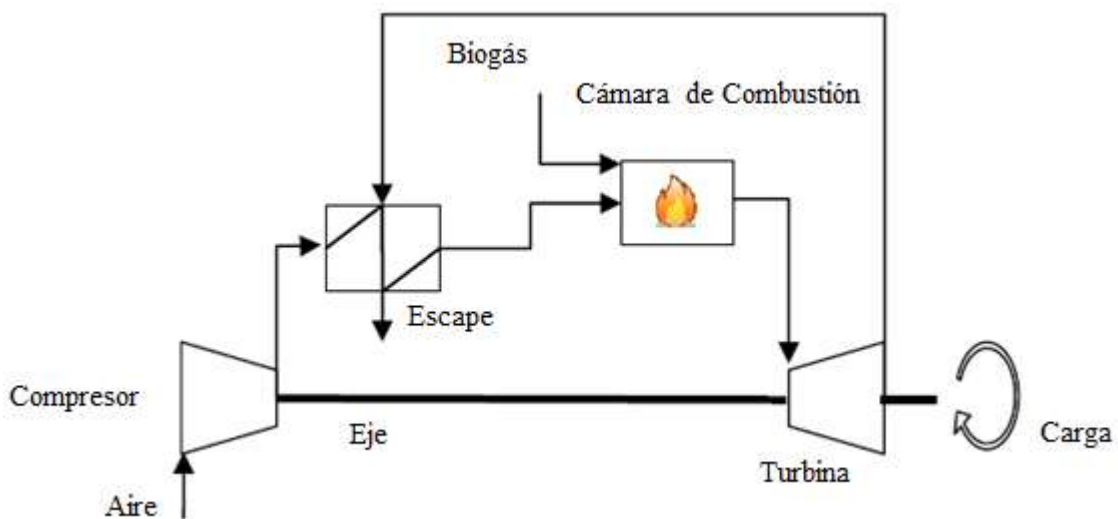


Figura 4-12 Turbina de gas con incremento de eficiencia.

El consumo de energía del compresor disminuye cuando se aplican enfriadores intercalados entre dos o más compresores (enfriamiento por aire o agua), reduciendo la temperatura y volumen del gas, y por consecuencia su compresión. Una opción adicional para incrementar la eficiencia de la turbina es recalentar los gases provenientes de una primera turbina. La recuperación del calor, el sistema de enfriamiento en los compresores y el recalentamiento de una primera turbina son los elementos de un sistema de generación completo y a gran escala con combustible biogás, y se muestra en la Figura 4-13.

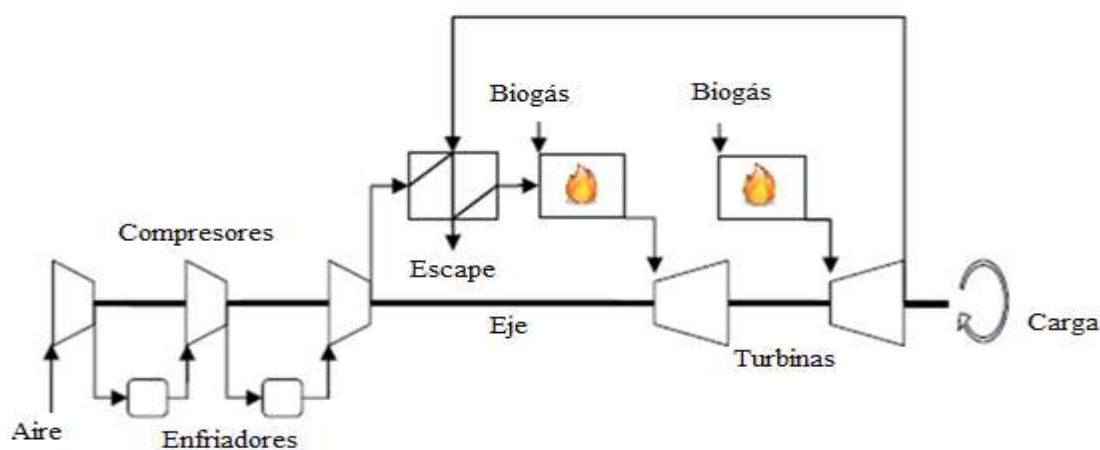


Figura 4-13 Sistema de generación completo con combustible biogás.

La combustión de gases con bajo poder calorífico en una turbina incrementa requerimientos al diseño de la conexión compresor – cámara de combustión. El valor mínimo calorífico del biogás es 5 a 7 veces menor que el de gas natural. Por lo tanto, para obtener temperaturas equivalentes la cantidad de combustible se debe incrementar sustancialmente.

Esto significa que la cantidad de biogás suministrado y las corrientes de aire deben ser iguales, por lo que el control y mantenimiento de los inyectores de combustible son importantes.

El alto nivel de inactivos en el gas tiende a reducir el rango de inyección estable de aire y de combustible. Sin embargo esto se compensa por el alto contenido de hidrógeno en el gas, que hace posible la quema del combustible en rangos más amplios sin desestabilizar el sistema.

Cuando se utilizan gases presurizados la temperatura del combustible que recibe la turbina es mayor que la utilización convencional de gas (de 400 a 600 °C mayor), por lo que la selección de válvulas de control de combustible y los materiales del equipo e instrumentos debe considerar estas variaciones.

Pocas manufactureras ofrecen turbinas de gas adecuadas a la combustión de gas de baja temperatura, la Tabla 4-2 las muestra.

Tabla 4-2 Turbinas de gas adecuadas a gas de baja temperatura.

| TIPO DE TURBINA         | POTENCIA (MW) | EFICIENCIA (%) |
|-------------------------|---------------|----------------|
| Allison, Ruston         | 5             | 28             |
| Mitsubishi, MW151       | 21            | 24             |
| GE, Tipo 6              | 43            | 33             |
| Westinghouse, CW251     | 50            | 33             |
| GE, Tipo 6 <sup>a</sup> | 70            | 31             |

#### 4.6.2 Turbinas de vapor.

La aplicación de la energía térmica obtenida con este sistema de combustión es generar energía eléctrica utilizando un ciclo de vapor. Toda la cadena de transformación de la energía que incluye este ciclo se muestra en la Figura 4-14, y el proceso simplificado en la Figura 4-15.

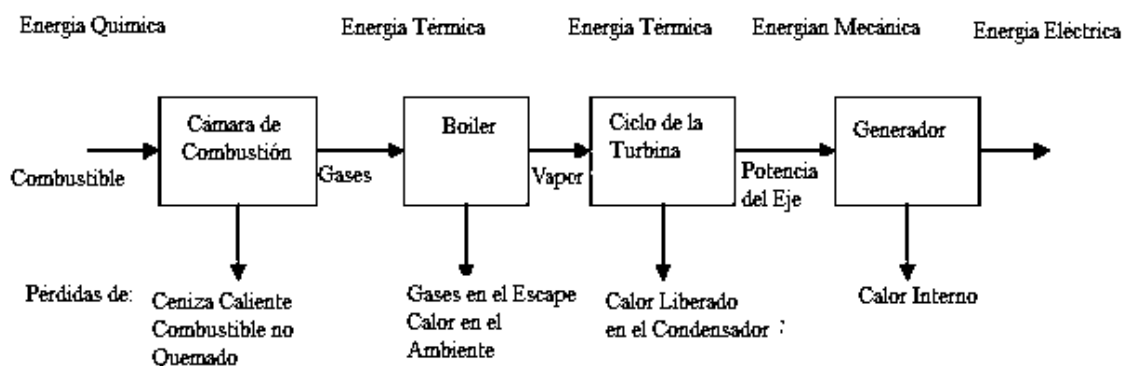


Figura 4-14 Cadena de transformación del ciclo de vapor.

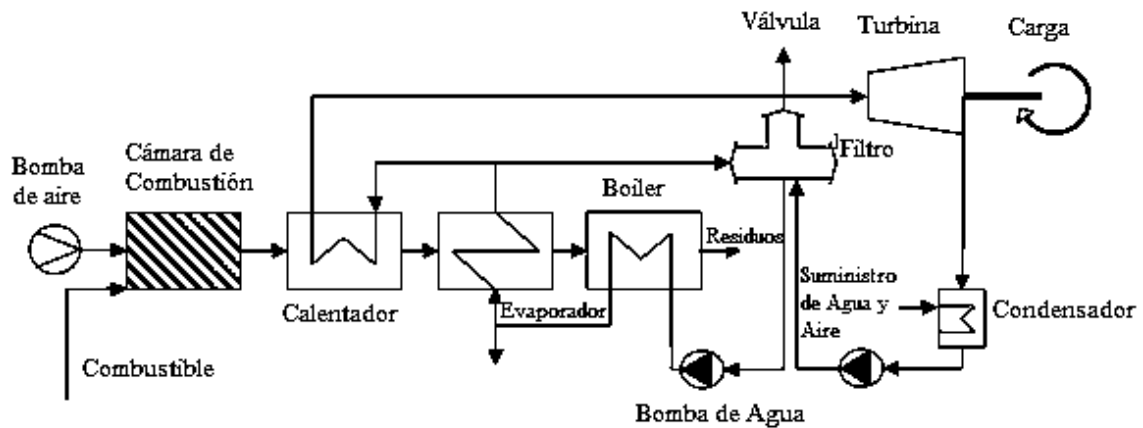


Figura 4-15 Proceso simplificado.

El ciclo se describe a continuación:

- La alimentación de agua hacia el boiler es suministrada por una bomba.
- En el boiler el agua es evaporada y calentada al máximo.
- El vapor se alimenta al sistema de la turbina, donde se expande con una baja presión y temperatura, determinadas por el condensador.
- El vapor expandido resultante (con algún contenido de agua) es enviado al filtro.
- En el filtro los gases no condensados se eliminan para prevenir la acumulación en alguna parte del sistema. Este filtro necesita operar a cierta temperatura, por lo que está conectado al calentador para este propósito.

Este sistema es ideal para necesidades bajas de energía eléctrica (menores a 500 KW (Kilowatt)). Incluso en ciclos de operación más sencillos se omite el condensador y simplemente se escapa el vapor expandido. De acuerdo a los principios fundamentales de la termodinámica es imposible convertir toda la energía térmica en potencia mecánica para generar electricidad. En el ciclo de vapor esta ley se manifiesta por el hecho inevitable de que el vapor de agua se tiene que condensar para cerrar el ciclo.

La eficiencia del ciclo se determina por los siguientes factores:

- Eficiencia del boiler.
- Condiciones del vapor que entra a la turbina (con la temperatura y presión más alta posible).
- Eficiencia de la turbina.

- Condiciones de enfriamiento en el condensador (con la temperatura y presión más baja posible).
- Sistema de alimentación de agua.

Algunos equipos del sistema utilizan energía eléctrica (la bomba de alimentación de agua y la de aire) conocida como potencia parásita. La eficiencia total del sistema se muestra en la ecuación (4-2).

$$\eta_{tot} = \frac{\text{Energía entregada a la red eléctrica}}{\text{Entrada de combustible}} \quad (4-3)$$

Donde:

$$\eta_{tot} = \text{Eficiencia total de sistema} \quad (4-4)$$

$$\text{Energía entregada} = (\eta_{cam} * \eta_{boil} * \eta_{gener} * \phi_{combust} * PCM_{combust}) - P_{parásita} \quad (4-5)$$

$$\text{Entrada de combustible} = \eta_{combust} * PCM_{combust} \quad (4-6)$$

$$\eta_{cam} = \text{Eficiencia de la cámara de combustion} \quad (4-7)$$

Donde:

$\eta_{boil}$  = Eficiencia del boiler.

$\eta_{gener}$  = Eficiencia del generador.

$\eta_{combust}$  = Masa total del combustible a utilizar.

$PCM_{combust}$  = Poder calorífico mínimo del combustible.

$P_{parásita}$  = Pérdidas parásitas.

#### 4.6.3 Motores de combustión interna.

El motor de combustión interna es la tecnología más utilizada en rellenos sanitarios para la recuperación energética del biogás. Aproximadamente el 80% de los 330 proyectos de energía de biogás de rellenos sanitarios actualmente operando en EE.UU. los usan (Methane Outreach Program, EPA). Este tipo de motores son eficientes y más baratos que otras alternativas, y se recomiendan para aquellos proyectos capaces de generar entre 1 y 4MW. Además, tienen la

ventaja de que se encuentran disponibles en diferentes tamaños los que pueden irse adicionando al sistema respondiendo a los incrementos en la generación de gas.

#### **Ventajas y desventajas al utilizar motores de combustión interna.**

- Solo es necesario eliminar el contenido de ácido sulfúrico.
- El costo de inversión es relativamente bajo, pues además del equipo y dispositivos básicos solo se requiere del motor de combustión interna.
- El uso para la generación de electricidad puede ayudar al abastecimiento de energía a localidades cercanas, o bien para las mismas instalaciones que se proyectan construir en el sitio de disposición final.
- El costo de producción y mantenimiento es bajo comparado con otras posibilidades de uso como la producción de metanol o de combustibles para automóviles

#### **Desventajas al utilizar motores de combustión interna:**

- El motor de combustión interna debe sufrir variaciones en el sistema de carburación.
- El motor también debe estar diseñado para funcionar en forma dual en cuanto a quemado de combustible, para cubrir las fluctuaciones tanto de suministro como poder calorífico.
- Pueden existir restricciones políticas en cuanto a la integración a la red pública o a la generación.

#### **4.6.4 Motores a gas.**

Los motores a gas mecánicamente son idénticos a los motores de combustión a gasolina, la diferencia radica en la admisión del combustible. En los motores a gas, esta admisión se realiza por medio de una válvula que regula la presión con la que se inyecta el gas licuado directamente en el carburador.

Las modificaciones que se deben realizar a este motor para utilizarlo en la generación de electricidad a partir del consumo de biogás, es modificar levemente la presión de inyección del gas, para que se ajuste a las condiciones del biogás. El porcentaje de sustitución de biogás por gas GLP (Gas licuado del petróleo) es del 100%. Así, se puede realizar una conexión de la tubería de biogás al sistema, de modo que el equipo pueda operar con ambos combustibles. Por el tipo de sistema de alimentación, estas adaptaciones no permiten una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe de realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión.

Se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrado por el generador.

Para el caso de cargas variables el flujo de gas hacia el motor se debe regular por medio de un sistema de control especialmente diseñado, que garantice el flujo del gas al motor para responder a las diferentes demandas de potencia generados por las cargas aplicadas.

#### **4.6.5 Motores a Gasolina.**

El motor a gasolina puede ser operado con biogás realizándole una simple adaptación, que consiste en colocar entre el filtro del aire y el carburador una “T” por donde se suministra el gas al sistema. Se debe de tener ciertas consideraciones para que un motor a gasolina, alimentado con biogás opere satisfactoriamente:

- Evitar el paso de gasolina cuando el motor va a operar o está operando con biogás, esto con el fin de evitar un gasto innecesario de combustible. Para lograrlo se debe de colocar una válvula para controlar el paso de la gasolina al carburador.
- Garantizar un suministro de biogás a presión constante.
- El filtro del aire debe de mantenerse limpio para mantener una constata relación entre la mezcla de biogás y aire que nos garantice una operación estable del motor.
- Colocar una válvula para controlar la admisión del gas al motor.

Al ser alimentado con biogás, directamente al múltiple de admisión el motor no permite una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe de realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión. Se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrada por el generador.

Para el caso de cargas variables, el flujo de gas hacia el motor se debe regular con un sistema de control especialmente diseñado, que garantice que el flujo del gas que se inyecte en el motor pueda responder a las diferentes demandas de potencia debido a las variaciones de carga eléctrica, provocada por el constante entrar y salir de cargas.

#### **4.6.6 Motores a diesel.**

Los Generadores a Gas con motor Diesel es la tecnología más utilizada. Para realizar estas adaptaciones se debe de colocar una “T” entre el filtro y el sistema de admisión del aire, donde se

conecta la tubería del biogás. Se debe de instalar una válvula en esta tubería para regular el suministro del biogás y ajustarlo al porcentaje requerido de operación.

Los motores a diesel, se pueden operar con una sustitución del diesel por biogás hasta un 70%, y un consumo de diesel del 30% restante por lo que el motor no sufre ninguna alteración al consumir los dos tipos de combustible al mismo tiempo

La baja capacidad de ignición del biogás no permite reemplazar la totalidad del gas-oíl en este tipo de motores que carecen de bujía para la combustión.

El gas es succionado junto con el aire de combustión hacia el cilindro, Figura 4-18.

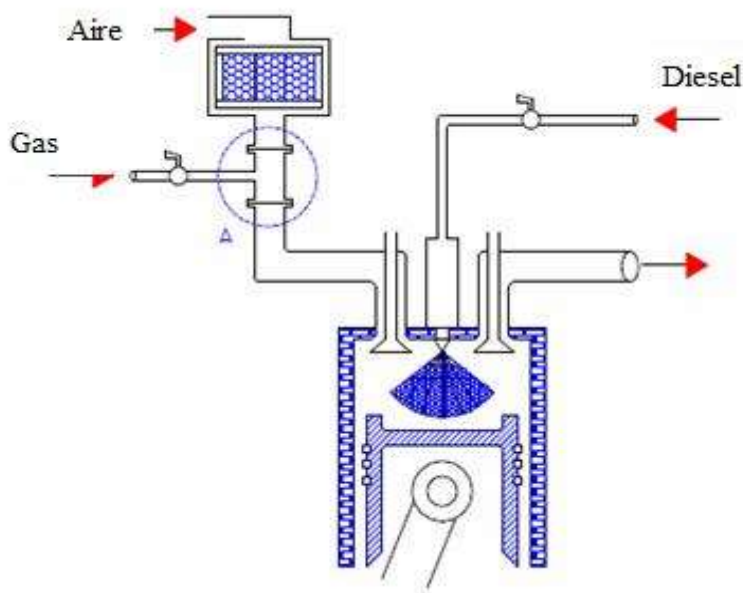


Figura 4-16 Motor a diesel.

Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diesel, una vez arrancado el motor se realiza la transferencia de biogás gradualmente, hasta alcanzar el 70%. No es recomendable la sustitución mayor a un 70% de biogás por diesel porque puede dañar el motor.

#### 4.6.7 Generador síncrono.

Una vez que se obtiene la energía mecánica se acopla a un generador. Las máquinas eléctricas más comunes acopladas a un sistema de generación por biomasa son los generadores síncronos. Se les llama síncronas a estas máquinas porque tienen dos campos magnéticos, uno en el estator originado por la circulación de corriente alterna y el otro en el rotor, que en la mayoría de los casos es generado por corriente continua. Cuando estos dos campos magnéticos giran en el mismo sentido y con la misma velocidad están sincronizados. Los generadores síncronos o

alternadores son máquinas síncronas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna.

En un generador síncrono se aplica una corriente directa al devanado del rotor, lo cual produce un campo magnético en el rotor. Enseguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de tensiones trifásicas dentro de los devanados del estator del generador.

Los términos más comunes utilizados para describir los devanados de una máquina son devanado de campo y devanado del inducido, el término devanado de campo se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina y el término de devanados del inducido se aplica a los devanados en donde se induce la tensión principal.

En las máquinas síncronas los devanados de campo están en el rotor, por lo que los términos devanados del rotor y devanado de campo se utilizan indistintamente, de manera similar los términos devanado del estator y devanados del inducido se utilizan indistintamente.

El rotor del generador síncrono es en esencia un electroimán grande donde los polos magnéticos pueden ser salientes o no salientes. Por lo regular los rotores de polos no salientes se utilizan para rotores de 2 a 4 polos mientras que los rotores de polos salientes se utilizan para rotores de 4 o más polos. Debido a que el rotor está sometido a campos magnéticos variables se construyen con láminas delgadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas. Se debe suministrar una corriente directa al circuito de campo del rotor. Ya que el rotor está girando se requiere de un arreglo especial para que la potencia llegue a los devanados de campo. Existen dos formas de suministrar esta potencia:

- Suministrar al rotor la potencia desde una fuente externa de corriente directa por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Suministrar la potencia desde una fuente de potencia de corriente directa especial montada directamente en el eje del generador síncrono

Los anillos rozantes están hechos de metal que circundan por completo el eje de una máquina, pero se encuentran aislados de él. Un extremo del devanado del rotor de corriente directa está unido a cada uno de los dos anillos rozantes en el eje de la máquina síncrona y una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante.

Una escobilla es un bloque compuesto de carbono el cual conduce electricidad libremente pero tiene una fricción muy baja, por lo que no desgasta al anillo rozante. Si el extremo positivo de

una fuente de tensión de corriente directa se conecta a una escobilla y el extremo negativo a la otra, entonces se aplicará la misma tensión al devanado de campo en todo momento sin importar la posición angular o velocidad del rotor.

Los anillos rozantes y las escobillas causan algunos problemas al suministrar potencia de corriente directa a los devanados de campo de una máquina síncrona ya que cuando sucede esto se incrementa la cantidad de mantenimiento que requiere la máquina debido al desgaste de las escobillas. Además, la caída de tensión en las escobillas es la causa de pérdidas significativas de potencia en las máquinas que tienen corrientes de campo más grandes.

A pesar de estos inconvenientes, los anillos rozantes y las escobillas se utilizan en todas las máquinas síncronas pequeñas, ya que no hay otro método para suministrar la corriente de campo que sea tan eficiente en términos de costo.

En los generadores más grandes se utilizan excitadores o excitatrices sin escobillas para suministrar a la máquina la corriente directa de campo.

Un excitador sin escobillas es un generador pequeño de corriente alterna con un circuito de campo montado en el estator y un circuito de armadura montado en el eje del rotor.

La salida trifásica del generador excitador se rectifica a corriente directa por medio de un circuito rectificador trifásico y luego se alimenta al circuito de campo de corriente directa principal. Por medio del control de la pequeña corriente de campo del generador excitador es posible ajustar la corriente de campo en la máquina principal sin anillos rozantes ni escobillas.

Este arreglo se muestra en la Figura 4-19. Debido a que no se presenta ningún contacto mecánico entre el rotor y el estator, los excitadores sin escobillas requieren mucho menos mantenimiento que los anillos rozantes y las escobillas.

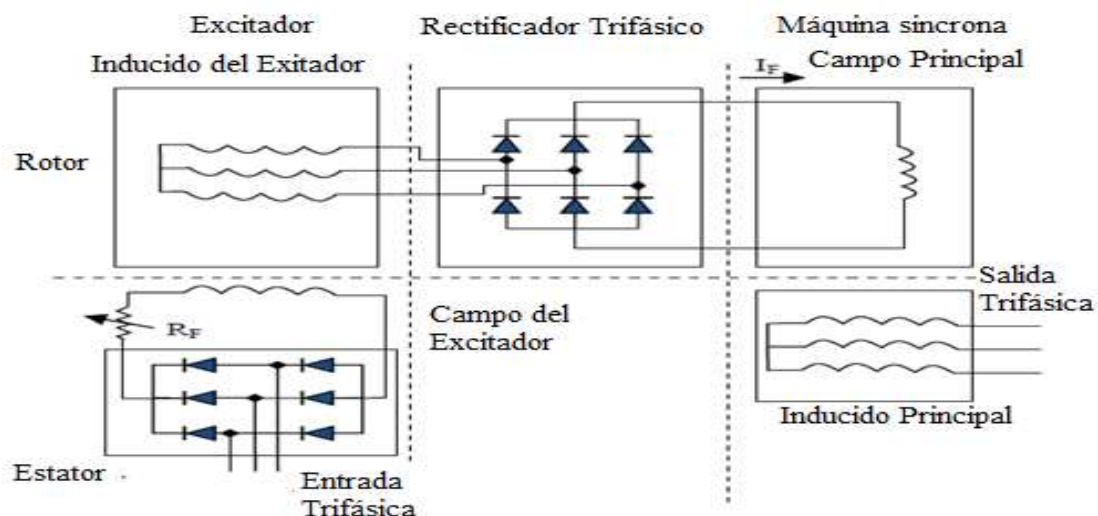


Figura 4-17 Arreglo de un generador con excitador sin escobillas.

Para que la excitación de un generador sea completamente independiente de cualquier fuente de potencia externa, a menudo se incluye un pequeño excitador piloto en el sistema. Un excitador piloto es un pequeño generador de corriente alterna con imanes permanentes montados en el eje del rotor y un devanado trifásico en el estator. Produce la potencia para el circuito de campo del excitador, que a su vez controla el circuito de campo de la máquina principal.

Si se incluye un excitador piloto en el eje del generador, entonces no se requiere de potencia eléctrica externa para accionar el generador, como se muestra en la Figura 4-18.

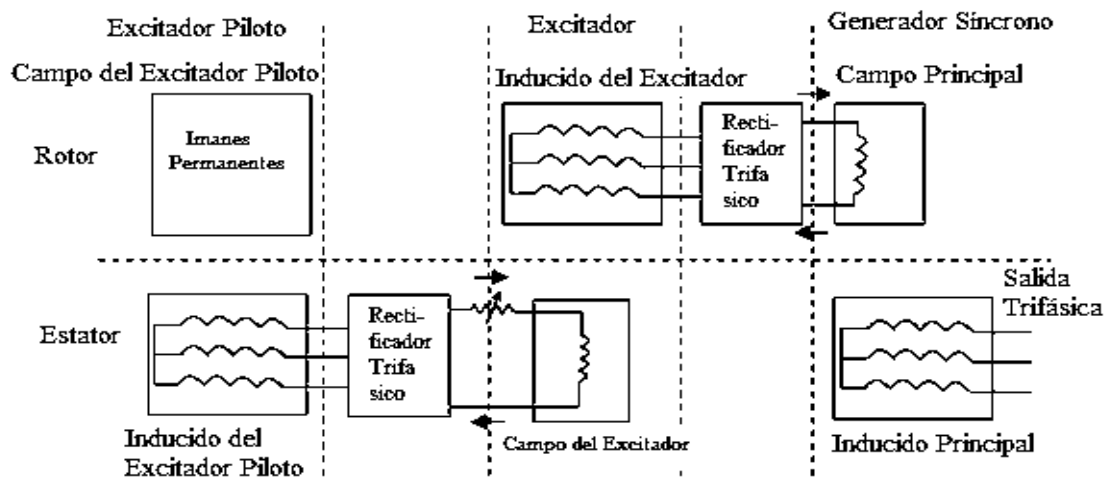


Figura 4-18 Generador con excitador piloto.

Muchos de los generadores síncronos que incluyen excitadores sin escobillas también tienen anillos rozantes y escobillas, por lo que hay una fuente auxiliar de corriente directa de campo en caso de emergencia.

### Velocidad de rotación.

Estos generadores son por definición síncronos, lo que quiere decir es que la frecuencia eléctrica se produce y entrelaza o sincroniza con la tasa mecánica de rotación del generador. El rotor de un generador síncrono consta de un electroimán al que se le suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en la dirección en que gira el rotor, la tasa de rotación de los campos magnéticos en la máquina está relacionada con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la ecuación (4-8).

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (4-8)$$

Donde:

$f_e$  = Frecuencia en Hz.

$n_m$  = Velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad de la máquina síncrona).

$P$  = Número de polos.

La tensión interna generada por un generador síncrono depende del flujo  $\phi$  en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina como se ve en la ecuación (4-9).

$$E_A = K\phi\omega$$

(4-10)

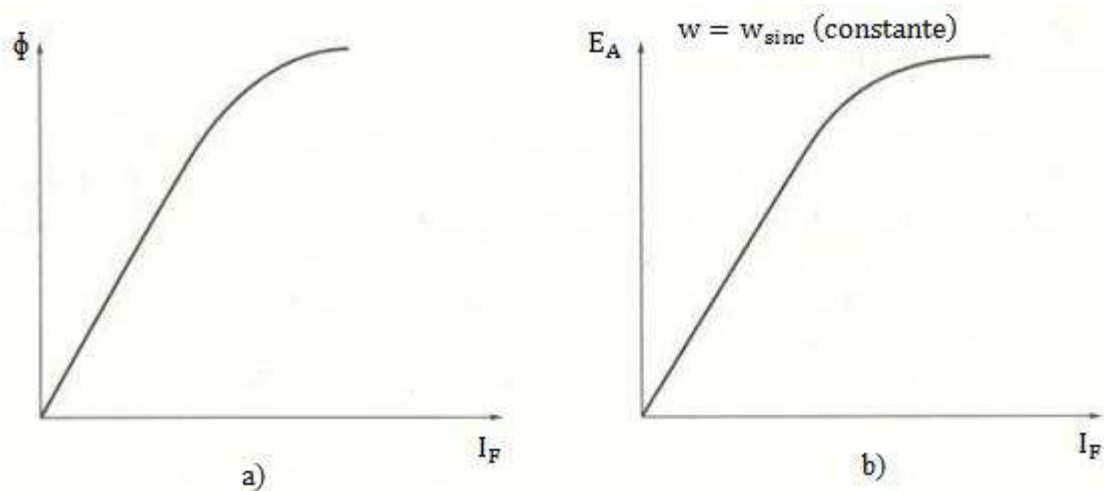
Donde  $K$  es una constante que representa la construcción de la maquina. Si  $\omega$  se expresa en radianes eléctricos por segundo entonces:

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (4-11)$$

Mientras que si  $\omega$  se expresa en radianes mecánicos por segundo, entonces

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (4-12)$$

La tensión interna generada  $E_A$  es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en sí depende de la corriente que fluye por el circuito de campo del rotor. La Figura 4-19 muestra la curva de magnetización o característica de circuito abierto de la máquina.



a) Flujo contra corriente de campo en un generador síncrono.

b) Curva de magnetización de un generador síncrono.

Figura 4-19 Gráfica de la curva de magnetización del circuito abierto del generador.

**Circuito equivalente.**

La tensión  $E_A$  es la tensión interna generada en una fase de un generador síncrono. Sin embargo, esta tensión  $E_A$  no es la tensión que se presenta en los terminales del generador. De hecho, el único momento en que la tensión  $E_A$  es igual a la tensión  $V_\phi$  de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina.

Existen varios factores que ocasionan la diferencia entre  $E_A$  y  $V_\phi$ :

- La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción de inducido.
- La autoinducción de las bobinas del inducido (o armadura).
- La resistencia de las bobinas del inducido.
- El efecto de la forma del rotor de polos salientes.

La máquina que se analiza en el presente trabajo tiene rotores de polos no salientes o cilíndricos. Partiendo de esto las respuestas que se obtengan serán un poco inexactas si se considera una máquina de polos salientes, pero los errores son relativamente pequeños.

El primer efecto mencionado, y normalmente el más grande, es la reacción de inducido. Cuando gira el rotor de un generador síncrono, se induce una tensión  $E_A$  en los devanados del estator del generador. Si se añade una carga a las terminales del generador, la corriente fluye pero el flujo de corriente de un estator trifásico produce su propio campo magnético en la máquina, este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera la tensión de fase resultante. A este efecto se le llama reacción de inducido porque la corriente del inducido (estator) afecta el campo magnético que lo produjo en primera instancia.

Para entender la reacción del inducido hay que visualizar Figura 4-20 a) muestra un rotor bipolar girando dentro de un estator trifásico. No hay ninguna carga conectada al estator. El campo magnético del rotor  $B_R$  produce una tensión interna generada  $E_A$  cuyo valor pico coincide con la dirección de  $B_R$ . Si el generador no tiene carga, no hay flujo de corriente en el inducido y, por lo tanto,  $E_A$  será igual a la tensión de su fase.

En la Figura 4-20 b) el generador se conecta a una carga con un factor de potencia en retraso. Debido a que la carga está en retraso, la corriente pico se presenta en un ángulo detrás de la tensión pico.

La corriente que fluye en los devanados del estator produce su propio campo magnético. A este campo magnético del estator se le llama  $B_S$  y su dirección se obtiene por medio de la regla de la mano derecha como se observa en la Figura 4-20 c). El campo magnético del estator  $B_S$  produce su propia tensión en el estator y a esta tensión se le llama  $E_{\text{estat}}$ .

Con dos tensiones presentes en los devanados del estator, la tensión total en una fase es simplemente la suma de la tensión interna generado  $E_A$  más la tensión de reacción del inducido  $E_{\text{estat}}$

$$V_\phi = E_A + E_{\text{estat}} \quad (4-13)$$

El campo magnético neto  $B_{\text{net}}$  es simplemente la suma de los campos magnéticos del rotor y del estator:

$$B_{\text{net}} = B_R + B_S \quad (4-14)$$

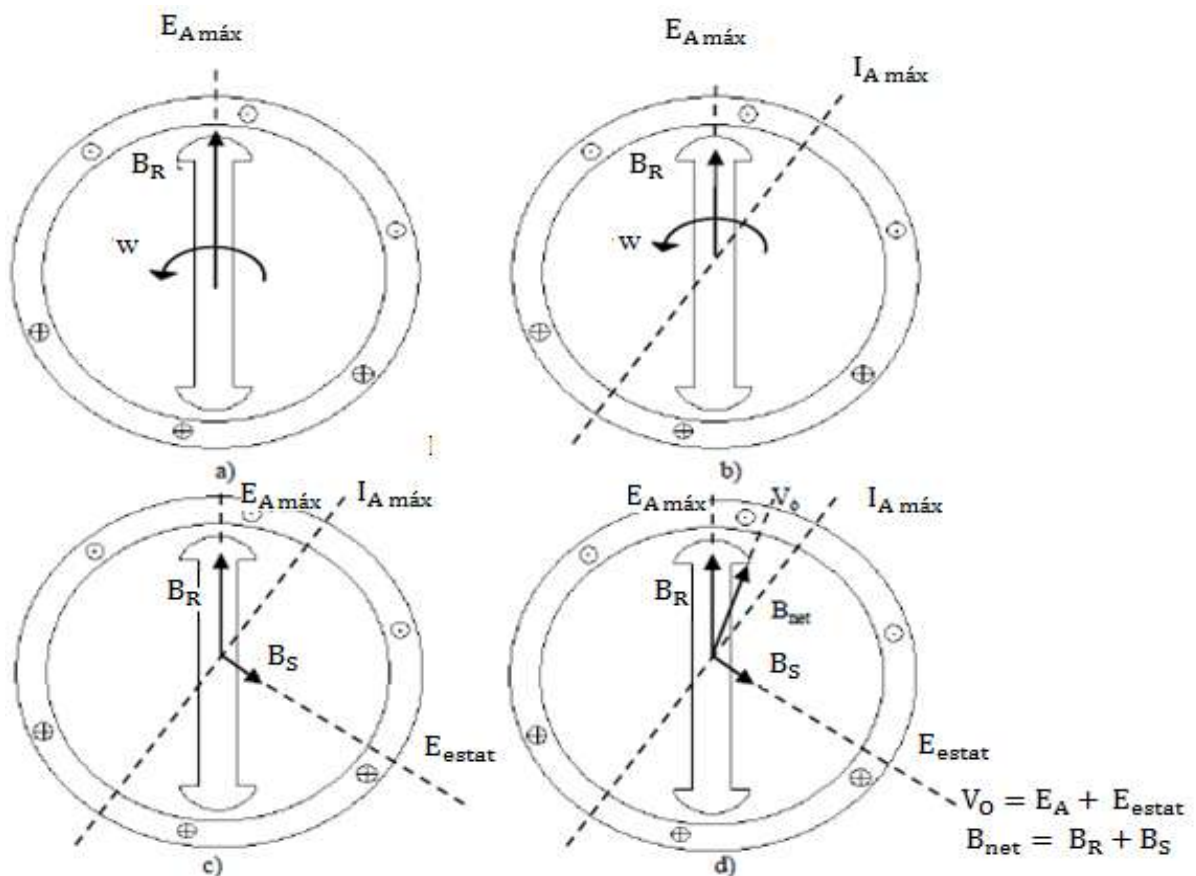


Figura 4-20 Reacción del inducido en un rotor de dos polos.

En la Figura 4-21 se aprecia el circuito equivalente completo de un generador de ese tipo. Esta figura muestra una potencia de corriente directa que suministra potencia al circuito de campo del rotor que se modela por medio de la inductancia y resistencia en serie de la bobina. Un resistor ajustable  $R_{ajust}$  está conectado en serie con  $R_F$  y este resistor controla el flujo de corriente de campo.

El resto del circuito equivalente consta de los modelos de cada fase. Cada fase tiene una tensión interna generada con una inductancia en serie  $X_S$  y una resistencia de serie  $R_A$ . Las tensiones y corrientes de las tres fases están separadas por 120 grados, pero en todo lo demás son idénticos.

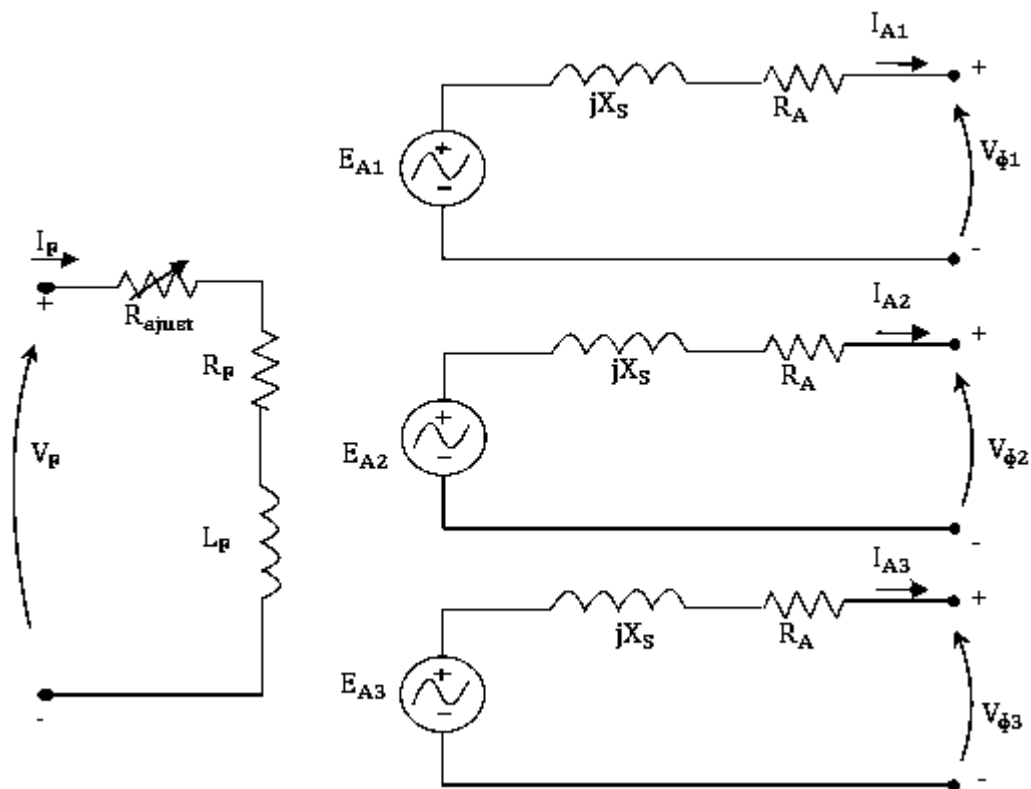


Figura 4-21 Circuito equivalente del generador.

Como se muestra en la Figura 4-22 estas tres fases se conectan en Y o  $\Delta$ . Si se conectan en Y, entonces la tensión del terminal  $V_T$  está relacionada con la tensión de fase por la siguiente ecuación:

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi \quad (4-15)$$

Si se conecta en  $\Delta$  entonces  $V_T = V_\phi$ .

Normalmente, el hecho de que las tres fases de un generador síncrono sean idénticas en todos aspectos menos en el ángulo de fase lleva a la utilización de un circuito por fase.

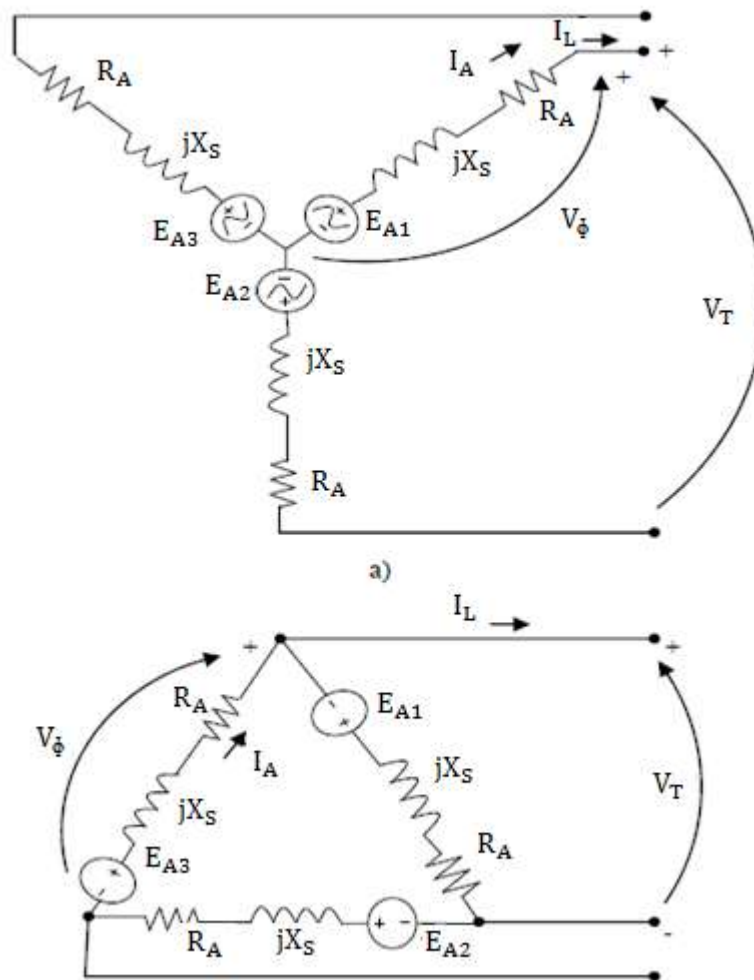


Figura 4-22 Conexión trifásica del generador (Y y  $\Delta$ ).

### Eficiencia del generador síncrono.

Durante la conversión de energía mecánica a eléctrica se crea energía calorífica que no se utiliza. Una máquina ideal sería aquella en la cual toda la energía mecánica se transformara en energía eléctrica o viceversa, pero no es posible por la ley de conservación de la energía.

En todas las máquinas eléctricas rotativas existen rozamientos entre partes mecánicas y los conductores están sometidos al efecto Joule, además de desarrollarse corrientes parásitas en

sus campos magnéticos. La importancia de estudiar las pérdidas en la máquina eléctrica a implementar en el sistema se debe a tres razones:

- Para determinar el rendimiento de la máquina y aprovechar al máximo su capacidad.
- Para evitar el máximo de pérdidas que originen calentamientos, que de ser elevados dan lugar a fallas más importantes.
- Para no tener caídas de tensión elevadas, ya que la regulación debe ser aceptable sobre todo si la energía sobrante se va a distribuir a algún otro sistema eléctrico.

Las pérdidas del generador síncrono son, fundamentalmente:

- Por fricción de las escobillas.
- Por ventilación de la máquina.
- Por histéresis.
- Por corrientes parásitas.

Los valores de las dos primeras son relativamente bajos y despreciables, la histéresis y las corrientes parásitas se deben a las características del material magnético. Estas pérdidas se determinan mediante una serie de pruebas.

Si se pone en marcha el grupo motor – generador, se toman las lecturas de tensión y corriente del motor de corriente continua con velocidad nominal para obtener la potencia de entrada, si este valor se multiplica por la eficiencia se tiene la potencia de salida; esta potencia de salida es la potencia de entrada del generador, y si no está excitada el valor son las pérdidas mecánicas.

La eficiencia en máquinas eléctricas es equivalente a rendimiento, por lo tanto es importante determinarla. Para el generador síncrono se utilizan las potencias de entrada y salida.

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}(P_s)}{\text{Potencia de entrada}(P_e)} \quad (4-16)$$

Pero la potencia de entrada es:

$$P_e = P_s + \text{Perdidas totales} \quad (4-17)$$

Entonces:

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + \text{Perdidas totales}} \quad (4-18)$$

Además la potencia de salida de un generador trifásico es:

$$P_s = \sqrt{3}VI \cos \phi \quad (4-19)$$

Sustituyendo la fórmula (4-18) en (4-17) se tiene:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} VI \cos \phi}{\sqrt{3} VI \cos \phi + \text{Perdidas totales}} \quad (4-20)$$

En general los equipos seleccionados para estos sistemas son pequeños comparados con los interconectados al sistema eléctrico nacional en México, por lo tanto su rendimiento es elevado.

## **4.7 Generación de energía eléctrica en el relleno sanitario de Morelia.**

### **4.7.1 Tiradero de Morelia.**

En todos los tiraderos es común la proliferación de fauna indeseable y emisión de gases, en ocasiones tóxicos, como  $\text{CH}_4$  y lixiviados generados en las 34 hectáreas del tiradero de Morelia. Dicho tiradero funcionó en el mismo punto desde 1984 hasta el 2007 no cumplía con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.

En la etapa de clausura del tiradero de Morelia se acomodaron tres millones de toneladas de residuos, se aplicaron más de cien metros cúbicos de material de cobertura, se construyeron 620 metros de drenes de lixiviados, se instalaron 32 pozos de captación de biogás.

### **4.7.2 El relleno sanitario de Morelia.**

En la ciudad de Morelia, Michoacán, la disposición final de basura se hace en un relleno sanitario, donde se concentra toda la variedad de desechos de vidrio, papel, plástico, metal, orgánicos y sanitarios. De los cuales solo aquellos que pueden representar un valor económico son rescatados para reciclarlos tales como; cartón, vidrio, metal y plástico.

El relleno sanitario de la ciudad de Morelia, Michoacán, se encuentra en el km 14 de la carretera Morelia-Quiroga, en un área porosa y volcánica. Presenta una pendiente aproximada de  $15^\circ$  con respecto a la ciudad de Morelia y está limitado al Este por un cono cinerítico de 60 metros de altura del cual se extraen arenas volcánicas y tobas que son la cubierta diaria de los residuos. El cono está sobreyacido por las lavas altamente fracturadas.

El relleno sanitario de Morelia opera desde 2007, recibe al día 950 toneladas de basura, en total, cerca de 354 mil toneladas al año el pesaje se hace con la balanza. A nivel nacional la media indica que se produce un kilo de basura diaria por persona, en Morelia son cerca de 900 gramos por día, ocupa un terreno de 16 hectáreas. Actualmente están instaladas ya dos celdas

(pirámides) compactadas de residuos sólidos, construida e impermeabilizada de acuerdo a la norma y una tercera celda empezó a funcionar en junio del 2012. En total lo que se tiene previsto para dentro de 15 años, son nueve celdas, cada una debe medir máximo 25 metros y tiene cinco capas de 5 metros piramidales cada una.

También cuenta con un sistema de control de lixiviados compuesto de drenes, cárcamo y una laguna de captación de cuatro mil 500 metros cúbicos de capacidad; incluye así más de 950 metros de caminos internos y de circulación, báscula de pesaje de 60 toneladas de capacidad totalmente computarizada y una red de captación de aguas pluviales de más de mil 200 metros, el relleno sanitario cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Proyecto para los 15 años que dura la concesión que la empresa Proactiva Medio Ambiente S.A de C.V. Contempla 42 hectáreas, por lo que aún restan 26 por conseguir. El Ayuntamiento de Morelia paga anualmente a la empresa Proactiva Medio Ambiente cerca de 44 millones de pesos.

#### **4.7.3 Predicción de la producción de biogás en Morelia Mich. Usando el modelo de biogás mexicano.**

Los datos utilizados son a partir del cierre de las 3 celdas en el año 2014 y 16 hectáreas de terreno y son datos ideales de cómo debería de llevarse a cabo el manejo de un relleno sanitario algunos ejemplos: impermeabilización adecuada, uso un sistema mecanizado para compactar los desechos, cobertura diaria, cobertura final, control de aguas fluviales y control de lixiviados etc. Los datos se pueden modificar según las variantes que pueda haber en el relleno sanitario de Morelia , en la hoja de alimentación se pueden ver los datos utilizados y los resultados que arroja la hoja de Excel se pueden analizar en resultados de tabla y resultados de grafica.

## Hoja de alimentacion.



**Methane to Markets**

Modelo Mexicano de Biogás v.2

Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU



| PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS |                                                                                             |                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| PAGINA DE ALIMENTACION                                                        |                                                                                             |                                            |
| 1                                                                             | Nombre del Sitio:                                                                           | Morelia                                    |
| 2                                                                             | Ciudad:                                                                                     | Morelia                                    |
| 3                                                                             | Estado:                                                                                     | Michoacán                                  |
| 4                                                                             | Región:                                                                                     | Oeste <span style="float: right;">2</span> |
| 5                                                                             | ¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión? | No                                         |
| 6                                                                             | Año de apertura del sitio:                                                                  | 2008                                       |
| 7                                                                             | Disposición anual del año mas reciente:                                                     | 354.000 Mg                                 |
| 8                                                                             | Año de disposición (arriba):                                                                | 2011                                       |
| 9                                                                             | Año de clausura o año de clausura proyectado:                                               | 2014                                       |
| 10                                                                            | Incremento anual estimado de la disposición:                                                | 1,0%                                       |
| 11                                                                            | Profundidad promedio del relleno sanitario:                                                 | 25 m                                       |
| 12                                                                            | Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:                                         | 2                                          |
| 13a                                                                           | ¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?                                          | No                                         |
| 13b                                                                           | Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total:                 | 0%                                         |
| 13c                                                                           | Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio:              | 1                                          |
| 14                                                                            | Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):                                   | 2014                                       |
| 15                                                                            | Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:                                    | 85%                                        |
| 16                                                                            | Porcentaje del área con residuos con cubierta final:                                        | 100%                                       |
| 17                                                                            | Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:                                   | 0%                                         |
| 18                                                                            | Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:                                       | 70%                                        |
| 19                                                                            | Porcentaje del área con residuos sin cobertura:                                             | -70%                                       |
| 20                                                                            | Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:          | 100%                                       |
| 21                                                                            | ¿Se compactan los residuos regularmente?                                                    | Si                                         |
| 22                                                                            | ¿La disposición de residuos se hace en una área específica?                                 | Si                                         |
| 23a                                                                           | Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?           | Si                                         |
| 23b                                                                           | Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?                        | Si                                         |
| 24                                                                            | Eficiencia de captura estimada:                                                             | 82%                                        |

Figura 4-25 Hoja de alimentación del relleno sanitario de Morelia.

**Disposición y recuperación de biogás.**



Modelo Mexicano de Biogás v.2

Fecha: Marzo 2009

**Methane to Markets**

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente

| DISPOSICION Y RECUPERACION DE BIOGAS |                                                       |                               |                                   |                                                                           |                                                                             |                                                                                  |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Año                                  | Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas) | Toneladas Métricas Acumuladas | Eficiencia del Sistema de Captura | Recuperación Actual de Biogás (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> ) | Recuperación de Biogás Estimada (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> ) | Línea Base de Recuperación de Biogás (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> ) |
| 2008                                 | 343.600                                               | 343.600                       | 0%                                |                                                                           | 0                                                                           | 0                                                                                |
| 2009                                 | 347.000                                               | 690.600                       | 0%                                |                                                                           | 0                                                                           | 0                                                                                |
| 2010                                 | 350.500                                               | 1.041.100                     | 0%                                |                                                                           | 0                                                                           | 0                                                                                |
| 2011                                 | 354.000                                               | 1.395.100                     | 0%                                |                                                                           | 0                                                                           | 0                                                                                |
| 2012                                 | 357.500                                               | 1.752.600                     | 0%                                |                                                                           | 0                                                                           | 0                                                                                |
| 2013                                 | 361.100                                               | 2.113.700                     | 0%                                |                                                                           | 0                                                                           | 0                                                                                |
| 2014                                 | 364.700                                               | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 2.165                                                                       | 0                                                                                |
| 2015                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 2.385                                                                       | 0                                                                                |
| 2016                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 2.036                                                                       | 0                                                                                |
| 2017                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 1.749                                                                       | 0                                                                                |
| 2018                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 1.512                                                                       | 0                                                                                |
| 2019                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 1.316                                                                       | 0                                                                                |
| 2020                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 1.154                                                                       | 0                                                                                |
| 2021                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 1.018                                                                       | 0                                                                                |
| 2022                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 905                                                                         | 0                                                                                |
| 2023                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 809                                                                         | 0                                                                                |
| 2024                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 728                                                                         | 0                                                                                |
| 2025                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 660                                                                         | 0                                                                                |
| 2026                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 601                                                                         | 0                                                                                |
| 2027                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 551                                                                         | 0                                                                                |
| 2028                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 507                                                                         | 0                                                                                |
| 2029                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 469                                                                         | 0                                                                                |
| 2030                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 436                                                                         | 0                                                                                |
| 2031                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 406                                                                         | 0                                                                                |
| 2032                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 380                                                                         | 0                                                                                |
| 2033                                 | 0                                                     | 2.478.400                     | 82%                               |                                                                           | 357                                                                         | 0                                                                                |

Figura 4-26 Disposición y recuperación de biogás.

## Caracterización de residuos



**Methane to Markets**

Modelo Mexicano de Biogás v.2

Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU

**TABLA DE CARACTERIZACION DE RESIDUOS EN LOS DIFERENTES ESTADOS DE MEXICO Y ESPECIFICOS AL SITIO**

| Categoría de Residuo                               | Datos Específicos al Sitio | Michoacán |
|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| Comida                                             | 38,4%                      | 34,5%     |
| Papel y Cartón                                     | 12,0%                      | 8,1%      |
| Poda (jardines)                                    | 8,0%                       | 10,6%     |
| Madera                                             | 1,0%                       | 4,6%      |
| Caucho, Piel, Huesos y Paja                        | 1,0%                       | 2,3%      |
| Textiles                                           | 4,0%                       | 2,3%      |
| Papel Higiénico                                    | 3,0%                       | 0,0%      |
| Otros Orgánicos                                    | 0,0%                       | 10,5%     |
| Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)      | 2,0%                       | 0,0%      |
| Metales                                            | 3,0%                       | 27,0%     |
| Construcción y Demolición                          | 10,0%                      | 0,0%      |
| Vidrio y Cerámica                                  | 5,0%                       | 0,0%      |
| Plásticos                                          | 10,0%                      | 0,0%      |
| Otros Inorgánicos                                  | 2,6%                       | 0,0%      |
| Porcentaje de degradación muy rápida (1)           | 38,8%                      | 45,0%     |
| Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2) | 11,0%                      | 10,6%     |
| Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)  | 16,0%                      | 10,5%     |
| Porcentaje de degradación muy lenta (4)            | 2,0%                       | 7,0%      |
| Total Orgánicos                                    | 67,8%                      | 73,0%     |
| Total Inorgánicos                                  | 32,2%                      | 27,0%     |
| Porcentaje de degradación muy rápida (1)           | 70%                        | 70%       |
| Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2) | 45%                        | 45%       |
| Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)  | 7%                         | 7%        |
| Porcentaje de degradación muy lenta (4)            | 12%                        | 12%       |
| Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos  |                            |           |
| Lo de degradación rápida calculado                 | 69                         | 69        |
| Lo de degradación moderadamente rápida calculado   | 126                        | 126       |
| Lo de degradación moderadamente lenta calculado    | 214                        | 214       |
| Lo de degradación lenta calculado                  | 202                        | 202       |

Figura 4-27 Caracterización de residuos en el relleno sanitario de Morelia.

## Resultados de Tabla

| PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS |                         |                                  |                      |             |            |                                                |                                 |             |            |                                                                 |                                                 |                                     |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------|------------|------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Morelia                                                                       |                         |                                  |                      |             |            |                                                |                                 |             |            |                                                                 |                                                 |                                     |                      |
| Morelia, Michoacán                                                            |                         |                                  |                      |             |            |                                                |                                 |             |            |                                                                 |                                                 |                                     |                      |
| Año                                                                           | Disposición<br>(Mg/año) | Disposición<br>Acumulada<br>(Mg) | Generación de Biogás |             |            | Eficiencia<br>del Sistema<br>de Captura<br>(%) | Recuperación de Biogás Estimada |             |            | Capacidad<br>Máxima de la<br>Planta de<br>Electricidad*<br>(MW) | Línea Base<br>del Flujo de<br>Biogás<br>(m³/hr) | Reducción de Emisión<br>Estimadas** |                      |
|                                                                               |                         |                                  | (m³/hr)              | (pies³/min) | (mmBtu/hr) |                                                | (m³/hr)                         | (pies³/min) | (mmBtu/hr) |                                                                 |                                                 | (tonnes<br>CH₄/yr)                  | (tonnes<br>CO₂eq/yr) |
| 2008                                                                          | 343.600                 | 343.600                          | 0                    | 0           | 0,0        | 0%                                             | 0                               | 0           | 0,0        | 0,0                                                             | 0                                               | 0                                   | 0                    |
| 2009                                                                          | 347.000                 | 690.600                          | 621                  | 365         | 11,1       | 0%                                             | 0                               | 0           | 0,0        | 0,0                                                             | 0                                               | 0                                   | 0                    |
| 2010                                                                          | 350.500                 | 1.041.100                        | 1.150                | 677         | 20,5       | 0%                                             | 0                               | 0           | 0,0        | 0,0                                                             | 0                                               | 0                                   | 0                    |
| 2011                                                                          | 354.000                 | 1.395.100                        | 1.604                | 944         | 28,7       | 0%                                             | 0                               | 0           | 0,0        | 0,0                                                             | 0                                               | 0                                   | 0                    |
| 2012                                                                          | 357.500                 | 1.752.600                        | 1.996                | 1.175       | 35,7       | 0%                                             | 0                               | 0           | 0,0        | 0,0                                                             | 0                                               | 0                                   | 0                    |
| 2013                                                                          | 361.100                 | 2.113.700                        | 2.339                | 1.377       | 41,8       | 0%                                             | 0                               | 0           | 0,0        | 0,0                                                             | 0                                               | 0                                   | 0                    |
| 2014                                                                          | 364.700                 | 2.478.400                        | 2.640                | 1.554       | 47,2       | 82%                                            | 2.165                           | 1.274       | 38,7       | 3,6                                                             | 0                                               | 6.790                               | 142.585              |
| 2015                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 2.908                | 1.712       | 52,0       | 82%                                            | 2.385                           | 1.404       | 42,6       | 3,9                                                             | 0                                               | 7.478                               | 157.046              |
| 2016                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 2.482                | 1.461       | 44,4       | 82%                                            | 2.036                           | 1.198       | 36,4       | 3,4                                                             | 0                                               | 6.384                               | 134.059              |
| 2017                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 2.132                | 1.255       | 38,1       | 82%                                            | 1.749                           | 1.029       | 31,2       | 2,9                                                             | 0                                               | 5.484                               | 115.162              |
| 2018                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 1.844                | 1.085       | 33,0       | 82%                                            | 1.512                           | 890         | 27,0       | 2,5                                                             | 0                                               | 4.742                               | 99.580               |
| 2019                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 1.605                | 945         | 28,7       | 82%                                            | 1.316                           | 775         | 23,5       | 2,2                                                             | 0                                               | 4.128                               | 86.688               |
| 2020                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 1.407                | 828         | 25,1       | 82%                                            | 1.154                           | 679         | 20,6       | 1,9                                                             | 0                                               | 3.618                               | 75.982               |
| 2021                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 1.242                | 731         | 22,2       | 82%                                            | 1.018                           | 599         | 18,2       | 1,7                                                             | 0                                               | 3.193                               | 67.056               |
| 2022                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 1.103                | 649         | 19,7       | 82%                                            | 905                             | 532         | 16,2       | 1,5                                                             | 0                                               | 2.837                               | 59.580               |
| 2023                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 987                  | 581         | 17,6       | 82%                                            | 809                             | 476         | 14,5       | 1,3                                                             | 0                                               | 2.538                               | 53.290               |
| 2024                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 888                  | 523         | 15,9       | 82%                                            | 728                             | 429         | 13,0       | 1,2                                                             | 0                                               | 2.284                               | 47.971               |
| 2025                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 805                  | 474         | 14,4       | 82%                                            | 660                             | 388         | 11,8       | 1,1                                                             | 0                                               | 2.069                               | 43.449               |
| 2026                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 733                  | 431         | 13,1       | 82%                                            | 601                             | 354         | 10,7       | 1,0                                                             | 0                                               | 1.885                               | 39.583               |
| 2027                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 671                  | 395         | 12,0       | 82%                                            | 551                             | 324         | 9,8        | 0,9                                                             | 0                                               | 1.727                               | 36.258               |
| 2028                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 618                  | 364         | 11,0       | 82%                                            | 507                             | 298         | 9,1        | 0,8                                                             | 0                                               | 1.590                               | 33.382               |
| 2029                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 572                  | 337         | 10,2       | 82%                                            | 469                             | 276         | 8,4        | 0,8                                                             | 0                                               | 1.470                               | 30.879               |
| 2030                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 531                  | 313         | 9,5        | 82%                                            | 436                             | 256         | 7,8        | 0,7                                                             | 0                                               | 1.366                               | 28.686               |
| 2031                                                                          | 0                       | 2.478.400                        | 495                  | 292         | 8,9        | 82%                                            | 406                             | 239         | 7,3        | 0,7                                                             | 0                                               | 1.274                               | 26.755               |

Figura 4-28 Proyección de la recuperación y generación del biogás en Morelia.

### Resultados de Grafica.

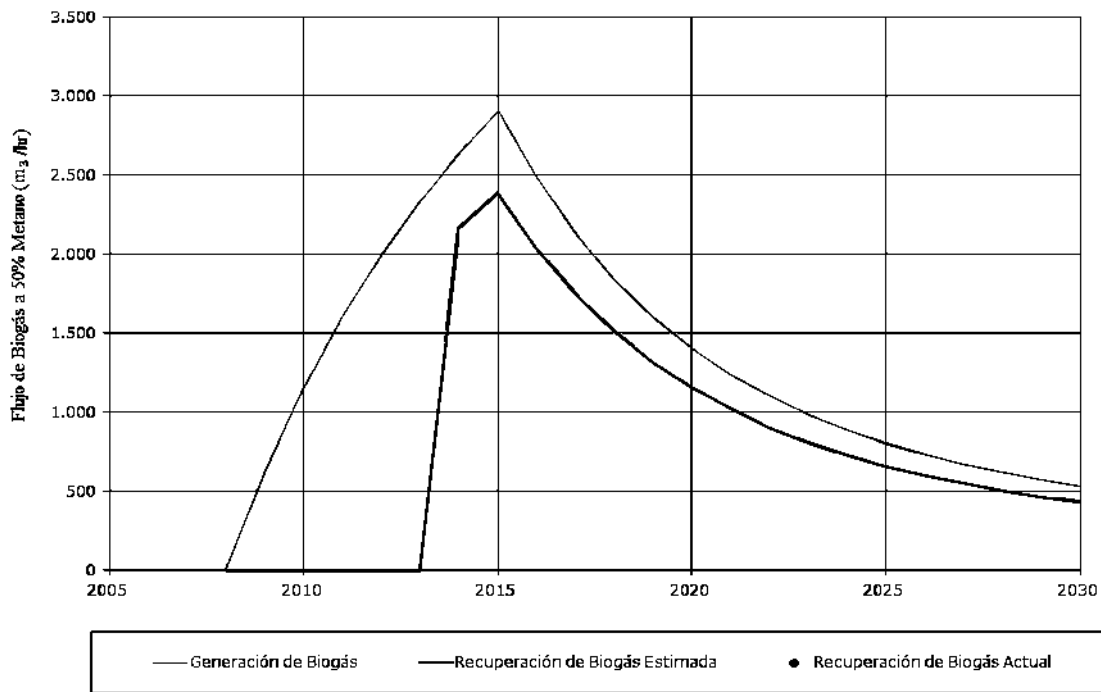


Figura 4-29 Grafica de Proyección de la recuperación y generación del biogás en Morelia.

### Análisis de los resultados obtenidos

La capacidad máxima de la planta de electricidad es de 2.9 MW al año posterior del cierre. Transcurridos 5 años disminuye a 1.6MW y va decayendo la generación de biogás. Para la conversión de la energía eléctrica se podría usar cualquier sistema de los antes mencionados como es la turbina de gas, la turbina de vapor o los motores de combustión interna. , por su versatilidad su poco mantenimiento y lo económico, se propone el uso de motores de diesel además la EPA recomienda el uso de motores de diesel para proyectos capaces de generar de 1 a 3MW.

# Conclusiones y trabajos futuros.

## Conclusiones

- Hablar acerca de los tipos de energías renovables y su futuro tanto a nivel mundial como en México. Este objetivo se cumplió, en el capítulo 2 de la tesis, se abarcan los temas que cumplen este objetivo.
- Hablar acerca de las experiencias de este tipo de energía alrededor del mundo y en México. Este objetivo se cumplió, en el capítulo 1 de la tesis, antecedentes.
- Dar un panorama general de los rellenos sanitarios. Este objetivo se cumplió, en el capítulo 2 de la tesis, se abarcan los temas que cumplen este objetivo.
- Conocer como se produce el Biogás en los rellenos sanitarios así como la problemática que producen los desechos sólidos por medio de la descomposición anaerobia. Este objetivo se cumplió, en el capítulo 2 y en el capítulo 3 de la tesis, se abarcan los temas que cumplen este objetivo.
- Describir los procesos de la producción de Biogás y todo lo relacionado a éste. En objetivo se cumplió, en el capítulo 3 de la tesis, se abarcan los temas que cumplen este objetivo.
- Identificar las diferentes unidades generadoras utilizadas en la generación eléctrica por medio de biogás. Este objetivo se cumplió en el capítulo 4 de la tesis, se abarcan los temas que cumplen este objetivo.
- Realizar un estudio de la producción de biogás del relleno sanitario de Morelia Michoacán en la actualidad. En capítulo 4 de la tesis, se abarcan los temas que cumplen este objetivo.
- Dar a conocer este tipo de energía renovable ya que no está muy difundida, hablar sobre los beneficios tanto ecológicos como económicos. Este objetivo se cumplió, a través de toda la tesis se difunde esta energía renovable.

## Ventajas y desventajas de la utilización del biogás

### Ventajas

- Produce mucha energía, de forma continua y a un precio razonable.
- Todos los biocombustibles producen mayor cantidad de dióxido de carbono por unidad de energía producida que los equivalentes fósiles.
- Los biogases producidos de la digestión anaerobia tienen un número de aplicaciones. Pueden ser utilizados en motores de combustión interna para accionar turbinas para la producción eléctrica, puede utilizarse para producir calor para necesidades comerciales y domésticas, y en vehículos especialmente modificados como un combustible.
- La combustión de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocinar, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado por el biogás puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.
- La producción de electricidad a partir de fuentes renovables de biomasa no contribuye al efecto invernadero ya que el dióxido de carbono liberado por la biomasa cuando es quemado, (directa o indirectamente después de que se produzca un biocombustible) es igual al dióxido de carbono absorbido por el material de la biomasa durante su crecimiento.

### Desventajas.

- El biogás no es realmente inagotable, aun siendo renovable. Su uso solamente puede hacerse en casos limitados.
- A menudo existen restricciones políticas e institucionales al uso de biomasa, tales como políticas energéticas, impuestos y subsidios que animan el uso de combustibles fósiles.

Los costos de la energía no reflejan a menudo las ventajas ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.

## **Trabajos futuros.**

Se puede ser más específico y hacer un análisis para un relleno sanitario en particular. Los usos que pueden dársele al biogás son los mismos que cuando se utiliza gas natural, debido a esto existen muchos campos en su aplicación como cualquier otro gas con poder energético. A continuación mencionaré algunos que pueden ser utilizados para trabajos o investigaciones futuras de la ingeniería.

Celdas de combustible: se puede usar las celdas de combustible para mejorar la eficiencia del sistema y tener mayores rendimientos.

Sistema de monitoreo: se puede hacer uso de la electrónica o eléctrica para monitorear la planta y controlarla de manera automática. Por ejemplo controlar el caudal del biogás por medio del soplador, o válvulas automatizadas. Crear programas para hacer estos controles.

Analizadores o sensores de biogás: se pueden construir de tal manera que actúen con el sistema de monitoreo. También como ya se mencionó en el trabajo los motores de diesel son lo más usados se necesita poder controlar la mezcla de diesel y biogás, por lo que se necesita sensores y control en el caudal del biogás y actuadores para así controlar la mezcla.

Viviendas auto energéticas: se puede combinar la electrónica y eléctrica para hacer que una casa funcione con el biogás generado en los rellenos sanitarios.

## **Fuentes de información.**

Agencia internacional de energia. contribucion de renovables para la seguridad energetica .  
Internacional .Agencia internacional de energia . 2010.

Ambiente ecologico. Iniciativas Sustentables. Argentina. <http://www.ambiente-ecologico.com>,  
2012.

Bitrán & Asociados. Chile. Estudio de Políticas de Abatimiento de Gas de Efecto Invernadero  
.2003.

Brown, Theodore, Eugene LeMay, y Bruce Bursten. Química la ciencia central. México. Prentice  
Hall. 1997.

Carrillo. Leonor. biogas. <http://www.unsa.edu.ar>.2005.

CEAMSE, SYUSA. EcoEficiencia de la Recolección y Tratamiento de. Argentina. Cambio  
Climático Global. 2001.

Chapman, Stephen J. Maquinas eléctricas. 4 Edicion. EUA: Mc Grow Hill. 2005.

Colmanares, Wagner, y Karin Santos. Generacion y manejo de gases en sitio de disposicion final  
. <http://www.ingenieriaquimica.org>. 2011.

conciencia global. problemas ambientales y sus causas. mexico:  
<http://observatorio.medioambiente.gloobal.net>. 2011.

Consorcio Ambiental y de servicios S.A.C.V. Proyecto ejecutivo del relleno sanitario  
metropolitano poniente. Consorcio ambiental y de servicios S.A.C.V. 99.

- EPA. "Risk Assessment for Toxic Air Pollutants: Acitizen's Guide. EPA 450/3-. USA: <http://www.epa.org/>. 2012.
- EPA. Landfill Methane Outreach Program. usa: <http://www.epa.gov>. 2011.
- EPA. Risk Assessment for Toxic Air Pollutants: Acitizen's Guide. EPA 450/3-90-024. USA: <http://www.epa.org/>. 2011.
- Eroski consumer. Produce energia electrica y elimina residuos organicos. mexico: <http://www.consumer.es>, 2012.
- Espinoza, C. "Cálculo, Diseño y Construcción de un Quemador para Biogás". chile: Universidad Católica de Valparaiso. 1985.
- Frers, Cristian. Energias renovables . Mexico: [www.biodisol.com](http://www.biodisol.com), 2012.
- El relleno sanitario . Mexico: <http://www.bvsde.paho.org>, 2010.
- Comicion reguladoa de energia. Tendencia mundial en la utilizacion de combustibles. Mexico:, <http://www.cre.gob.mx/>. 2012.
- EMISON. utilizacion del biogas. <http://www.emison.com>. 2012.
- Jaramillo, Jorge. Guia para el diseño ,construccion y operacion de rellenos sanitarios. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambientales, 2002.
- Michoacan. Tiradero de Morelia. Morelia: [www.michoacan.gob.mx/](http://www.michoacan.gob.mx/). 2012.
- Nakicenovic, Nebojsa, Arnulf Grübler, y Alan Mc Donald. Global Energy Perspectives. UK IIASA-WEC-Cambridge University.1998.
- Oweis, Khera. Geotechnology of waste management. USA . Pws. publishing co. 1998.
- Perry, D. Handbook of Chemical Engineering. USA: The Mc Graw Hill inc, 1999.
- Quaak, Peter, y Harrie Hubert Stassen. A review of combustión and gasification technologies.USA. World Bank. 1999.

- REDISA. Emisiones de biogas producidas en rellenos sanitarios. colombia. grupo de investigacion en modelacion de sistemas ambientales. 2009.
- Saldoval, Ing. Leandro. guia de diseño ,construccion,operacion, matenimiento y cierre de relleno sanitario mecanizado. Peru, red de instituciones especializadas en capacitacion para la gestion integral de los residuos solidos.2008.
- SEDESOL. Informacion de SEDESOL. Mexico: [www.SEDESOL.com](http://www.SEDESOL.com). 2012.
- SEMARNAT. Informe de la situacion del medio ambiente en Mexico . MEXICO.SEMARNAT, 2010.
- Mexico: Diario Oficial de la Federación—. NOM-083-SEMARNAT-2003.4, 2004.
- SENER. Balance Nacional de Energia . Mexico: SENER. 2008.
- SENER. Energía renovables para el desarrollo sustentable en Mexico . Mexico. SENER. 2006.
- SENER. Estado actual. Mexico: SENER. 2010.
- SENER. Experiencias y expectativas con mercados del carbono en Mexico .Mexico. SENER, 2006.
- SENER . Prospectiva del sector electrico 2010 -2025. Mexico. 2010.
- Stachowitz, W.H. 15 Years of Experience in the Field of Landfill gas Disposal Standards, problems, solutions, and procedures.usa: denmark. 2002.
- SUMA. Relleno sanitario de morelia.Morelia: <http://suma.michoacan.gob.mx/>. 2012.
- Textos cientificos. usos del biogas. <http://www.textoscientificos.com>. 2011.
- Vargas Prudente,Pablo. Alternador síncrono. ESIME, IPN. s.f. 1987
- Villegas, Julio. Desarrollo y perspectivaas de la tecnologia del biogas en los paises subdesarrollados. cuba. <http://www.bibliociencias.cu>. 2012.

