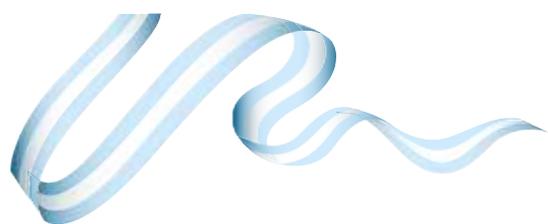


ANEXO 7

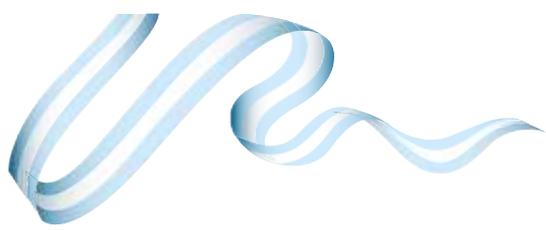
MEMORIA CÁLCULO GENERACIÓN DE BIOGÁS Y SISTEMA DE GESTIÓN CENTRO AMBIENTAL EL BORBOLLÓN

2014



CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVO.....	4
3. METODOLOGÍA.....	5
3.1 Composición de los residuos.....	5
3.2 Composición química de la fracción biodegradable	7
3.3 Volúmenes de gas generados.....	8
3.4 Producción de gases	8
3.4 Estimación de la generación de Biogás en el Módulo 1	9
3.5 Producción acumulada para el total de la vida útil del relleno.....	10
4. SISTEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	11
4.1 Conceptos sobre sistemas de captación	12
4.1.1 Drenaje Pasivo.....	12
4.1.2 Drenaje Activo	13
4.2 Diseño del sistema de Biogás para el Centro Ambiental.....	15
5. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS.....	17
5.1 Incineración del gas después del drenaje activo.....	18
5.2 Conversión energética del biogás	19
5.1.1 Potencial de generación de energía del Biogás.....	20
6. MONITOREO DEL GAS GENERADO	21
6.1 Emisiones Gaseosas.....	22
6.1.1 Monitoreo de Emisiones.....	22
6.1.2 Parámetros a monitorear y frecuencia	23



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Generación de Biogás – Módulo 1</i>	10
Figura 2: <i>Producción acumulada de Biogás (todos los módulos del relleno)</i>	11
Figura 3: <i>Sistema Activo de Captación de Biogás</i>	14
Figura 4: <i>Esquema Tubo de Venteo de Biogás</i>	16
Figura 5: <i>Esquema Tubo de captación de Biogás</i>	17
Figura 6: <i>Esquema de antorcha para incineración de Biogás</i>	18

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: <i>Caracterización de los residuos domiciliarios de la Zona Metropolitana (2004)</i>	5
TABLA 2: <i>Composición de los residuos orgánicos</i>	6
TABLA 3: <i>Composición Molar de la fracción orgánica</i>	7
TABLA 4: <i>Generación esperada de gases</i>	8
TABLA 5: <i>Cálculos generación de biogás por fracción (Modelo Triangular)</i>	9
TABLA 6: <i>Cálculo teórico de generación de biogás para el Módulo 1</i>	9
TABLA 7: <i>Metodología de Análisis de Emisiones Gaseosas (USEPA)</i>	22
TABLA 8: <i>Parámetros y Frecuencia de Monitoreo de Biogás</i>	23



1. INTRODUCCIÓN

El gas del relleno sanitario, denominado **Biogás**, es generado como resultado de procesos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren dentro del relleno. Debido a la naturaleza orgánica del residuo húmedo, el proceso microbiológico es el que gobierna el proceso de generación de este gas (Christensen, 1989). Estos procesos son sensibles a su entorno y por lo tanto, existe una amplia gama de condiciones naturales y propiciadas por el hombre que afectan la población microbiana y consecuentemente, la tasa de producción de Biogás.

Por lo tanto, como consecuencia de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos dispuestos en un relleno sanitario, se genera el biogás. El proceso de generación, atraviesa varias fases a lo largo del tiempo.

La **primera fase** es **aerobia** y dura el tiempo requerido para agotar el *oxígeno* atrapado. Puede durar unas pocas semanas o varios meses. Los gases sintetizados en esta fase consisten principalmente en *dióxido de carbono* (CO₂) y vapor de agua.

La **segunda fase** comienza cuando las condiciones dentro del relleno se tornan **anaerobias**. El principal gas producido en esta etapa es CO₂, y en menor cantidad el *hidrógeno* (H₂).

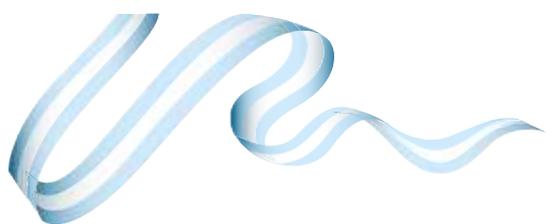
La **tercera fase** está marcada por la aparición gradual en el biogás de *metano* (CH₄).

La **cuarta fase** se caracteriza por la estabilización de la concentración de *metano* (CH₄), en porcentajes que varían entre el 40% al 60% del gas producido. También en la fase anaerobia se producen compuestos variados de *azufre* y *carbono* en concentraciones traza (sulfuros, ácidos orgánicos volátiles).

El volumen de producción de Biogás, depende de las características de los RSU dispuestos (composición en peso de las distintas fracciones) y de las condiciones que prevalecen dentro del relleno sanitario (temperatura, pH, contenido de humedad y tamaño de las partículas).

2. OBJETIVO

El objetivo del presente informe, es calcular la cantidad de Biogás a generarse en el relleno sanitario del Centro Ambiental El Borbollón, así como el diseño de su sistema de gestión.



3. METODOLOGÍA

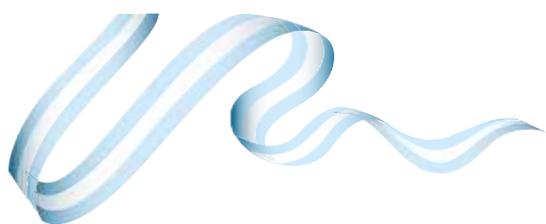
La estimación del volumen de gas a generarse, se efectuó siguiendo las pautas establecidas en el libro “Gestión Integral de los Residuos Sólidos” de TCHOBANOGLOUS-THEISEN-VIGIL. Este modelo realiza la estimación del volumen de gas generado a partir del análisis de las reacciones químicas que intervienen en la descomposición de los residuos orgánicos, considerando la composición de los residuos a disponer en el relleno para obtener los resultados.

3.1 Composición de los residuos

El gas a generarse en el módulo de relleno sanitario, dependerá de la composición de los residuos a disponerse y su contenido de humedad. Para el cálculo se utilizaron los datos obtenidos de la *Caracterización de los residuos domiciliarios de la zona metropolitana de Mendoza*, realizada por el Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, en 2004, en el marco del Estudio denominado “*Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos – Área Metropolitana de Mendoza*”. Los resultados de esta campaña de caracterización se pueden observar en la siguiente tabla:

TABLA 1: Caracterización de los residuos domiciliarios de la Zona Metropolitana (2004)

Componente	Porcentaje (%)	Contenido de Humedad (%)	Peso en Seco (kg)
Papeles y Cartones	9,07		
Diarios	2,06	10%	1,85
Revistas	2,06	10%	1,85
Papel de oficina (alta calidad)	2,02	10%	1,82
Cartón	2,29	8%	2,11
Envases Tetrabrick	0,64	8%	0,59
Plásticos	10,33		
PET (1)	1,65	4%	1,58
PEAD (2)	0,67	4%	0,64
PCV (3)	0,08	4%	0,08
PEBD(4)	6,08	4%	5,84
Otros (7)	1,86	4%	1,79
Vidrio	2,59	4%	2,49
Metales Ferrosos	0,89	4%	0,85
Metales No Ferrosos	0,22	4%	0,21
Materiales textiles	1,69	15%	1,44
Madera	0,20	40%	0,12
Goma	0,27	4%	0,26
Cuero, corcho	0,27	12%	0,24
Pañales descartables y Apósitos	6,88	64%	2,48
Materiales de construcción y demolición	0,00	10%	0,00



Residuos de Poda y Jardín	11,89	64%	4,28
Residuos peligrosos	0,85	4%	0,82
Residuos Patogénicos	0,80	80%	0,16
Desechos alimenticios	50,19	72%	14,05
Misceláneos menores a 12,7 mm	3,63	64%	1,31
Aerosoles	0,00	4%	0,00
	100	53,15	46,85

FUENTE: Sistema de Gestión Integral de RSU – Área Metropolitana UTN-FRM (2004)

Se categorizaron los materiales orgánicos presentes en los residuos en dos tipos, según:

- Constituyentes orgánicos *rápidamente degradables* (se descomponen en un lapso de 3 meses a 5 años).
- Constituyentes orgánicos *lentamente degradables* (se descomponen en un tiempo de 50 años o más).

En la **Tabla 2** se muestra la composición de los residuos orgánicos (a excepción de los plásticos) divididos por fracciones:

TABLA 2: Composición de los residuos orgánicos

COMPONENTE	Peso Húmedo (kg)	Peso Seco		
		% de humedad adoptado**		Kg
Constituyentes orgánicos rápidamente degradables				
Orgánico (desechos alimenticios)	57,87	70	40,51	34,43
Papel	6,14	6	0,37	6,12
Cartón	2,93	5	0,15	2,93
Residuos de Jardín*	7,13	60	4,28	6,83
Totales	74,07		45,30	50,30
Constituyentes orgánicos lentamente degradables				
Textiles	1,69	10	0,17	1,69
Goma	0,27	2	0,01	0,27
Cuero	0,27	10	0,03	0,27
Residuos de Jardín*	4,76	60	2,85	4,62
Madera	0,20	20	0,04	0,20
Totales	5,50		2,93	5,36
Inertes	20,43		Peso seco total 48,23	
TOTAL	100,00			

* Del total de los residuos de jardín, se considera que el 60% son de descomposición rápida y el 40% de descomposición lenta (TCHOBANOGLIOUS).

** Datos típicos tomados de TCHOBANOGLIOUS

FUENTE: Elaboración propia



3.2 Composición química de la fracción biodegradable

Los residuos orgánicos pueden ser presentados en forma generalizada por la siguiente fórmula química:



Utilizando esta fórmula y con los datos obtenidos en la **Tabla 2**, se realizó el cálculo del peso seco (en kg) de la cantidad de: *carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, y cenizas*, contenida en cada una de las fracciones analizadas. A partir de estos resultados, se calculó la *composición molar* de las fracciones, despreciando las cenizas. Y Por último, se realizó el cálculo de la *Relación Normalizada Mol*, para 1 mol de nitrógeno. En la **Tabla 3**, se pueden apreciar los valores obtenidos:

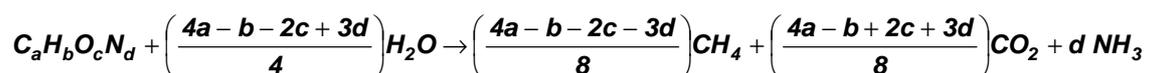
TABLA 3: Composición Molar de la fracción orgánica

Componente	Relación mol (nitrógeno =1)		
	Descomposición rápida	Descomposición lenta	
Carbono	24	16	a
Hidrógeno	38	25	b
Oxígeno	15	9	c
Nitrógeno	1	1	d

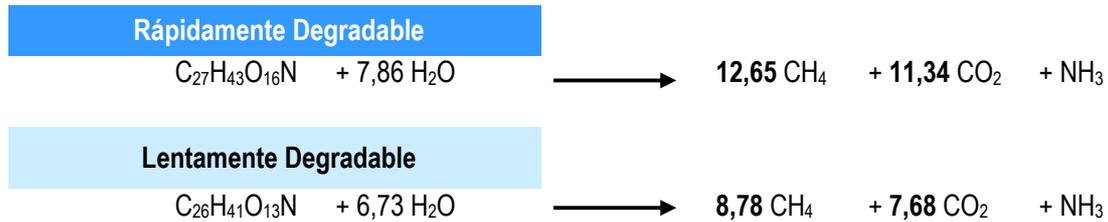
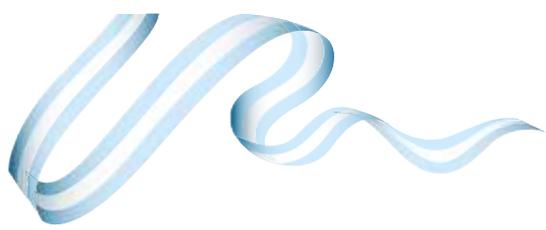
Rápidamente Degradable	$C_{24}H_{38}O_{15}N$
Lentamente Degradable	$C_{16}H_{25}O_9N$

FUENTE: Elaboración propia

A partir de los datos de la composición típica elemental en Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno, de cada constituyente, se puede calcular el gas producido, suponiendo una conversión completa de los residuos orgánicos biodegradables en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) con la fórmula:



Aplicando esta fórmula para ambas fracciones se obtuvieron los valores que se indican a continuación:



3.3 Volúmenes de gas generados

Luego, a partir de estos cálculos se obtuvieron los volúmenes de gas **Metano** y **Dióxido de Carbono** a generarse; siendo el Pe CH₄ (*peso específico del Metano*) = 0,717 kg/m³, y el Pe CO₂ (*peso específico del Dióxido de Carbono*) = 1,978 kg/m³. En la **Tabla 4** se observan los volúmenes de gases esperados para las fracciones de descomposición rápida y lenta de los residuos.

TABLA 4: Generación esperada de gases

Generación de gases	Descomposición Rápida		Descomposición Lenta	
	Vol (m3N)	%	Vol (m3N)	%
Metano	24,66	52,89	2,81	53,50
Dióxido de Carbono	21,97	47,11	2,44	46,50
Total Volumen	46,64		5,26	
Total gases/kg seco de RSU	0,927 m3/kg		0,981 m3/kg	

FUENTE: Elaboración propia

3.4 Producción de gases

Las tasas anuales de descomposición para materiales rápidamente y lentamente biodegradables se basan en un *Modelo Triangular* de producción de gas. Los gases de generación rápida presentan su máxima producción en el primer año, y se siguen generando hasta el quinto año. En tanto los gases de descomposición lenta, presentan sus valores máximos en el quinto año y se siguen generando hasta el año 15^º.

La tasa de producción de gas se calcula como la altura del triángulo que surge de la gráfica de generación. Por lo tanto, la generación total de gases se calculará como con la fórmula de la superficie del triángulo (TCHOBANOGLIOUS):

$$\text{Total de gas producido (m3)} = \frac{1}{2} \text{ base (año)} \times \text{altura (tasa más alta de producción, m3/año)}$$

En la **Tabla 5** se muestran los cálculos de generación realizados por cada fracción.

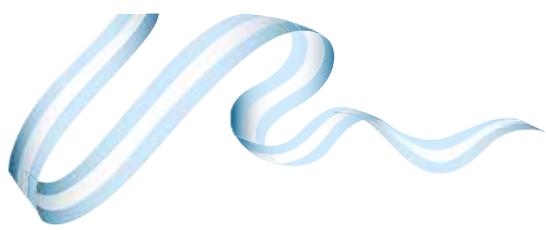


TABLA 5: Cálculos generación de biogás por fracción (Modelo Triangular)

Año	Descomposición Rápida Tasa Punta = 0,371 m3/kg/año			Descomposición Lenta Tasa Punta = 0,331 m3/kg/año			Total Rápidos + Lentos
	Tasa Prod. (m3/año)	Producción (m3)	Producción (m3/kg RSU)	Tasa Prod. (m3/año)	Producción (m3)	Producción (m3/kg RSU)	Producción (m3/kg RSU)
1	0,371	0,185	0,061	0,026	0,013	0,000	0,061
2	0,278	0,325	0,106	0,052	0,065	0,001	0,108
3	0,185	0,232	0,076	0,078	0,092	0,002	0,078
4	0,093	0,139	0,045	0,105	0,118	0,003	0,048
5	0,000	0,046	0,015	0,131	0,124	0,003	0,018
6				0,018	0,111	0,002	0,002
7				0,105	0,098	0,002	0,002
8				0,0092	0,085	0,002	0,002
9				0,078	0,072	0,002	0,002
10				0,065	0,059	0,001	0,001
11				0,052	0,046	0,001	0,001
12				0,039	0,033	0,001	0,001
13				0,026	0,020	0,000	0,000
14				0,013	0,020	0,000	0,000
15				0,000	0,007	0,000	0,000
		0,927	0,303		0,961	0,021	0,324

Disponibilidad de residuos rápidos para la bioconversión (%) = 65%
 Disponibilidad de residuos lentos para la bioconversión (%) = 40%

Tasa Punta = 2 x total de gas producido (m3/kg)/base (año)

FUENTE: Elaboración propia

3.4 Estimación de la generación de Biogás en el Módulo 1

En la **Tabla 6** se muestra el resumen de los valores obtenidos para el Módulo 1 (de 5 años de vida útil), y en la **Figura 1** se grafica la generación de biogás por kg de residuo dispuesto, hasta el año 21^o de inicio de operaciones.

TABLA 6: Cálculo teórico de generación de biogás para el Módulo 1

Año	Rápidamente degradables (m3/año)	Lentamente degradables (m3/año)	Total (m3/año)
Año 0	0,00	0,00	0,00
Año 1	79.006,66	365,27	79.371,93
Año 2	217.447,16	2.193,40	219.640,56
Año 3	316.324,46	4.752,93	321.077,38
Año 4	380.580,57	8.149,31	388.729,88
Año 5	394.682,06	11.495,64	406.177,70
Año 6	315.037,33	14.200,76	329.238,10
Año 7	176.700,66	15.067,76	191.768,43
Año 8	78.246,11	14.831,73	93.077,84
Año 9	19.473,91	13.504,84	32.978,75



Año 10	0,00	11.642,32	11.642,32
Año 11	0,00	9.788,93	9.788,93
Año 12	0,00	7.952,26	7.952,26
Año 13	0,00	6.135,41	6.135,41
Año 14	0,00	4.690,35	4.690,35
Año 15	0,00	3.267,50	3.267,50
Año 16	0,00	2.040,63	2.040,63
Año 17	0,00	1.175,81	1.175,81
Año 18	0,00	662,55	662,55
Año 19	0,00	157,29	157,29
Año 20	0,00	0,00	0,00
Total de Generación (20 años)		2.109.573,60	

FUENTE: Elaboración propia

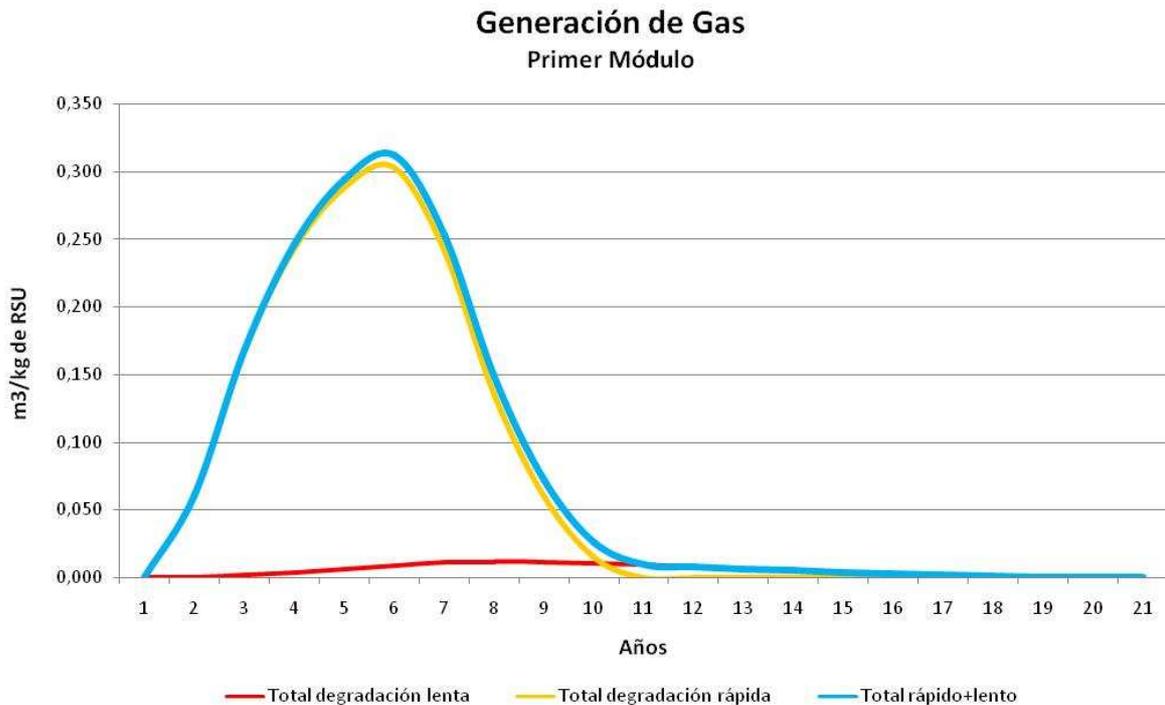


Figura 1: Generación de Biogás – Módulo 1

3.5 Producción acumulada para el total de la vida útil del relleno

Una vez determinado el volumen de gas producido por cada kilogramo seco de RSU, y los valores para el módulo 1, se supone que se producirá un modelo de distribución temporal de producción de gas. Este modelo estima que los gases de la fracción de RSU de rápida descomposición, tienen su producción máxima al año de la puesta en funcionamiento del relleno, y queda completada su producción a los cinco años.



Y para la fracción que se biodegrada lentamente, el modelo triangular de producción de gas, supone una tasa punta a los 5 años del inicio de la descomposición. Con estas hipótesis de distribución temporal de producción de gas, podemos realizar el cálculo completo para todos los módulos del relleno, en función de sus distintas etapas de puesta en marcha y calcular así la producción total acumulada de biogás para todo el relleno.

Los antecedentes internacionales acerca de la producción de gas medida y su relación con este método riguroso de cálculo y de variación temporal indican que se obtienen valores menores. Esto es debido, entre otros factores a la fuga de metano del sistema de colección, a través de las capas de vertedero, el porcentaje de carbono que realmente se convierte en metano y un porcentaje de carbono que se convierte en protoplasma microbiano, y la eficiencia del sistema de captación. Por lo tanto, para el cálculo realizado se ha considerado un rendimiento del 70%.

En la **Figura 2**, se puede observar la generación de gas acumulada a lo largo de un período de tiempo de 33 años, que es lo estimado para la generación del Biogás.

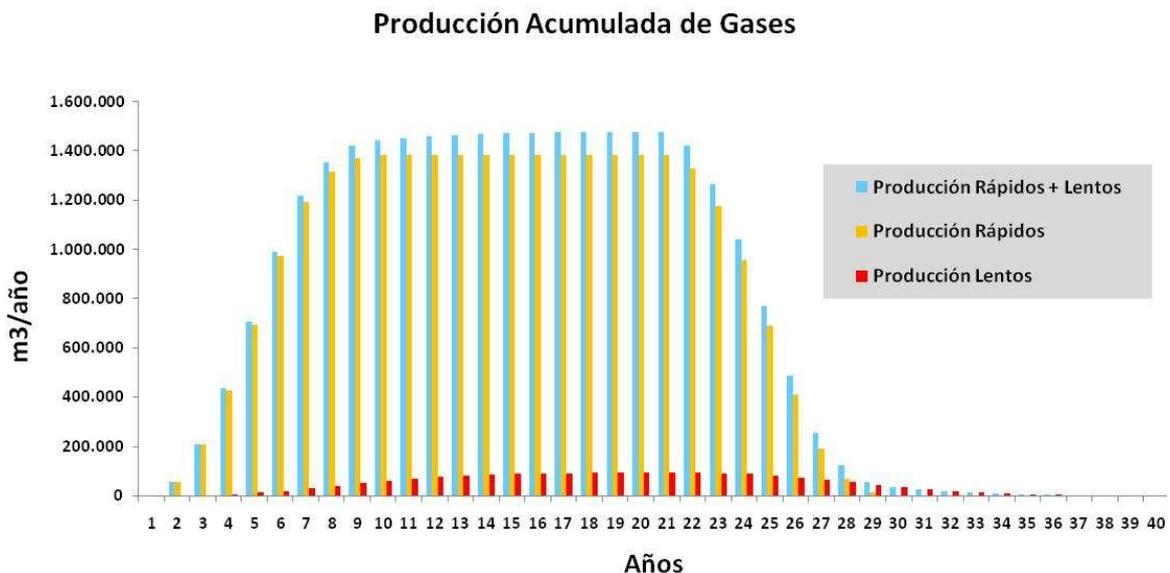


Figura 2: Producción acumulada de Biogás (todos los módulos del relleno)

4. SISTEMA DE CAPTACIÓN Y EXTRACCIÓN DE BIOGÁS

Para reducir la presión del gas generado dentro de la masa de residuos, y evitar que se acumule en el interior del relleno, con los peligros que ello implica, resulta necesario diseñar un sistema de captación y extracción del biogás generado.

El gas del relleno se puede evacuar mediante la utilización de sistemas de drenaje activo o pasivo. El *drenaje activo* consiste en la succión del gas mediante un soplador. Cuando se hace el *drenaje pasivo*, se controla la difusión natural de los gases, con el fin de evacuarlos solamente por los orificios previstos. Se logra una



mayor eficiencia con el drenaje activo, sin embargo los costos del mismo son mucho más altos, con relación al sistema pasivo.

4.1 Conceptos sobre sistemas de captación

4.1.1 Drenaje Pasivo

Drenaje pasivo sin chimeneas

En un relleno compactado, el gas generado en el mismo se mueve con preferencia horizontalmente en las distintas capas de residuos. Se difunde por la capa superficial del cuerpo de residuos dispuestos o por los taludes laterales, se mezcla con el aire y se diluye. La cubierta con tierra tiene un impacto biológico, es decir que ya existe un cierto tratamiento de los gases del relleno antes de que se mezclen con la atmósfera.

En la práctica el drenaje pasivo sin chimeneas, provoca ciertos inconvenientes, entre los que se pueden mencionar:

- En las celdas ya terminadas y cubiertas con una capa de vegetación, se puede impedir el suministro de aire de las raíces por causa de la concentración alta de metano en la capa de tierra.
- Cuando existen fisuras en los taludes o la superficie del relleno, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico que constituye la capa de tierra.
- Si se descarga lodo o basura muy húmeda en el relleno, o si el relleno está expuesto a demasiada lluvia, se pierde el impacto del filtro biológico.
- Si se produce una cantidad muy alta de gas de relleno o si el gas se difunde solamente en algunos puntos definidos y no por la superficie entera, hay demasiada carga al filtro biológico y el filtro pierde su eficiencia.

Debido a estos problemas, no se recomienda el drenaje pasivo sin chimeneas. Solamente se puede preferir este método en los casos en que no se cuenten con los recursos económicos para construir las chimeneas durante la operación del relleno sanitario, o en casos de evacuación de gases en basurales ya cerrados que no tienen ningún dispositivo de drenaje.

Drenaje pasivo con chimeneas

Para este tipo de recolección de gases, se deben construir las chimeneas de drenaje durante la operación del relleno sanitario. Aquí se aprovecha de la difusión horizontal del gas del relleno. El gas se difunde hacia la próxima chimenea y por ella de manera controlada hacia la atmósfera. Las chimeneas tienen una alta



permeabilidad para el gas y por consecuencia es muy baja la cantidad de gas que no se difunde por ellas.

Las chimeneas de drenaje pueden ser construidas de dos maneras:

- Jaula de malla con 4 puntales de madera, llenada con piedra bola o grava.
- Tubo perforado llenado con piedra bola o grava.

En el drenaje pasivo con chimeneas, es muy importante que se queme el gas de relleno que sale de éstas, debido a que los gases del relleno salen casi sin dilución y presentan un peligro importante para los trabajadores del relleno sanitario.

La chimenea donde se incinera el gas no debe ser más elevada que la altura máxima de la celda, para evitar que se mezcle el aire ambiental con el gas combustible. Con la incineración controlada del gas puro del relleno se evita también el peligro de explosión, que siempre existe cuando se mezcla el metano con la atmósfera.

4.1.2 Drenaje Activo

En los sistemas de drenaje activo, se succiona el gas con un soplador que se conecta con las chimeneas. Se conducen los gases hacia el sistema de tratamiento, mediante un sistema de tuberías ubicadas debajo de la cobertura, y sobre los residuos dispuestos, como se puede observar en la **Figura 3**.

Los elementos que constituyen el sistema de drenaje activo son los siguientes:

- **Colectores de gas:** Chimeneas verticales y tubería horizontal que se colocan en el cuerpo del relleno.
- **Punto de recolección:** El gas aspirado en diferentes chimeneas se conduce hasta el punto de recolección que puede ser un tanque o un tubo. El punto de colección se ubica 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. Se deben colocar equipos de medición y ajuste en el punto de recolección.
- **Separador de agua:** Las aguas condensadas se separan del flujo de gas mediante un sifón o equipo refrigerador; de donde después se extraen con una bomba para ser trasladadas a la pileta de colección de lixiviados.
- **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. La presión necesaria para la succión es entre 200 - 300 milibar.

- **Casa de sopladores:** En rellenos medianos o pequeños, el soplador se puede colocar en un galpón semiacubierto con techo o en un contenedor. Para rellenos grandes, se recomienda colocar el soplador en el mismo edificio que el incinerador.
- **Tubo de transporte:** Este es el tubo que conduce los gases con sobrepresión hacia el incinerador.
- **Antorcha:** Unidad donde se quema el gas bajo control.
- **Incinerador:** Unidad compuesta de la antorcha, del equipo para aprovechar la energía de incineración y de los equipos auxiliares (tratamiento del gas, separación de gases, ajustes, etc.)

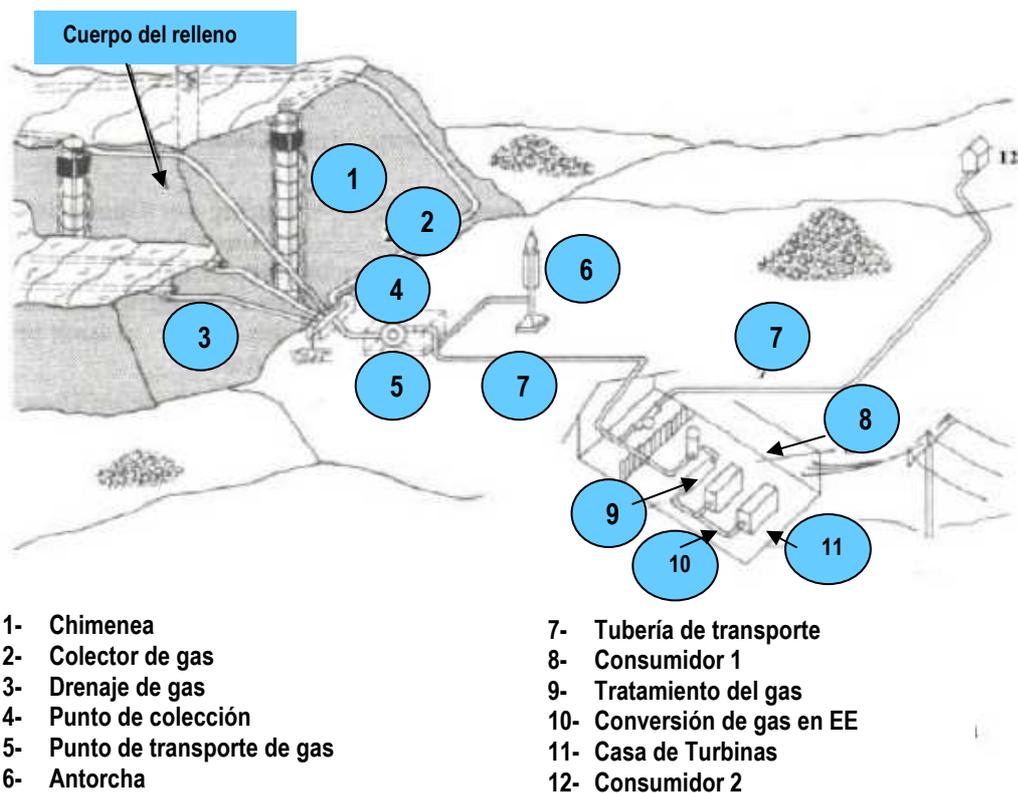


Figura 3: Sistema Activo de Captación de Biogás



4.2 Diseño del sistema de Biogás para el Centro Ambiental

Los cálculos que se han realizado sobre la cantidad de biogás a generarse en los módulos del relleno sanitario del Centro Ambiental El Borbollón, se basan en hipótesis teóricas.

Como antecedente cercano *real* de generación de biogás, se tiene la experiencia del *Vertedero Controlado de Las Heras*, ubicado en el predio colindante al sitio de implantación del proyecto, donde actualmente se está realizando la captación del biogás generado en las celdas cerradas, para su aprovechamiento en generación de energía. En este caso, los volúmenes de biogás captados, se encuentran por debajo de los cálculos teóricos realizados, esto se debe fundamentalmente a factores de tipo climático que inciden en la generación de gas, como son: las escasas precipitaciones y bajos índices de humedad.

Pero, al considerar este antecedente, también se debe tener en cuenta que este emprendimiento no tiene todas las características de un relleno sanitario, como *impermeabilización de fondo y captación de lixiviados*.

Por otra parte, es importante aclarar que en el proyecto desarrollado para el *Centro Ambiental El Borbollón*, se ha planteado dentro del sistema de gestión de líquidos lixiviados, la recirculación de estos líquidos en la masa de los residuos; lo cual producirá cambios en el comportamiento biológico de la masa de residuos, que resultan difíciles de dimensionar a priori.

Por tal motivo, se ha tomado de decisión de iniciar la operación del relleno con un *Sistema de drenaje pasivo de biogás*, mediante tubos de venteo de gases; pero a su vez también se construirán conductos de captación de gas, destinados a la implementación en un futuro, de un *Sistema Activo*, como el explicado precedentemente.

De este forma, inicialmente se observará el comportamiento real de la biocversión y producción de gas, en las primeras etapas de la operación, fundamentalmente para evaluar el efecto que produzca la reinyección de lixiviados, en cuanto a la generación de gases. Y con este antecedente, se podrá evaluar con más certeza, cuáles serán las instalaciones que correspondan construir, para el aprovechamiento energético del biogás, teniendo ya instalados los correspondientes tubos de captación, dentro del relleno.

En el **Anexo 1: Planos de Proyecto Ejecutivo**, se pueden apreciar las características y detalles del sistema diseñado, con la ubicación de los tubos de venteo de gases y tubos de captación, dentro de la geometría del Módulo 1, con indicación de sus áreas de influencia.

Por otra parte, se indica que la migración horizontal y hacia el fondo del gas producido será controlada por la barrera impermeable formada por una



geomembrana de 2000 μ + una capa de suelo bentonítico, en la base y terraplenes perimetrales.

Los tubos de venteo y los de captación, se construirán en forma progresiva en altura, en los lugares y en las cantidades especificadas en los planos correspondientes. En las **Figura 4 y 5** se pueden observar las características constructivas de los *tubos de venteo* y *tubos de captación* respectivamente.

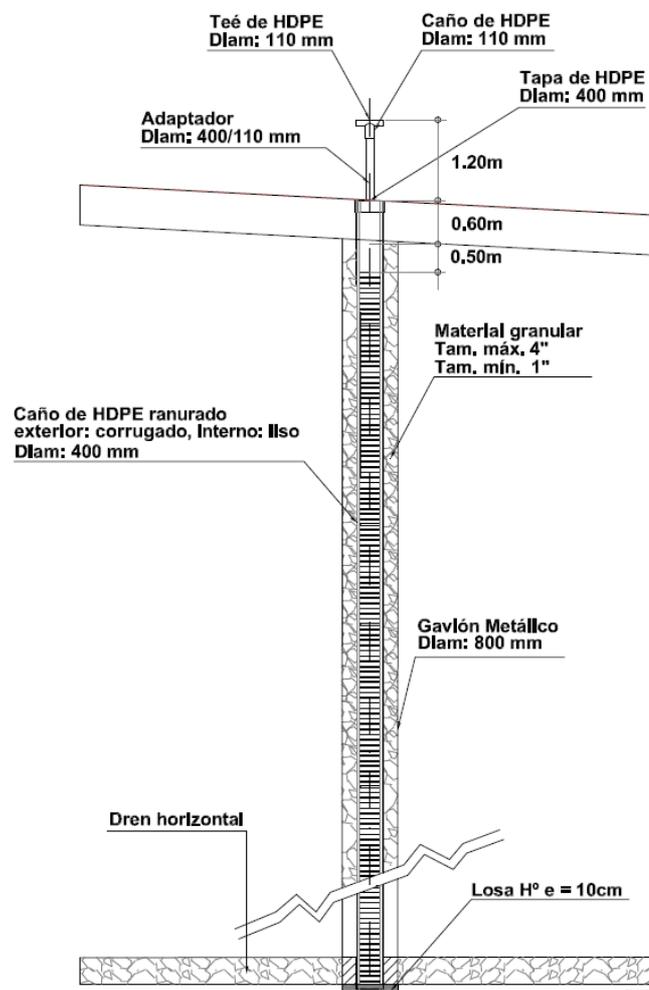


Figura 4: Esquema Tubo de Venteo de Biogás

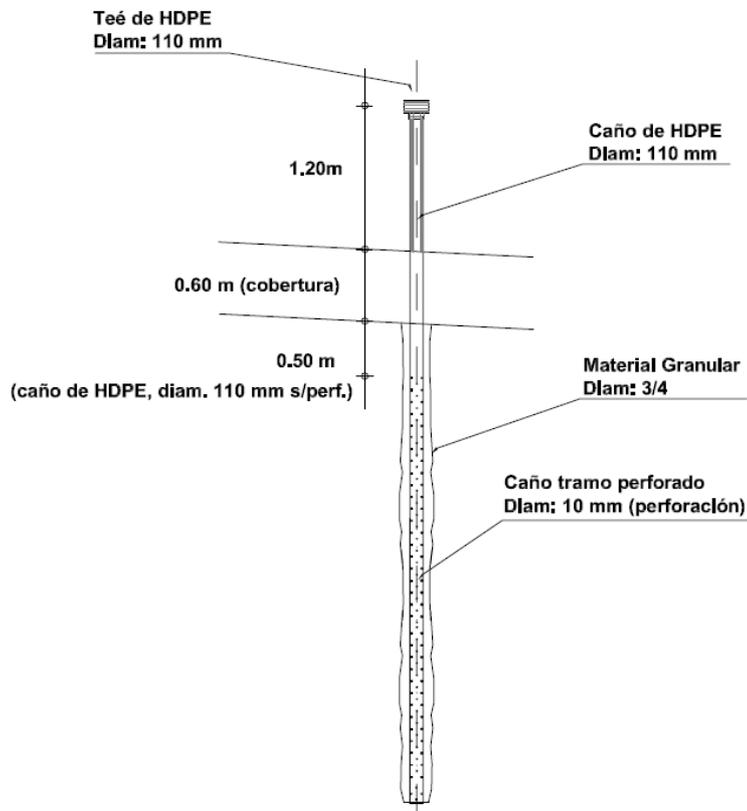


Figura 5: Esquema Tubo de captación de Biogás

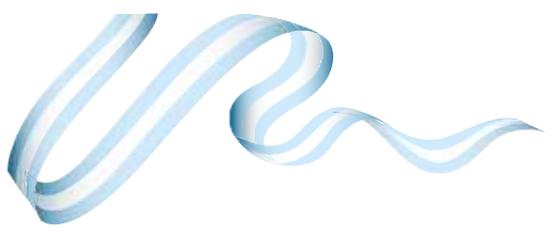
5. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

El gas de relleno se puede quemar en antorchas, o se pueden instalar sistemas que lo reutilicen de una forma más productiva.

Existen varias posibilidades para su reutilización, se puede inyectar a una red de gas urbano, se puede generar energía eléctrica, se puede utilizar para generar vapor para procesos productivos, o en una combinación de calor y energía.

En general, el uso directo del gas de relleno en una red de gas urbano, requeriría de procesos adicionales de limpieza y enriquecimiento, debido a su menor pureza y a los efectos destructivos sobre los equipos, de los demás gases constituyentes de la mezcla.

El uso como combustible para vehículos, también requeriría de una limpieza adicional y la producción de agua caliente y calor podría ser útil si existiera una demanda cercana. Por otro lado, la conversión del gas a energía eléctrica, a través de turbinas a gas o motores generadores de combustión interna, se puede distribuir a través de la red eléctrica o puede ser utilizada por el consumidor más cercano, reemplazando o desplazando la generación de centrales termoeléctricas.



5.1 Incineración del gas después del drenaje activo

Si no se aprovecha el gas del relleno para producir energía eléctrica, se puede incinerar con antorchas. La incineración con antorchas es un método similar a la incineración controlada en la chimenea.

Se han desarrollado antorchas especiales donde se queman los gases del relleno con adición controlada de aire. Las antorchas para la incineración del gas del relleno disponen de encendedores automáticos, un sistema de control de la llama y de la temperatura, una válvula automática para apagar y un ajuste del flujo de aire.

El gas de relleno se quema a una temperatura aproximada de 1000°C, pudiendo también quemarse a mayor temperatura en donde se logra un mejor control de la generación de dioxinas durante el proceso de incineración, pero a un mayor costo de inversión y de operación. En la **Figura 6** se presenta un esquema tipo de este antorchas.

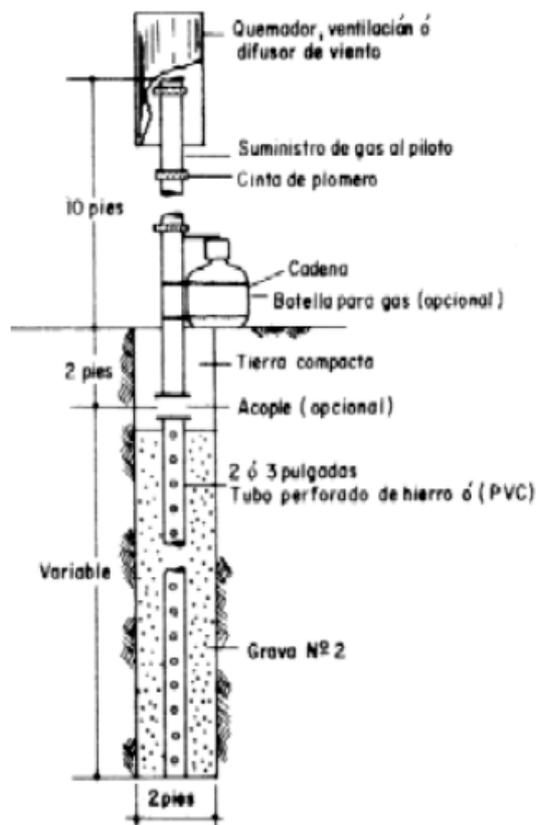


Figura 6: Esquema de antorcha para incineración de Biogás



5.2 Conversión energética del biogás

El uso predominante del gas de relleno una vez que éste es recolectado es como combustible para la generación de electricidad, la cual se distribuye a través de la red local o se transmite hasta algún consumidor cercano.

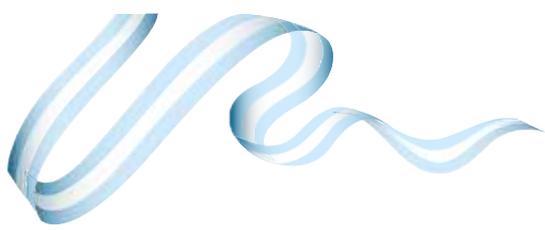
El uso predominante del gas de relleno una vez que éste es recolectado es como combustible para la generación de electricidad, la cual se distribuye a través de la red local o se transmite hasta algún consumidor cercano. Por otro lado la utilización de biogás como fuente de energía se presenta como una fuente adicional de reducción de emisiones GEI (*Gases de Efecto Invernadero*).

En la medida que el metano capturado en un relleno sanitario es utilizado para generar energía que se incorpora a la matriz energética, esta podría reemplazar fuentes más contaminantes que emiten GEI, lo que produciría reducciones adicionales a la mera captura del biogás. El contenido de metano en el biogás decae en el tiempo, disminuyendo su proporción desde 40 – 60% en los primeros años de un relleno, hasta 25 – 45% en los años finales. La duración y tasas de producción de gas varían en el tiempo, dependiendo del proceso de degradación natural de los RSU en cada relleno. La vida útil de los sistemas de recolección puede ser bastante larga (15 años o más), sin embargo la utilización económicamente eficiente de estas instalaciones normalmente se puede sostener sólo entre 3 a 8 años.

Existen varias tecnologías para la generación de energía del biogás: microturbinas, motores de combustión interna, turbinas a gas, ciclo combinado, turbinas a vapor de caldera. Adicionalmente existe una serie de tecnologías experimentales para aprovechar tanto el CO₂ como el gas metano, generado en los rellenos sanitarios:

- Uso de celdas de combustible de ácido fosfórico (PAF Cs) para la generación de energía eléctrica y calor.
- Conversión del metano en gas comprimido para su uso en vehículos.
- Utilización del metano para evaporar los líquidos percolados y condensados del biogás.
- Producción de metanol.
- Producción de CO₂ industrial.
- Uso del biogás para calefacción de invernaderos y para aumentar su contenido de CO₂.

El motor de combustión interna es la tecnología más utilizada en rellenos sanitarios para la recuperación energética del biogás. Este tipo de motores son eficientes y más baratos que otras alternativas, y se recomiendan para aquellos proyectos capaces de generar entre 1 y 3 MW. Además, tienen la ventaja de que se encuentran disponibles en diferentes tamaños, los que pueden irse acondicionando al sistema, respondiendo a los incrementos en la generación de gas.



Si bien se consigna que la oferta de generadores para proyectos de este tipo varía entre los 800 kW y los 3 MW, hoy en día, proyectos menores también estarían utilizando motores de combustión interna.

La EPA señala que hoy en día, se pueden instalar microturbinas desde 30kW a 100kW, lo que hace posible que los rellenos sanitarios pequeños también puedan generar energía eléctrica y reducir emisiones. Este tipo de proyectos normalmente se utilizan para autoconsumo del relleno o para venderse a consumidores cercanos (una turbina de 30kW alcanzaría para alimentar el equivalente a 20 casas). Sin embargo, la inversión requerida para estas turbinas es bastante alta.

La desventaja de los motores de combustión interna es que sufren de corrosión debido al contenido de ácidos en el biogás, no así las turbinas a gas. Pero estas últimas son más caras, necesitan un gas de calidad consistente y una mayor presión de entrega, lo que aumenta los costos por concepto de instalación y operación de compresores.

Para proyectos que superan los 3 a 4 MW de generación potencial, normalmente se instalan turbinas para aprovechar economías de escala, ya que el costo de generación por cada kW cae en la medida que el tamaño de la turbina se incrementa.

Proyectos mayores a 8 MW requieren turbinas mayores de ciclo combinado. La combustión directa del biogás es una buena forma de recuperar energía del biogás, normalmente un 80% del valor calorífico del metano puede ser recuperado.

Quemar biogás es similar a quemar gas natural diluido, por lo que probablemente se deben hacer ajustes para adaptarse al menor poder calorífico del biogás.

5.1.1 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 un relleno sanitario:

Potencial de generación de energía bruto (KWB)

Es la capacidad instalada de generación que el flujo de biogás obtenido de un relleno puede soportar, y está dado por la siguiente fórmula:

$$kW = \text{Flujo de biogás (m}^3/\text{día)} \times \text{Contenido de energía (Hp-h/m}^3) \times 1/\text{tasa calorífica (kWh/Hp-h)} \times 1\text{ día}/24\text{ hr.}$$

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.



- Contenido de energía del biogás, aproximadamente 5.815 Hp-hr/m³.
- Tasa calorífica es 3.950,4 Hp-hr/kWh en motores de combustión interna y 2.798,23 Hp-hr/kWh en turbinas de ciclo combinado.
- Potencial de generación de energía neto (kWN): Esto equivale al Potencial de generación de energía bruto menos las cargas parasíticas de sistemas auxiliares y equipos, las que alcanzan un 2% para motores de combustión interna y 6% para turbinas de ciclo combinado.
- 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

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 (kWh = KWN x hrs).

En el potencial de generación, hay que tener en cuenta que el valor mínimo de interés comercial es de 0,8 MW considerado por la EPA.

6. MONITOREO DEL GAS GENERADO

La metodología de monitoreo está basada en la medida directa de la cantidad de gas del relleno capturado y destruido por la plataforma de quemado. El Plan de Monitoreo debe proveer de medidas continuas de la cantidad y calidad del gas quemado.

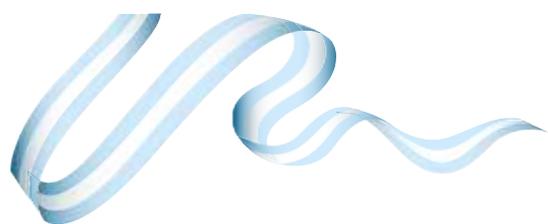
Las principales variables son:

- Cantidad de residuos que se reciben en el relleno sanitario.
- Cantidad de metano quemado.

La cantidad de residuos recibidos en el relleno sanitario es monitoreada directamente, a través de la báscula de pesaje. Y la cantidad de metano quemado será determinada por:

- La cantidad de gas de relleno colectado (m³), usando un flujómetro y midiendo la temperatura y la presión.
- Porcentaje de gas de relleno que es metano (%), usando un analizador continuo.
- Horas de quemado (hs), empleando un cronómetro.

Esta metodología de monitoreo provee medidas directas y continuas de la cantidad actual de gas de relleno quemado y de metano contenido en el gas de relleno. Para esto se utiliza un flujómetro y un analizador continuo de metano. El analizador continuo de metano es importante, debido a que el contenido de metano del gas



varía por más del 20% en un día, debido a las condiciones de la red de captura (dilución con aire en la fuente, fuga en las tuberías, etc.)

6.1 Emisiones Gaseosas

6.1.1 Monitoreo de Emisiones

Se debe llevar a cabo, dentro del Programa de Monitoreo Ambiental, el monitoreo de la calidad del aire, en el entorno del Centro Ambiental El Borbollón. Para ello se deberá realizar el muestreo de emisiones gaseosas, en puntos de máxima concentración, tales como los sitios específicos de venteo de gases, para determinar mediante la utilización de modelos matemáticos de dispersión de contaminantes, los puntos impactados por la pluma de contaminación en el Área de Influencia Directa del proyecto.

Las muestras recolectadas serán analizadas para los constituyentes típicos de gases del relleno, tales como: Metano, Dióxido de Carbono, Nitrógeno, Sulfuro de Hidrógeno y trazas de compuestos orgánicos no metanogénicos, tales como: tricloroetileno, percloroetileno, dicloroetileno, tetracloroetileno, benceno, tolueno, xileno y etilbenceno, etc.

Los procedimientos de muestreo y análisis del gas de relleno son los procedimientos estandarizados por la EPA (Environmental Protection Agency – USA) (TO-15): *Determination of Volatile Organic Compounds (VOC's) in Air collected in specially-prepared canister and analyzed by Gas Chromatography/Mass Spectrophotometry (GC/MS)*.

En la **Tabla 7**, se presentan las Metodologías de Análisis de Emisiones Gaseosas, desarrolladas por la EPA.

TABLA 7: Metodología de Análisis de Emisiones Gaseosas (USEPA)

Métodos		Aplicabilidad
Tasa de velocidad de producción de gases en el relleno.	2E	Este método se aplica para medir la producción de gas en un relleno sanitario y es utilizado para calcular la producción de NMOC's de los rellenos.
Determinación de dióxido de carbono, metano, nitrógeno y oxígeno de fuentes estacionarias.	3C	Este método se aplica para analizar el dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄), Nitrógeno (N ₂), y Oxígeno (O ₂) en muestras de rellenos sanitarios.
Determinación de componentes orgánicos no-metanogénicos (NMOPC's) en gases del relleno	25C	Este método es aplicable para el muestreo y medición de componentes orgánicos no-metanogénicos como carbono, en gases de un relleno sanitario.

FUENTE: Proyecto Gestión Integral de RSU – Zona Metropolitana
Ministerio de Tierras, Ambiente y Recursos Naturales (2013)



6.1.2 Parámetros a monitorear y frecuencia

En la **Tabla 7** se listan los parámetros a monitorear y su frecuencia recomendada:

TABLA 8: Parámetros y Frecuencia de Monitoreo de Biogás

Parámetros	Frecuencia Recomendada de Monitoreo
Metano	Semestral
Dióxido de Carbono	Semestral
Monóxido de Carbono	Semestral
Monóxido de Nitrógeno	Semestral
Dióxido de Nitrógeno	Semestral
Óxido de Azufre	Semestral
Sulfuro de Hidrógeno	Semestral
Mercaptanos	Semestral
Compuestos orgánicos no metanogénicos (NMOC's), tales como tricloroetileno, Benceno, Tolueno, Xileno, Etilbenceno.	Anual
Cinética de emisiones	Anual

*FUENTE: Proyecto Gestión Integral de RSU – Zona Metropolitana
Ministerio de Tierras, Ambiente y Recursos Naturales (2013)*

En la Programa de Monitoreo del Plan de Manejo Ambiental desarrollado para el Centro Ambiental El Borbollón, se establecen mayores detalles sobre estos monitoreos.