

CAPTURA Y QUEMA DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS Y SU UTILIZACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. LA EXPERIENCIA DEL RELLENO SANITARIO DE LAS ROSAS.

Pablo Zamonsky*

Gerente de Aborgama, empresa dedicada a la gestión de residuos. Ing. Industrial Mecánico de la UdelaR (1990). Postgrado en Tecnología y Utilización del Gas Natural de la UdelaR. Control de Obras del Proyecto de Biogás del Relleno de Las Rosas para la UCC, DINAMA.

Sebastián Bajsa

Intendencia Departamental de Maldonado.



Dirección del autor principal: Calle Convención N° 1343, Of. 1202, Montevideo, CP 11100, Uruguay. Tel.- Fax: +59829083807. E-mail: pablo@aborgama.com

RESUMEN

Este trabajo se enmarca en las experiencias adquiridas en el “Proyecto Demostrativo de Captación de Biogás y Generación de Energía Eléctrica en el Relleno Sanitario de Las Rosas”, en el Departamento de Maldonado.

El Uruguay afronta el desafío de adecuar en un corto plazo los sitios de disposición final (SDF) de residuos sólidos urbanos (RSU), de forma tal de minimizar los impactos ambientales derivados de los mismos. En este sentido la construcción de rellenos sanitarios aparece como la clara alternativa para la solución de este problema, con un énfasis en la construcción de rellenos sanitarios regionales.

En este contexto, los proyectos de quema de biogás en rellenos sanitarios y su aprovechamiento energético aparecen como una oportunidad para mejorar el desempeño ambiental de los rellenos sanitarios, obtener aportes genuinos para la mejora en la gestión de los mismos, así como contribuir a la aceptación social de los rellenos sanitarios, pudiendo los beneficios de estos proyectos ser volcados a la población local.

Este tipo de proyectos pueden resultar a priori rentables a partir de cierto volumen mínimo de residuos. A través del MDL los municipios de países No Anexo I del Protocolo de Kioto pueden obtener fondos para ejecutar proyectos de quema o aprovechamiento energético del biogás, aunque cabe señalar que estos fondos son insuficientes para costear la diferencia entre un relleno sanitario y un simple vertedero de residuos. En muchos casos el rendimiento real de estos proyectos no ha cumplido con las expectativas, ya sea por modelos de proyección de producción demasiado optimistas, por problemas de operación de los sistemas, problemas de gerenciamiento, o una combinación de estos factores. Por lo tanto las claves del éxito de estos proyectos no son sólo técnicas, sino que es necesaria la conjunción de aspectos administrativos, políticos, financieros y gerenciales. Se abordan las principales experiencias aprendidas, de modo de contribuir al desarrollo de este tipo de proyectos.

Palabras Clave: Biogás, Eléctrica, MDL, Relleno, Sanitario.

1. INTRODUCCION

En la actualidad Uruguay posee una importante deficiencia en la disposición final de sus RSU. A pesar que la recolección de residuos domésticos tiene una muy buena cobertura a nivel urbano en todo el país, estos residuos son dispuestos mayoritariamente en sitios con medidas de control ambiental insuficientes. En la actualidad sólo 1 de los 25 SDF de residuos más relevantes del país tiene una condición ambiental aceptable, 2 cuentan con condiciones controladas, y los restantes 22 funcionan en condiciones ambientales inadecuadas (CSI-Pittamiglio, 2011). Esta contundente estadística indica que debe ser una prioridad para el Gobierno Nacional y los Gobiernos Departamentales la construcción de rellenos sanitarios, de forma tal de minimizar los impactos ambientales de la disposición final de los RSU. La implantación de rellenos sanitarios regionales puede mejorar las capacidades de gestión, disminuir los costos de la disposición final y favorecer

la viabilidad de proyectos de quema de biogás y aprovechamiento energético, la que se incrementa con la cantidad de residuos recibidos en el SDF.

Es claro que las inversiones prioritarias a realizar en los SDF para su transformación hacia rellenos sanitarios pasan por desarrollo de infraestructura de impermeabilización de fondos de celda, captación y tratamiento de lixiviados, y la adquisición de maquinaria específicamente asignada para la gestión de los SDF. A su vez, una adecuada gestión de los gases generados por la descomposición de los residuos deberá ser considerada en el diseño de los rellenos sanitarios a desarrollar, de forma tal de minimizar las emisiones de olores y evitar la posibilidad de migración subsuperficial de los mismos. El desarrollo de proyectos de combustión controlada reduce a su vez el potencial de efecto invernadero de los gases emitidos en la disposición final de los residuos, y podría generar aportes genuinos para la mejora de los SDF a través de la venta de Certificados de Reducción de Emisiones. La quema de estos gases aprovechando su potencial energético, puede añadir aun más valor a este proceso.

Respecto a la emisión de gases de efecto invernadero resultantes de la disposición final de residuos, en 2004 las emisiones anuales de metano del sector ascendieron a 53,91 kton en el Uruguay (UCC-DINAMA-MVOTMA, 2010), equivalentes a 1.132 kton CO₂, representando el 3,1% del potencial de calentamiento atmosférico de la totalidad de los gases emitidos a nivel nacional.

En relación al potencial energético, se estima que el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás de rellenos sanitarios de RSU en el Uruguay es de aproximadamente 15 MW, lo que representa cerca del 0,5% de la potencia actualmente instalada en el país. Otras tecnologías de recuperación de energía a partir de residuos, como es el caso de la incineración, pueden obtener una mayor cantidad de energía a partir de los mismos, pero a un nivel de inversión mucho mayor.

Este trabajo se enmarca en las experiencias adquiridas en el “Proyecto Demostrativo de Captación de Biogás y Generación de Energía Eléctrica en el Relleno Sanitario de Las Rosas”, en el Departamento de Maldonado. El mismo comenzó a operar en el año 2005 y fue financiado por medio de una donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM/GEF) con el objeto de difundir la experiencia en el país y en la región. Tuvo además aportes de la Intendencia Departamental de Maldonado (IDM) que actualmente es propietaria del proyecto, la empresa privada Aborgama que opera y mantiene la planta y del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente de Uruguay (MVOTMA). Los fondos fueron administrados a través del PNUD, con dirección y asesoría técnica del Banco Mundial. La empresa de energía eléctrica estatal UTE se comprometió, a través de la firma de un convenio, a la compra de la energía eléctrica producida. El sitio fue seleccionado a raíz de una evaluación realizada por la Unidad de Cambio Climático del MVOTMA de varios sitios de disposición final del país y la región. El Relleno Sanitario de Las Rosas fue el que presentó las mejores características para el desarrollo de este proyecto, además de contar con una línea de distribución cercana de energía eléctrica con capacidad de absorber la energía generada por el mismo. La instalación fue construida por el Consorcio español Guascor Sufi como adjudicatario de una Licitación Pública Internacional. Todos los integrantes del Proyecto estuvieron involucrados desde el inicio del proceso licitatorio, incluyendo las etapas de ante proyecto y proyecto ejecutivo. Seguidamente se resumen los aspectos más relevantes del diseño, operación y gestión de proyectos de quema de biogás en rellenos sanitarios y su aprovechamiento energético, en base a las experiencias adquiridas en el relleno Sanitario de las Rosas.

2. DISEÑO DEL PROYECTO

2.1. Diseño de la capacidad de las instalaciones

Está directamente relacionada al volumen de residuos, su fracción orgánica, características físico químicas, antigüedad, modo y calidad de operación del relleno sanitario (tapada, gestión de lixiviados, etc.). Se verán las consideraciones para la aplicación de los modelos de predicción de generación de metano. Como regla general es posible generar hasta 4,5-5 kw de potencia eléctrica por cada tonelada dispuesta por día en promedio.

2.2. Estudio de factibilidad

Se debe realizar a efectos de decidir si hacer una instalación de desgasificación, y en tal caso si solo quemar el biogás o hacer aprovechamiento energético adicional. La factibilidad económica incluye los montos de inversión, los ingresos anuales por venta de créditos de carbono y energía, y los costos de O&M. Existen reportes estadísticos para los costos de inversión (Willumsen y Terraza, 2009). Para analizar la pre factibilidad, el volumen mínimo de residuos que justifica una instalación para venta de créditos de carbono (sólo quema) es de unas 100 ton/día, y para generación de energía eléctrica de unas 300 ton/día. El precio de de la energía eléctrica no menor a 55-60 u\$s/MWh. Dadas estas condiciones a grandes rasgos, se debe encarar un estudio de factibilidad en detalle para cada sitio potencial. La inversión en los componentes del sistema de desgasificación del relleno puede ser sensiblemente menor si se consideran suministros locales o importados de países de economías menos desarrolladas. Este factor resultó clave para el desarrollo del proyecto de Las Rosas.

2.3. Test de bombeo

Por una parte los test de bombeo brindan información específica de un sector del relleno (aunque no general), y permiten parcialmente contrastar los valores obtenidos con las predicciones de los modelos. Normalmente consisten en tres pozos verticales de extracción de biogás, un succionador y tomas de muestras para medir la calidad del biogás, caudal, presión de succión. Estos test son solamente indicativos, pues la performance de una instalación de desgasificación sólo puede ser determinada en la realidad con suficiente tiempo (varios meses como mínimo para detectar diferencias estacionales y pluviométricas), y sometiendo el módulo a una desgasificación uniforme, debido a la variabilidad y asimetría de las condiciones de un relleno sanitario. Como mínimo los test deben operar en forma continua por al menos 6 a 8 semanas, y requiere de personal experimentado para analizar los resultados, de modo que sean lo más representativos posible de la condición futura de desgasificación con la planta completa operando (Willumsen y Terraza, 2009).

2.4. Modelos de generación de metano en rellenos sanitarios.

Un modelo habitualmente utilizado es el de decaimiento exponencial de primer orden, que puede expresarse como en la ecuación (1)

$$G_{CH_4n} = \sum_t \left(\sum_{i=1}^n k_i L_0 M_{i,t} e^{-k_i(n-t)} \right) \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde G_{CH_4n} es el volumen de metano generado en el año de proyección n ($m^3/año$); c es el año de inicio de disposición de residuos en la celda de influencia de la red de captación de biogás ($c < n$); k_i es el índice de decaimiento de metano de la fracción i de residuos ($año^{-1}$); L_0 es el potencial máximo de generación de metano (m^3/ton); $M_{i,t}$ son las toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados disponer de la fracción i en el año t .

El tiempo en años en que se degrada la mitad del residuo y está dado por la ecuación (2):

$$t_{1/2} = \ln 2 / k_i \quad \text{ecuación (2)}$$

El metano efectivamente captado está dado por la ecuación (3)

$$C_{CH_4n} = \mu_n \cdot G_{CH_4n} \quad \text{ecuación (3)}$$

Donde C_{CH_4n} es el volumen de metano captado en el año de proyección n ($m^3/año$) y μ_n es la eficiencia de captación durante el año n .

Los parámetros del modelo dependen de algunas características específicas de cada sitio que no son sencillas de determinar con precisión y además no son uniformes dentro del mismo relleno (temperatura, humedad, composición, edad y estructura de los residuos y tipo de cobertura del relleno). Hay modelos que requieren la información de las distribuciones de frecuencias de los parámetros (p.e. Gassim Model) en lugar

de un valor específico. Otros modelos requieren de la información del total de carbón degradable contenido en cada fracción de los residuos en lugar del parámetro L_0 (IPCC, 2006). La precisión de las proyecciones depende de la certeza de los parámetros específicos de cada sitio. En muchas ocasiones hay diferencias importantes entre valores proyectados y reales (Terraza *et al*, 2007), en algunos casos debido a parámetros irreales utilizados en los modelos, y/o por problemas de gestión de los proyectos. Para los parámetros k_i y L_0 en general no se dispone de los datos específicos de cada sitio. En el Relleno Sanitario de Las Rosas se extrapolaron valores referidos de otros sitios de similares características y climatología (SCS Engineers, 2005), y se adaptaron con la información local recabada. Las mediciones realizadas durante la operación del proyecto nos permitieron concluir que las predicciones de nuestro modelo fueron aceptables.

El modelo asume algunas simplificaciones de la realidad que se deben tener en cuenta para su correcta aplicación:

- El relleno no acumula biogás, lo que se genera se emite.
- Se proyectan caudales medios anuales, por lo que no es conveniente contrastar con datos de la realidad a corto plazo, ya que hay variaciones importantes en función de por ejemplo el nivel de humedad del relleno y de la tapada final.
- No hay cantidades relevantes de residuos industriales de características físico químicas muy diferentes a la de los residuos comunes urbanos que pueden alterar fuertemente la generación de metano, en la medida que hayan componentes inhibidores de la metanogénesis anaerobia.
- En nuestra aplicación se caracterizó el residuo en tres categorías, los de rápida, media y baja velocidad de degradación, con sus constantes de decaimiento exponencial correspondientes. De contar con información confiable más detallada es posible proyectar con más precisión. Por el contrario, se puede simplificar utilizando sólo un tipo de residuo promedio. Las proyecciones realizadas de esta última manera en el proyecto de Las Rosas no han conformado, por lo que los autores entendemos que la categorización realizada es una complejidad que vale la pena asumir, siempre y cuando la información disponible sea confiable.
- Los residuos comienzan a degradarse luego del primer año de su disposición en el relleno.
- La humedad media del macizo de residuos es homogénea. La realidad es que hay variaciones en la época seca respecto a la húmeda, y como se describe más adelante, los líquidos contenidos en el relleno tienden a fluir hacia los pozos de captación inundándolos rápidamente.

Estimación de los parámetros

- L_0 : es función del contenido orgánico de los residuos. No depende en teoría de la humedad, pero hay estudios estadísticos en rellenos en Estados Unidos que delatan una limitación del valor de L_0 con bajas precipitaciones (SCS Engineers, 2005; Willumsen y Terraza, 2009).
- k_i : es función de la humedad de los residuos, la disponibilidad de nutrientes, el pH, y la temperatura. Hay datos estadísticos (SCS Engineers, 2005; Gassim Model e IPCC, 2006).
- F_{CH_4} : Fracción en volumen de metano en el biogás. En rellenos sanitarios este valor está en el entorno del 45% al 60%, siendo 50% el valor usualmente tomado por defecto. En la planta de Las Rosas, como consecuencia de una operación en campo con un estricto control de la depresión a que se somete cada cabezal de captación de biogás se mantiene en un promedio en un rango de 50-54%. El caudal captado de biogás está dado por:

$$C_{Bn} = C_{CH_4n} / F_{CH_4n} \quad \text{ecuación (4)}$$

en que C_{Bn} es el caudal de biogás captado en el año n y F_{CH_4n} es la fracción en volumen de metano en el año n .

- μ_n : depende de la distancia entre pozos y drenes de captación, presión de succión, impermeabilidad de la tapada final y porcentaje de cobertura de dicha tapada final (si existen sectores sin tapada). Varía entre 50% y 90% (Willumsen y Terraza, 2009). En rellenos con tapada de tierra natural, su impermeabilidad es muy sensible a la humedad, por lo que esta eficiencia tiene una fuerte correlación directa con las precipitaciones, con efectos detectables muy rápidamente. Al depender también de los niveles de succión, en instalaciones con regulación manual en los pozos la eficiencia depende de la buena gestión del operador.

En la planta de Las Rosas se han determinado eficiencias entre 60% en climas secos y de hasta 75-80% en épocas lluviosas.

2.5. Radio de influencia de los pozos de captación

Una posible definición es el radio medio de un cilindro con eje en el pozo que determina un volumen dentro del cual el 90% del biogás generado es captado por el pozo (Vigneault et al, 2004). Depende de diversos factores: presión de succión del pozo, volumen de generación de biogás, densidad y permeabilidad del residuo, saturación, presencia de líquidos; los cuales no son simples de determinar con precisión, tampoco uniformes dentro del relleno, ni simétricos respecto al pozo, ni permanentes en el tiempo. Por tal motivo es habitualmente estimado empíricamente. Una regla práctica sugiere que el radio varía entre 1 y 1,5 veces la profundidad del relleno, dependiendo fuertemente la permeabilidad de la tapada final. Hay modelos y simulaciones numéricas para su estimación que pueden usarse para contrastar con las reglas empíricas (Gassim Model; Vigneault et al, 2004). En la planta de Las Rosas se instalaron pozos distanciados 35 metros que corresponde a un radio de influencia de unos 15 metros para una profundidad de relleno de 12 metros. Se realizaron experiencias en las que se midieron las presiones de biogás en el interior del macizo de residuos a diferentes distancias de los pozos de captación, a unos de 5 metros de profundidad, utilizando una lanza y puntero diseñada para tal fin. Se encontró que el volumen de residuos en depresión alcanza a lo sumo entre 2 y 3 metros del eje de los pozos, y cesa la incidencia del mismo a unos 30 metros (es decir, la presión medida es menor a la del relleno en zonas alejadas de los pozos cuyo valor medido fue de unos 120 mbar). La zona de depresión es importante a efectos de definir el área alrededor del pozo de la cobertura superior del relleno a reforzar su impermeabilidad, y la profundidad mínima de succión.

3. COMPONENTES DE LA INSTLACIÓN

3.1. Sistema de captación

- Drenes de captación. Pueden ser pozos verticales en rellenos de al menos 10 metros de profundidad o drenes horizontales en zonas del relleno de menor profundidad. Su construcción puede ser durante la operación del propio relleno de residuos, o posterior al cierre de cada celda. En el primer caso es más sencillo de construir, y evita el destape de residuos ya enterrados, que genera olores fuertes y condiciones de higiene laboral más complejas. Otra ventaja de los construidos en conjunto con el relleno es que se pueden apoyar en la base del mismo sobre los drenes de lixiviado, de modo que son más eficientes para la evacuación por gravedad de los líquidos y tienen menos probabilidad de requerir bombeo. En la planta de Las Rosas hay 20 drenes verticales y 2 horizontales construidos a posteriori del relleno, y 16 pozos verticales durante la operación del relleno. Los pozos se equipan con un tubo central de PEAD PN10 perforado, rodeado de piedra que separa los agujeros del tubo de los residuos y aumenta el área de succión en contacto con los mismos, y en el caso de ser construidos en conjunto con el avance del relleno se instala una malla electro-soldada de hierro que sirve de contención de la piedra. La toma de succión consiste en un cabezal con una válvula de regulación de presión (manual o automática), toma de muestras y de ser necesario conexiones para una bomba neumática de lixiviado. Pueden ser acoplados rígidamente al tubo vertical perforado, o preferiblemente conformando una campana alrededor de este tubo, de modo de amortiguar los esfuerzos transmitidos al tubo central del pozo por los asentamientos del relleno, mayores en la parte superior. Esta campana debe alcanzar una profundidad mínima de modo de evitar el ingreso de aire al sistema. En un radio de 3 metros del cabezal se instala una membrana de PEAD como barrera para la entrada de aire cuando se somete el pozo a depresión. La fotos 1, 2 y 3 muestran cada tipo de dren construido en la planta de Las Rosas.



Foto 1: Cabezal de pozo construido post relleno



Foto 2: Pozo levantado al construir el relleno



Foto 3: Cabezal de dren horizontal

- Líneas de conducción del biogás desde los cabezales de los drenes de captación hasta la central de desgasificación. Pueden instalarse enterradas o tendidas sobre la tapada final del relleno. Se construyen en PEAD negro PN6, y se dimensionan de modo de limitar la máxima pérdida de carga y velocidad del biogás. En el tendido sobre el relleno, dado que el biogás emana del macizo de residuos sobresaturado de humedad, al estar los tubos a temperatura ambiente, se genera una cantidad importante de condensado que desestabiliza el flujo, la presión y pueden llegar inclusive a obstruir ramales de conducción. Se debe dar pendiente a las tuberías e instalar en los puntos bajos purgas de condensado que se puede re inyectar en el relleno o enviar a la planta de tratamiento de lixiviado. Debido a los asentamientos diferenciales, los puntos bajos pueden desplazarse con el tiempo, por lo que entendemos es preferible la instalación vista de la tubería, en que este aspecto es posible mantener fácilmente. La foto 4 muestra una parte del tendido en la planta de Las Rosas.



Foto 4: Líneas de conducción



Foto 5: Sala de desgasificación



Foto 6: Antorcha

- Bombas de lixiviado. Extraen el lixiviado de los pozos. Son usualmente neumáticas para evitar riesgos de explosión. Se pueden instalar en un pozo contiguo al de biogás o en el mismo pozo. El lixiviado contenido en el relleno dentro del radio de influencia del pozo es conducido con el biogás hacia el mismo, por lo que si el relleno tiene mucha de humedad, afecta al radio de influencia y el pozo se tiende a inundar provocando un sello hidráulico. La dinámica conjunta de gases y líquidos que se genera en el relleno al someterlo a captación hace que la evacuación del líquido en un pozo tenga muy poca incidencia en la de los pozos vecinos, por lo que puede ser necesario instalar bombas en la totalidad de los pozos. Este sistema de bombeo tiene un costo importante. En la planta de Las Rosas hay 22 bombas instaladas de diseño y fabricación propia que permitieron disminuir drásticamente este costo.
- Central de desgasificación. Consta de un colector al que ingresan las líneas de conducción a través de válvulas manuales o automáticas, cuya apertura es función de la calidad del biogás (contenido de CH₄ y O₂). La depresión en este colector se debe mantener constante para estabilizar el sistema. Esto se logra por medio de una válvula reguladora o de un control de velocidad de la soplante. Para la succión se instalan aspiradores centrífugos, cuya presión de salida depende si el biogás se destina a quema o a generación eléctrica. La planta de Las Rosas tiene dos equipos de 500 Nm³/h, uno en operación y otro stand by. Se debe cuidar el rango de operación de la soplante para evitar problemas de cavitación ante bajos caudales. En caso de generación eléctrica se instala un equipo secador de biogás (en general un enfriador por agua) para quitar el remanente de agua. La instalación eléctrica debe ser anti explosión. Contiene los elementos de control, caudalímetros, manómetros, tomas de muestras, purgas, etc. (Foto 5).
 - Sala de control. Contiene el PLC de comando de la central de desgasificación y comunicación con la central de generación de energía eléctrica, así como medidores de CH₄, O₂, transductores de presión, etc., y un sistema de control de proceso por ordenador.

3.2. Sistema de utilización

- Antorcha: Si se genera energía eléctrica sólo funciona cuando la generación está fuera de servicio. La combustión del biogás reduce las emisiones de metano a la atmósfera contribuyendo globalmente a la reducción de gases de efecto invernadero y localmente a la mejora de la calidad del aire (disminución de riesgos de explosión y olores). Hay antorchas abiertas y cerradas. Las primeras realizan la combustión mezclando el biogás con el aire atmosférico en condiciones pobres de regulación, generando así

combustiones incompletas, que no cumplen con las normas de emisiones. Una antorcha cerrada contiene el conjunto de quemadores en la parte inferior con chimenea recubierta con material refractario. Permite condiciones de combustión de acuerdo a los estándares de países o del MDL (normalmente 1000 °C durante un mínimo de 0,3 seg y eficiencia de combustión entre 98% y 99,5%). La planta de Las Rosas cuenta con una antorcha de tipo cerrado de 500 Nm³/h de capacidad (Foto 6).

- Generadores de energía eléctrica. Para potencias menores a 4 MW se utilizan motores de combustión interna o micro turbinas de baja potencia, para mayores potencias turbinas de gas y hasta de vapor. La ventaja de los motores de combustión interna en países menos desarrollados es la capacidad de mantenimiento, mayores potencias se pueden lograr con varios equipos en paralelo. La calidad del biogás para esta aplicación debe ser superior a la de sólo quema, en especial el contenido de humedad y de otros contaminantes como los siloxanos. La planta de Las Rosas cuenta con dos generadores de 0,5 MW, movidos por motores de combustión interna. En este caso dado que los residuos del relleno son exclusivamente urbanos, y las tierras de tapada arcillosas, los contenidos de contaminantes son bajos y no presentan graves inconvenientes para los motores.

- Otros usos. La generación térmica es más sencilla y eficiente, pero el precio por unidad de energía es menor y no se puede distribuir a grandes distancias, aunque se hace en países del norte y este de Europa para calefacción de barrios de ciudades. Una aplicación local es la evaporación de lixiviado generado en el relleno sanitario. Otros usos son la depuración e inyección del metano componente del biogás a una red de gas natural, o su compresión y utilización como gas natural vehicular, o en celdas de combustible.

4. OPERACIÓN DEL PROYECTO

La eficiencia de una planta de biogás está íntimamente relacionada a la operación no sólo de la planta en sí sino de la calidad del relleno sanitario. Los principales factores que inciden en dicha eficiencia son:

- Impermeabilidad de la tapada final respecto a los gases y al agua. Con respecto a los gases, incide debido a que el aire afecta a la calidad del biogás aspirado y a la condición anaerobia del relleno, y también afecta a la cantidad de biogás captado ya que la tapada final constituye una barrera a las fugas de biogás a través de la misma. Respecto al agua, rellenos muy húmedos generan las dificultades ya mencionadas afectando el radio de influencia de los pozos, y por el contrario, rellenos muy secos pueden inhibir la metano génesis. Por tal motivo puede requerirse de riego para aumentar la impermeabilidad y/o inyección de líquido en el relleno.

- Compactación de los residuos. A mayor compactación menos aire y mejores condiciones para las reacciones anaerobias. Residuos de construcción enterrados en conjunto con residuos urbanos inciden negativamente ya que impiden una buena compactación. Además a mayor compactación menores asentamientos diferenciales del relleno y menores los esfuerzos a los que se somete la estructura de los pozos.

- Presión de succión. La presión de las líneas de distribución se debe mantener estable entre -60 y -70 mbar. Dentro de los pozos esta presión depende de la calidad del biogás que se obtenga, y normalmente es mucho menor (de 0 a -10 mbar), por lo que instalan válvulas manuales o automáticas en cada cabezal. Se deben medir al menos una vez al día los componentes del biogás y en función de ello regular la presión en cada pozo. Un exceso de depresión puede hacer ingresar aire al cabezal lo cual es detectado por un aumento del contenido de O₂. Un aumento del CO₂ y disminución del CH₄ sin aumento del O₂ puede sugerir que el aire ingresa a través del macizo de residuos dentro del radio de influencia del pozo, inhibiendo el proceso anaerobio en ese sector por mucho tiempo. En la planta de Las Rosas las válvulas son manuales. Se requiere de personal calificado para esta regulación.

- Control del condensado en las líneas de distribución. Su eficiencia depende de un diseño adecuado de los puntos de purga y de un control frecuente de los movimientos de las líneas para mantener fijos los puntos bajos. Esta tarea se dificulta si la red de distribución es enterrada.

5. GESTIÓN DEL PROYECTO

La correcta aplicación de los modelos de proyección de producción, y una operación eficiente del relleno y de la planta de biogás inciden fuertemente en los resultados de los proyectos. En este sentido se han detectado en numerosos casos desviaciones (Terraza *et al*, 2007; Willumsen y Terraza, 2009) que resaltan la importancia de difundir estas experiencias, con el apoyo de Instituciones y Empresas que operen en estas actividades. Las Intendencias son las responsables y propietarias de los residuos. Una conjunción pública privada eficiente, tanto para la operación del relleno sanitario como para el desarrollo de proyectos de desgasificación aparece como una oportunidad para su desarrollo y mantenimiento en el tiempo.

Con respecto a las oportunidades en el MDL, existe incertidumbre en torno a un posible segundo período de compromisos en el marco del Protocolo de Kioto posterior al año 2012. A pesar de ello, actualmente más del 90% del mercado de carbono se encuentra vinculado al Sistema de Comercio de la Unión Europea (EU ETS). La fase 3 de este Sistema que abarca el período 2013-2020, prevé entre otros aspectos, que los créditos de carbono emitidos luego del 2012 puedan ser utilizados para el cumplimiento si provienen de proyectos MDL registrados antes del 31 de diciembre de 2012. En este marco, un nuevo proyecto sería casi imposible de inscribir en este plazo, pues el proceso completo de registro lleva del orden de un año y medio. Por otra parte, considerando los resultados de la última reunión de la COP/MOP de Cancun - México, es posible pensar en que los mecanismos de mercado existirán en un régimen post 2012, ya sea a través de un MDL mejorado y/o nuevos instrumentos. Para esto habrá que esperar los resultados de la próxima reunión de las Partes que se realizará en Durban - Sudáfrica en diciembre de 2011.

Si bien la energía producida en este tipo de proyectos no es de gran porte respecto al consumo de las poblaciones que lo generan, pueden aportar a la necesaria diversificación de la matriz energética a costos competitivos. A su vez son un importante aporte a la valorización social de la gestión de residuos sólidos, pudiendo los beneficios obtenidos ser volcados a la población, mejorando la aceptación local de los rellenos sanitarios.

Agradecimientos

A las Instituciones y Empresas participantes del Proyecto de Las Rosas: Banco Mundial (BM), PNUD, Unidad de Cambio Climático (UCC) del MVOTMA, Intendencia de Maldonado (IDM) y Aborgama de Uruguay. Al Ing. Horacio Terraza quien estuvo a cargo del Proyecto por el BM, al Ing. Hans Willumsen como Consultor titular de la firma LFG Consult de Dinamarca, al Ing. Luis Santos y Técnicos de la UCC y al Ing. Jorge Hourcade de la IDM, al Sr. José H. Penido como Consultor del BM y del PNUD para la selección del sitio del Proyecto, y la Ing. Lilita Borzacconi de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República de Uruguay; todos ellos por sus invaluables aportes a lo largo del Proyecto que ayudaron al desarrollo del mismo.

REFERENCIAS

1. CSI-Pittamiglio (2011). Hacia el Diseño de un Plan Estratégico de Residuos Sólidos en Uruguay, Taller de Intercambio con Responsables del Área de RSU de los Gobiernos Departamentales, 31 de agosto de 2011.
2. Gassim Model, <http://www.gassim.co.uk>.
3. IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.
4. SCS Engineers (2005). Reporte de prueba de bombeo y estudio de pre – factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Montevideo, Montevideo, Uruguay.
5. Terraza H., Willumsen H., Guimaraes H. (2007). Design vs. Actual Performance and the Future for CDM Projects, sponsored by: Canadian International Development Agency, The World Bank.
6. UCC-DINAMA-MVOTMA (2010). Tercera Comunicación Nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático.
7. Vigneault H. Lefebvre R., Nastev M. (2004). Numerical Simulation of the Radius of Influence for Landfill Gas Wells.
8. Willumsen H., Terraza H. (2009). Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization, for the Inter-American Development Bank.