

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL GAS METANO PRODUCIDO POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE LOJA

INTRODUCCIÓN

La generación de lodos primarios y secundarios como resultado del tratamiento de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Loja, puede traer también ciertos beneficios dependiendo del tratamiento o destino que se les dé. Una forma de aprovechar los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas es por medio del biogás que se obtiene como subproducto en la digestión anaerobia de los lodos. La línea de biogás está previsto construirla en la segunda etapa de la Planta de Tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Loja.

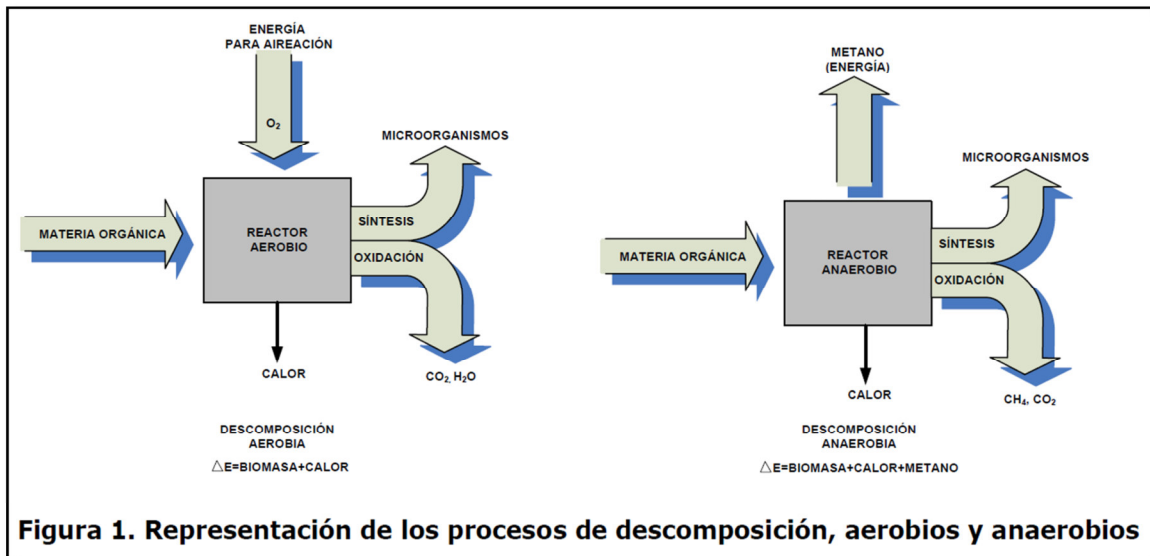
La digestión anaerobia es un proceso de estabilización bioquímica, en el cual, se lleva a cabo la destrucción de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno. En plantas de tratamiento del tamaño de la de Loja, se pueden obtener grandes beneficios derivados del aprovechamiento del biogás. El biogás generado puede producir entre 40 y 70% de la energía requerida en un tratamiento biológico convencional. Las tendencias actuales han ocasionado que este tipo de procesos aplicado a los lodos sean cada vez más rentables. El mercado de la energía es muy volátil, el costo de la electricidad, gas natural y combustibles fósiles ha aumentado dramáticamente, favoreciendo el uso de fuentes renovables de energía. La tecnología se ha desarrollado, ofreciendo alternativas más eficientes y más económicas que hacen viable implementar dichos sistemas. La mejoría de los sistemas ha permitido la optimización de recursos y con esto, reducir los costos de operación. La sociedad demanda soluciones que causen un menor impacto en el medio ambiente. Este conjunto de factores hace que la utilización de biogás se deba considerar como parte integral del proceso en una planta de tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, se puede aprovechar el biogás en un sistema de cogeneración, que genera electricidad y energía térmica simultáneamente, logrando una eficiencia global mayor a la que se obtiene cuando se utilizan sistemas separados con el mismo propósito. Durante la cogeneración se utiliza el biogás para alimentar un motor-generator para generar electricidad, el agua de enfriamiento que se descarga del motor, a una temperatura de 70 a 82 °C, y el gas de escape caliente del motor se pueden utilizar para calentamiento del digestor anaerobio mediante un intercambiador de calor.

GENERACIÓN DE SÓLIDOS Y LODOS

Producto del tratamiento de las aguas residuales en la PTAR resultará un volumen de sólidos considerable que difieren en cantidad y calidad. En la etapa de pretratamiento se tienen los sólidos gruesos retenidos en el sistema de cribado que incluye todo tipo de material orgánico e inorgánico de tamaño suficientemente grande para ser eliminados por rejillas de gruesos y de finos. El contenido de materia orgánica varía dependiendo de la cultura ciudadana y de las condiciones climáticas, generalmente en períodos lluviosos hay una mayor contribución. Por otro lado, está la arena retenida en el desarenador, que dependiendo del control de la velocidad puede contener cantidades significativas de materia orgánica. Finalmente, está la espuma y natas formada por materiales flotantes recogidos en la superficie de los tanques de sedimentación primaria. Puede incluir grasas, aceites jabones, residuos alimenticios cáscara de frutas y hortalizas, cabellos, colillas de cigarrillo, supositorios de plástico, preservativos de plástico, etc. Considerando las operaciones y procesos que se utilizarán para remover la materia orgánica se tienen: los lodos de desperdicio del sedimentador primario, el humus que se desprende de los filtros percoladores, utilizado como tratamiento secundario, que es relativamente inodoro cuando está fresco y, experimenta generalmente la descomposición más lentamente que otros lodos crudos y se digieren fácilmente, pero cuando contienen muchos gusanos pueden convertirse rápidamente en molestos.

DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA DE LODOS BIOLÓGICOS

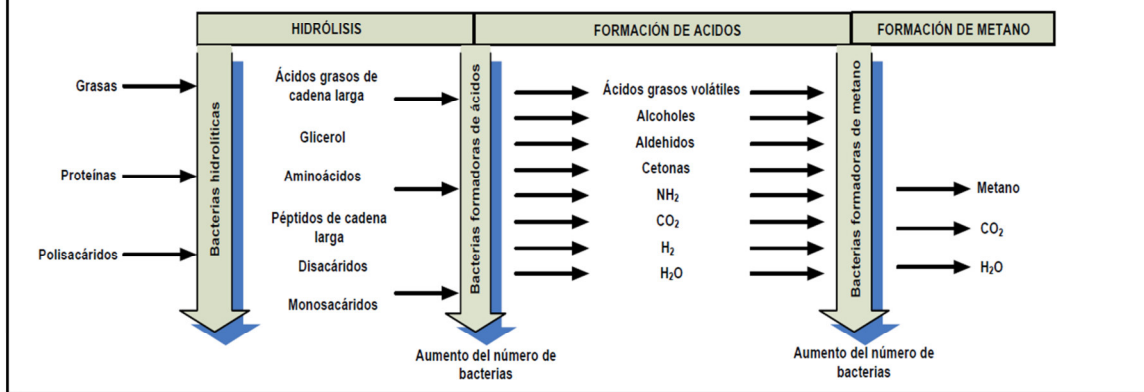
La descomposición anaeróbica de la materia orgánica asociada con la fracción volátil de los sólidos suspendidos totales (SST) involucra procesos metabólicos que son menos eficientes que el metabolismo aeróbico (por ejemplo, oxidación con aire). Los organismos anaeróbicos casi siempre liberan materia orgánica rica en energía contenida en los enlaces de los compuestos orgánicos, en su mayor parte en los enlaces del metano que, dada su característica gaseosa a condiciones normales de temperatura y presión, escapa hacia la atmósfera. Es decir, los microorganismos anaerobios no utilizan completamente la energía potencial que reciben. Estos mismos sustratos se transformarían totalmente en H_2O y CO_2 en ambientes aeróbicos. De esta forma, hay menos energía disponible para el crecimiento de las bacterias anaeróbicas. Por esto, los microorganismos anaeróbicos producen menos materia celular por unidad de sustrato consumido que los aeróbicos (Zegers, 1987). En la figura 1 se presenta una representación esquemática de los procesos de descomposición aerobios y anaerobios.



ETAPAS DEL PROCESO ANAERÓBICO

Este es un proceso biológicamente complejo y requiere de la acción combinada de muchos microorganismos para la completa conversión de los materiales orgánicos. En él intervienen microorganismos anaerobios facultativos y obligados anaerobios capaces de convertir el material orgánico en productos gaseosos, como anhídrido carbónico y metano. El proceso, básicamente se realiza en tres etapas, tal como se ilustra en la figura 2. Primero, los compuestos de alto peso molecular, como las proteínas y los polisacáridos, son descompuestos en sustancias solubles de bajo peso molecular, como los aminoácidos y azúcares. Esto se conoce como la fase de hidrólisis. Las grasas se hidrolizan lentamente; por esta razón la hidrólisis puede ser la etapa que limite la velocidad de reacción de todo el proceso, incluida la generación del metano. En segundo lugar, los nutrientes orgánicos son convertidos en ácidos grasos inferiores en una fase de fermentación ácida, que baja el pH del sistema. Esta etapa generalmente conduce a la formación de ácido acético, aunque, en caso de inestabilidad del proceso, lleva a valérico e iso-valérico. Finalmente, en la etapa de fermentación del metano o metanogénica los ácidos orgánicos son convertidos en metano, anhídrido carbónico y una pequeña cantidad de hidrógeno.

Figura 2. Pasos principales de los procesos metabólicos involucrados en la digestión anaerobia



El equilibrio entre las fases de producción de ácidos y de producción de metano es importante. Los organismos productores de metano son muy sensibles a los bajos niveles de pH, y si el pH cae por debajo de su nivel de tolerancia de aproximadamente 6.2, cesa la producción de metano.

Para mantener una población de organismos metanogénicos en el sistema y asegurar que ocurra la producción de metano, el tiempo de residencia de la biomasa en el sistema debe ser suficientemente prolongado para impedir que sea lavada fuera del sistema. El término tiempo de residencia de los lodos con respecto a la población microbiana activa en tratamiento anaerobio es algo ambiguo, ya que el término lodos representa generalmente una gran proporción de masa no activa. Sin embargo, es el tiempo de residencia de los organismos metanogénicos el que constituye el parámetro clave.

DEFINICIÓN DEL BIOGÁS

El biogás es un gas combustible que se crea como resultado de la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Se considera también como una fuente energética sostenible que reduce el impacto ambiental (olores) y no produce emisiones de gases de efecto invernadero.

COMPOSICIÓN

El biogás está compuesto principalmente por metano (CH₄), gas carbónico (CO₂) y trazas de gas sulfhídrico (H₂S). También se compone de pequeños porcentajes de N₂, H₂ y O₂.

Analítica Tipo

Componentes	Composición %V
Metano CH ₄	del 52 al 65 %
CO ₂	del 30 al 40%
H ₂ S	de 500 a 10.000 ppm
N ₂	del 1 al 8%
O ₂	hasta el 2 %
Otros	hasta el 2 %

PRODUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS

La producción de biogás es función de la destrucción de sólidos suspendidos volátiles en el digestor. Ésta es entre 0.8 a 1.1 m³ de biogás por cada kilogramo de sólidos suspendidos volátiles destruidos (WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 1998). El biogás producto de la destrucción anaerobia de la materia orgánica tiene una gravedad específica de aproximadamente 0.86 en relación al aire (Metcalf & Eddy, 2004).

En la Planta de Tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Loja, el biogás se producirá durante la digestión anaerobia de fangos, la cual será construida en una segunda etapa y que estará conformada de la siguiente manera:

Segunda etapa de línea de lodos:

- **Espesamiento de lodos:** Todo el lodo se espesa en cuatro unidades circulares de gravedad que tienen un diámetro de 14 m y una altura en vertedero de 3,6 m.
- **Deshidratación de lodos:** Se han previsto tres centrifugas para deshidratar todo el lodo con el diseño propuesto, para una capacidad unitaria de 25 m³/h y una carga por máquina de 748 kg/h de materia seca procesada.

- Estabilización anaerobia de lodos: La estabilización se realiza en tres digestores anaerobios de 24 m de diámetro.

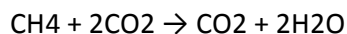
La digestión anaerobia de lodos es donde se produce el biogás, por lo que este proceso debe ser controlado de manera efectiva para garantizar una adecuada generación de biogás. Los principales parámetros para controlar este proceso son:

Parámetros físicos	Parámetros químicos
Temperatura	pH
Tiempo de retención hidráulica	Alcalinidad
Tiempo de retención de la materia	Ácidos volátiles
Tasa de alimentación	Nutrientes
Mezcla / homogenización interior	Compuestos tóxicos
Concentración de sólidos	
Concentración de sólidos volátiles	

GENERACIÓN POTENCIAL DE BIOGÁS

La digestión anaerobia de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) que hace parte de los lodos primarios sedimentados como SST más el humus que se desprende de los filtros percoladores genera biogás.

Para efecto de evaluar el potencial de metano que se generará por la digestión anaerobia de la fracción de sólidos suspendidos volátiles removidos en los sedimentadores primarios, utilizaremos los factores normalizados de conversión equivalente entre gramos de DQO removida y mililitros de metano producido a una temperatura dada. Asumiendo condiciones a nivel del mar y 0°C, 1.0 g de DQO es equivalente a 350 ml de gas metano seco, de acuerdo a lo propuesto por McCarty. Según él, la cantidad de metano generado durante el tratamiento anaerobio se estima con base en el oxígeno equivalente de la oxidación del metano en la siguiente ecuación estequiometría:



La corrección por temperatura a nivel del mar se hace a partir de la siguiente relación de aplicación de la ley de Charles:

$$350 (273 + T \text{ } ^\circ\text{C}) / 273$$

Para una temperatura de digestión de **30°C** dentro del reactor, la producción de metano por gramo de DQO oxidada es de aproximadamente **388 ml**, que por corrección de altitud corresponde aproximadamente a **370 ml**. Considerando un porcentaje del 60% de metano en el biogás, para 30°C se estima que el biogás generado es del orden de **612** mililitros por 1 gr de DQO.

CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS Y ENERGÉTICAS DEL BIOGÁS

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 alrededor de los 500 °C), la temperatura de la llama alcanza 870 °C (Chinoweth, D., 2002). 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 40%. Cuando el contenido de metano es mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.

El poder calorífico del biogás varía dependiendo del contenido de metano, siendo el poder calorífico de éste de 35800 kJ/m³ (Metcalf & Eddy, 2004). Aunque el contenido de hidrógeno afecta el poder calorífico del biogás, el metano es el componente principal del combustible. El poder calorífico alto del biogás varía entre 18600 y 26100 kJ/m³, con un promedio de 23800 kJ/m³. Este poder calorífico corresponde al calor liberado durante la combustión, medido con calorímetro. Las eficiencias de los motores normalmente se basan en el poder calorífico inferior, que es el poder calorífico del gas cuando no se ha condensado el vapor de agua producido por la combustión. Como comparación, un biogás que contiene 70% de metano tiene un poder calorífico inferior de 23800 kJ/m³ y un poder calorífico alto de 26200 kJ/m³. La eficiencia global de conversión de la energía química del biogás en energía eléctrica producida es normalmente 38-39%.

UTILIZACIÓN DEL METANO

Si el poder calorífico del biogás, por ejemplo, se estima en 5500 kcal/m³, es decir, 1 m³ de biogás puede reemplazar 0,46 kg de gas propano, 0,71 kg de gasolina, ó 3 kg de leña. De otra parte, 1 m³ de biogás equivale aproximadamente a 3 kWh, todo esto dependiendo del metano existente en el biogás (Cofré, C., 2001). A pequeña escala, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa. Sin embargo, también puede ser utilizado para iluminación, como reemplazo de la gasolina o el diesel en motores de combustión interna o en motores a gas para

generación de energía (Cuervo, H., 2002). Para que se justifique la generación de energía se debe contar con una buena y constante producción de metano que debe purificarse para remover el H₂S que tiene un alto poder corrosivo.

Una vez obtenido el biogás se lo puede aprovechar de la siguiente manera:

- Uso en calderas de combustión.
- Uso en motores de combustión interna.
- Uso en turbinas.
- Uso en células de combustible.
- Conversión a gas natural.

COGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los componentes de un sistema de cogeneración incluyen el motor, el generador, la recuperación de calor y la interconexión eléctrica, integrados en un solo sistema. Aunque la energía mecánica del motor normalmente se utiliza para generar electricidad, también se puede utilizar para impulsar equipo rotatorio como compresores, bombas y sopladores. La energía térmica del proceso se puede utilizar en aplicaciones directas en proceso o indirectas para producir vapor, agua caliente, aire caliente para secado o agua fría para enfriamiento de proceso.

Los principales beneficios de la cogeneración son:

- Mayor eficiencia en la conversión y uso de energía.
- Menos emisiones al ambiente.
- El aprovechamiento de combustibles alternos disminuye costos, reduce la necesidad de disponer del residuo y proporciona competitividad económica.
- El empleo de formas de generación de electricidad descentralizadas con alta eficiencia evita pérdidas por transmisión y aumenta la flexibilidad en el uso del sistema.

El interés de utilizar sistemas de cogeneración en las plantas de tratamiento de aguas residuales ha crecido en los últimos años. Algunos de los factores que lo promueven son:

- Tener energía de respaldo (proporciona confianza durante cortes en el suministro de energía).
- La disponibilidad de combustible gratuito.

- El interés en el uso de fuentes renovables de energía y los incentivos que ofrece el gobierno (energías limpias).

Las tecnologías de cogeneración que actualmente se consideran para utilizar el biogás son los motores de combustión interna, las microturbinas, las turbinas de gas, las celdas de combustible y los motores Stirling.

Los motores de combustión interna son la tecnología más comúnmente usada en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos motores ofrecen la ventaja de su baja emisión de óxidos de nitrógeno que puede cumplir con las regulaciones de emisiones a la atmósfera. Normalmente se utilizan en tamaños de 250 a 2,500 kW. El factor de eficiencia de transformación a electricidad es del 25 al 40%. Si los intercambiadores de calor son del tamaño correcto, se pueden recuperar hasta 7400 kJ/h de calor por cada kW alimentado al generador, lo que aumenta la eficiencia del 40 al 45%. La eficiencia global del sistema, que incluye recuperación de calor del aceite lubricante, cubierta del motor, agua y gas, puede ser del 70 al 80%.

La principal dificultad que se presenta al aprovechar el biogás es que puede requerir un extenso pretratamiento previo a su aprovechamiento para evitar daños al equipo. El nivel de tratamiento requerido es variable, depende de las necesidades de la tecnología de cogeneración utilizada. Se deben eliminar Siloxanos, sulfuro de hidrógeno, contenido de humedad y elementos traza.

En la PTAR Loja se pretende utilizar el biogás en un sistema de cogeneración para producir electricidad que permita abastecer a la planta de energía eléctrica para el uso en las operaciones diarias de la misma. La cantidad de energía eléctrica generada diaria está dada de la siguiente manera:

-Volumen total fangos a digestión (m ³ /día)	845
-Tiempo de retención (días)	20
-Producción diaria de gas (Nm ³ /día)	8.383
-Producción de gas media (Nm ³ /h)	349
-Energía eléctrica generada diaria (kwh/día)	16.716

Cogeneración con Motogenerador. Esquema de funcionamiento

El diagrama ilustra el ciclo de funcionamiento de un sistema de cogeneración basado en un motogenerador. El proceso comienza con la deshidratación de lodos de depuración, que se envían a un digestor. El gas de alcantarillado producido se comprime y mide antes de entrar en un motor-generador. El motor-generador produce energía eléctrica y calienta un intercambiador de calor. Este intercambiador calienta el agua que circula en un circuito cerrado, generando vapor que se utiliza para calentar los lodos en el digestor. El vapor residual se libera a través de una chimenea. Los lodos tratados pueden ser utilizados agrícola o industrialmente.

En la segunda etapa de construcción de la PTAR Loja, cuando se utilice la digestión anaerobia de los lodos y su quema, para minimizar el impacto ambiental por el efecto negativo del metano sobre la capa de ozono se implementará un quemador de alta eficiencia con una capacidad del orden de 360 Nm³/h, construido en acero inoxidable, encendido por bujía eléctrica, provisto de un sensor de llama UV, filtro atrapallamas, válvula de corte en acero inoxidable y ventana corrediza para inspeccionar su funcionamiento. Incluye además, tablero de control en gabinete metálico, medidor de flujo de biogás y acumulador de datos, integrado por interruptor de energía (110 CA), pulsador eléctrico y bobina de alta tensión para encendido manual del quemador, una alarma auditiva (sirena) que se active al apagarse la llama del quemador, lo cual pondrá sobre aviso al operador o celador para encender manualmente la llama. Está proyectado para trabajar a la intemperie y cumple con toda la normativa para evitar el peligro de explosión. Para mejorar a velocidad de salida del biogás se debe acoplar una bomba tipo Booster que eleve la presión de descarga al quemador alrededor de 1 psig.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Environmental Protection Agency-EPA. Manual Wastewater Treatment/ Disposal for Small Communities, 1992.

Crites, R., Tchobanoglous, G., Small and Decentralized Wastewater Management Systems. McGraw-Hill, 2000.

Metcalf & Eddy Inc. and Tchobanoglous, Burton and Stensel. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. McGraw-Hill, 2004.

Chernicharo C. A. Anaerobic Reactors. IWA Publishing, 2007.

Young J. C, Yang B. S. Design Consideration For Full Anaerobic Filter. Journal WPCF, 1989.

Cuervo, F. H. Tratamiento de Aguas Residuales: Diseño, Operación y Control. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Antioquia, 2005.