

CONTROL DE PROCESO EN BIODIGESTORES

(DIPL. ING. GABRIEL MONCAYO ROMERO)

Los biodigestores son sistemas biológicos en donde se desarrolla un proceso natural microbiano que produce biogás. La degradación anaeróbica se desarrolla en cuatro procesos biológicos consecutivos: hidrólisis, acidogenesis, acetogenesis y metanogenesis. Si una de estas cuatro etapas se ve afectada negativamente por una variación de los parámetros de proceso, afecta consecutivamente a todas las demás etapas. Esta afectación puede ocasionar una inhibición del proceso de biodigestión.

Los parámetros más fáciles de controlar para que la operación de un biodigestor sea exitosa y eficiente son los parámetros de diseño y proceso. Estos incluyen el diseño del biodigestor, el manejo de la biomasa y su proceso de alimentación (mezcla, hidrolización, almacenamiento), el tipo y frecuencia de agitación en el biodigestor.

Hay parámetros que caracterizan el proceso, como la cantidad de materia prima y su composición (proteínas, grasas, hidratos de carbono), producción de biogás y sus características, concentración total de sólidos (MS), masa volátil (MV) y la relación C:N. En países tropicales no se puede influenciar la temperatura de proceso a no ser que se trate de un biodigestor calefaccionado.

Otros parámetros pueden indicar con antelación si un proceso puede ser inestable o está entrando en inhibición. Estos son los ácidos grasos volátiles (AVG), relación de alcalinidad, potencial redox, la concentración de amonios, H₂S, pH, relación FOS/TAC.

Por último, pero no menos importante, hay parámetros de proceso que en cierta medida pueden ser variados y corregidos por el operador del biodigestor antes de que se desequilibre el proceso; por ejemplo alimentación, velocidad de carga orgánica (COV) y tiempo de retención hidráulica (TRH), y tiempos de agitación.

Son muchos los problemas, fallas operativas, de alimentación, control, etc. que pueden ocurrir durante la operación de los biodigestores. Estas fallas pueden ocasionar una reducción de la producción de biogás o la paralización total del proceso de biodigestión.

Durante la alimentación del biodigestor se pueden cometer los siguientes errores más comunes.

- Errores de alimentación.
- Sobrecarga hidráulica
- Inhibición por amonios
- Inhibición por sulfuro de hidrógeno
- Errores en el control de parámetros operativos.
- Errores en la operación de agitadores y extracción de lodos.

Alimentar el biodigestor con demasiada biomasa ocasiona un aumento de la carga orgánica volumétrica, una disminución del tiempo de retención y probablemente una inhibición del proceso de biodigestión por el aumento de la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) que no pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas para la producción de biogás.

Una sobrecarga orgánica se produce cuando la cantidad de materia orgánica con la que se alimenta el biodigestor excede la capacidad de la degradación total de las bacterias para producir biogás. Como consecuencia, la materia orgánica sólo es parcialmente degradada a AGV los que se acumulan en el biodigestor. Si esto ocurre disminuye generalmente la concentración de metano en el biogás.

Si la concentración de los AGV acumulados excede la capacidad tampón del biodigestor, se produce su acidificación y el pH disminuye. Si no se toman medidas, la acidificación reducirá la producción de biogás al mínimo o cesará totalmente. En la práctica, las causas comunes de sobrecarga orgánica (y en consecuencia la acidificación) pueden también producirse por cambios inesperados de la biomasa, con la que se alimenta el biodigestor o de su composición.

La sobrecarga hidráulica también puede ser una posible causa de la inestabilidad del proceso de biodigestión y de la producción de biogás. Si el tiempo de retención hidráulica no es suficiente para la multiplicación de las bacterias anaeróbicas, su concentración disminuirá ya que poco a poco se descarga el sustrato fuera del biodigestor.

Siempre hay que tener en cuenta que la producción de biogás es directamente proporcional a la concentración de las bacterias anaeróbicas. Las bacterias productoras de metano pueden tener tiempos de duplicación de hasta 30 días, y si se inhibe el proceso, el tiempo de duplicación de las bacterias puede ser aún mayor. La eliminación de sustrato por lavado de las bacterias finalmente conduce a la acumulación de los AGV de manera similar a la sobrecarga orgánica, debido

a que las bacterias acidificantes crecen más rápido que las bacterias metanogénicas. El lavado o la descarga de las bacterias finalmente ocasionara el colapso del proceso de biodigestión y el cese de la producción de biogás.

El monitoreo de las variables del proceso permite conocer lo que sucede biológicamente al interior de un biodigestor y a mantener un proceso estable. En general, la supervisión del proceso ayuda a tener una visión global e identificar alguna inestabilidad que pueda inhibir el proceso de biodigestión.

Únicamente mediante la supervisión continua de los parámetros de proceso se pueden observar tendencias de su comportamiento y tomar medidas a tiempo para evitar que el proceso se desestabilice. En muchos casos una inhibición del proceso o una inestabilidad temporal en el biodigestor puede tener consecuencias económicas negativas para el dueño de la instalación.

En la tabla adjunta se presentan los parámetros que se deben medir y su importancia. Los parámetros señalados con “tiene” deben ser medidos obligatoriamente.

Parámetros para el control de proceso

Parámetro	Tiene	Debe	Puede
Masa seca	x		
Masa húmeda	x		
Masa volátil	x		
Caudal de alimentación	x		
Control de nivel en digestor			x
Temperatura de sustrato	x		
Potencial redox	x		
Temperatura de sustrato	x		
pH	x		
Ácidos grasos volátiles	x		
Amonios NH ₄	x		
Relación FOS/TAC	x		
Amoniaco		x	
Inyección de aire - reducción H ₂ S	x		
Concentración de metano en el biogás	x		
Concentración de O ₂ en el biogás	x		
Concentración de H ₂ S en el biogás	x		
H ₂ S en el efluente del biodigestor			x
Nitrógeno en el efluente del biodigestor			x
DQO - DBO ₅ en el afluente biodigestor			x
DQO - DBO ₅ en el efluente biodigestor			x
Concentración de CO ₂ en el biogás	x		
Temperatura del biogás	x		
Producción de biogás	x		
Electricidad producida	x		
Horas de operación generadores		x	
Horas de operación antorcha	x		
Temperatura de agitadores			x
Consumo de electricidad del biodigestor	x		
Horas de recirculación de bombas		x	
Volumen de extracción de lodos	x		
Características de los lodos (N,P,K)			x
Volumen de producción de lodo seco		x	

Los costos de monitoreo básico son a menudo mucho más bajos que los costos y pérdidas de ingresos asociados con la paralización de un proceso y el consecuente vaciado de un biodigestor. Por ejemplo, si el proceso en un biodigestor se ha inhibido totalmente, éste tiene que ser vaciado y reiniciado con nueva biomasa. Esto puede ocasionar enormes costos operativos y egresos al dueño de la instalación.

Los valores medidos y registrados informan al operador sobre el estado del proceso de biodigestión y sirven también para la

preparación de la documentación legal para demostrar el cumplimiento de la normativa local ante las entidades de control. Idealmente, el operador debe participar durante la fase de puesta en marcha del biodigestor y tiene que ser capacitado por el diseñador o por el fabricante en la operación de su sistema y en la interpretación de los valores medidos. Debe conocer los límites y el rango de los parámetros de control y debe conocer cuando debe actuar y como tiene que proceder para corregir anomalías que puedan empezar a inhibir el proceso de biodigestión. Mediante el registro de los parámetros de proceso el operador puede anticiparse a que no se inhiba el proceso y actuar apenas empiecen a variar ciertos parámetros de control.


Si las lecturas de algunos parámetros son inusuales, el operador debe estar en la capacidad de verificar si los errores se deben a un equipo defectuoso, sucio o

mal instalado. En la practica la falla de un parámetro de control siempre va acompañada de la falla de otro o varios parámetros. Por ejemplo, una reducción de la concentración de metano o producción de biogás ira acompañada de un cambio en el potencial redox y en el pH.

Las bajas concentraciones de metano pueden ocurrir, por ejemplo, debido a serios problemas de acidificación. En este ejemplo, para la comprobación de la plausibilidad, se debe realizar una comparación de la concentración de metano con la concentración de CO₂. La disminución de la concentración de metano y al mismo tiempo el aumento de la concentración de CO₂ es un indicador de fallas en el proceso de biodigestión. Si la concentración de metano baja e igual baja la concentración de CO₂ es un indicador de fallas en el sensor y no en el proceso.

Hay que asegurarse que los sensores so coloquen de acuerdo a las indicaciones del fabricante, que se calibren con regularidad y que se realicen las tareas recomendadas de limpieza. Todos los procesos de limpieza y calibración tienen que ser documentados en una bitácora. La medición de pH, potencial redox y temperatura debe realizarse en forma continua.

Ejemplo de bitácora

									
BITACORA PARA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE BIO DIGESTORES									
Biodigestor:			Ubicación:			Mes/año:			
PARAMETROS OPERATIVOS									
Dia	Hora	AGITADOR		BOMBAS DE LODOS		CONTROL DE PROCESO			
		[horas/día]		[horas/día]		pH	Redox	Temperatura	Biogás
		Nr.1	Nr.2	Recirculación	Extracción		(mv)	°C	(m3/h)
1									
-									
-									
-									
31									
Operador responsable: _____									

Este formulario puede ser ampliado de acuerdo de los requerimientos del usuario incluyendo los parámetros que desee registrar.

Esta información debe ser evaluada diariamente para determinar patrones de comportamiento y verificar si están sucediendo variaciones significativas que pueden ocasionar o significar alguna inestabilidad del proceso de biodigestión.

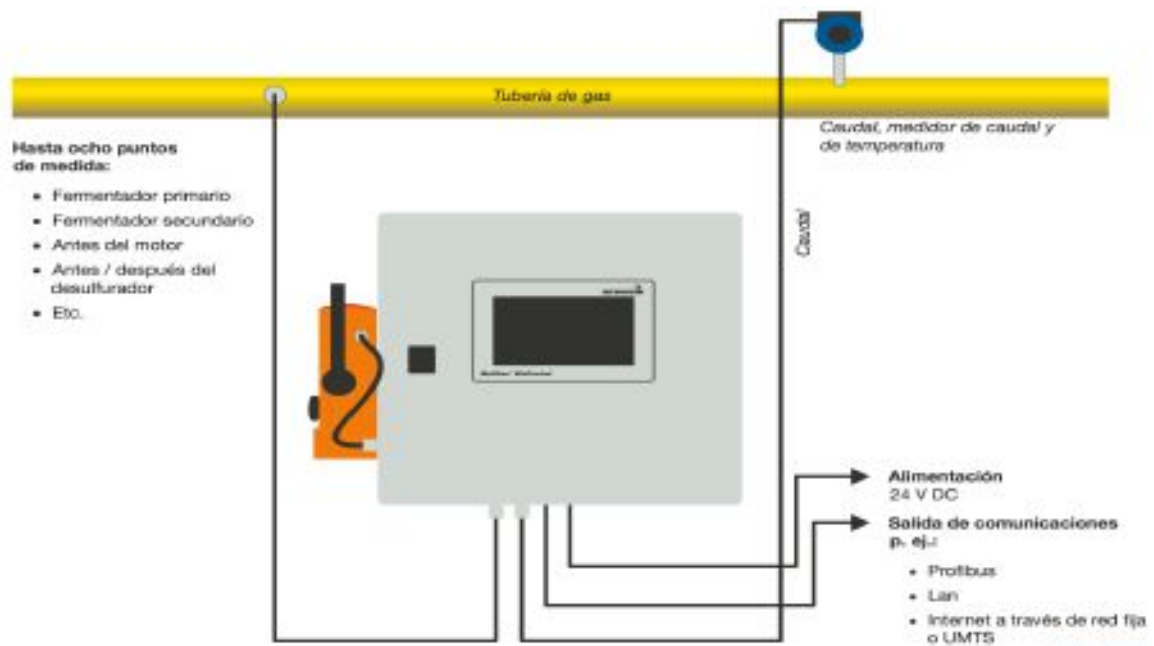
CAUDAL DE BIOGÁS

La medición del caudal de biogás es muy importante ya que a través de su magnitud se puede determinar la eficiencia de degradación de la biomasa. Lógicamente que con la medición del caudal se debe medir también todas las características del biogás como CH₄, O₂, CO₂, H₂S, etc. Las fluctuaciones en la temperatura exterior pueden causar fluctuaciones en la producción de biogás. A temperaturas exteriores muy altas, aumentara también la producción de biogás.

La medida de caudal de biogás se realiza en varios puntos, generalmente a la salida del digestor, antes de la antorcha y a la entrada de los generadores o caldera. El objetivo de estas mediciones es suministrar información acerca de la cantidad de biogás utilizado en los generadores, caldera o antorcha. El análisis de la composición del biogás antes de su aprovechamiento en equipos de cogeneración se utiliza para comprobar la eficiencia de los equipos de reducción de H₂S y la calidad del biogás. El conocimiento de la composición del biogás en biodigestor permite un mejor control del proceso de biodigestión y puede ser una herramienta valiosa para el control del proceso de biodigestión.

Para la medición del caudal de biogás hay que disponer de equipos confiables y de buena calidad ya que el biogás tiene especiales características que dificultan su medición, debido a su alto contenido de humedad, de CO₂, H₂S, etc.

Esquema medidor de caudal y características de biogás



El caudal de biogás se mide en la tubería que capta todos los puntos de extracción de biogás del biodigestor. Previo al punto de medición se debe construir un pozo para la reducción de condensados.

Los medidores de biogás deben instalarse en un tramo recto de la tubería. Siempre es necesario que se sigan las indicaciones del fabricante. La fuente de alimentación de los dispositivos se realiza a 24 V, 110 V o 230 V, las señales de salida varían entre 4 y 20 mA para la medición de flujo para que pueda conectarse a una pantalla y a un programa para el registro de los caudales. Los dispositivos se pueden instalar en tuberías verticales (flujo de abajo hacia arriba) o tuberías horizontales (0,1 - 3 % de pendiente). Se debe evitar la formación de bolsas de aire en las tuberías.

Medidor de biogás



Los equipos para la medición de las características del biogás pueden medir por lo general el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), opcionalmente hidrógeno (H_2). El método más comúnmente utilizado para la medición de la concentración del CH_4 y CO_2 es la tecnología de rayos infrarrojos. Rara vez se utilizan sensores de conductividad térmica. La concentración de O_2 , H_2S y H_2 son determinadas electroquímicamente. La precisión de estos dispositivos da mediciones aproximadas de metano, dióxido de carbono y oxígeno en 2% del valor máximo de la escala. Para las mediciones de H_2S la exactitud es de aproximadamente 10% del valor medido.

CONCENTRACIÓN DE METANO

El biogás producido en el biodigestor contiene mayormente metano del 50 al 75%, y también cantidades significativas de dióxido de carbono. También hay pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno y otros gases traza. Únicamente el metano (CH_4) puede usarse como combustible, que es químicamente idéntico al gas natural.

Sensor continuo para medición de CH₄



La concentración de metano (CH₄) es el parámetro de mayor importancia en un biodigestor industrial ya que de su concentración dependerá la producción de electricidad. Es el contenido de metano el que define cuanta energía se produce en el biodigestor.

Dependiendo del tipo de sustrato con que se alimente el biodigestor, la concentración de metano debe mantenerse de igual forma estable y estar alrededor del 65% en promedio. Si no hay variaciones en la producción de biogás, tampoco debe haber variaciones significantes en la concentración de metano. Si la concentración de metano baja a menos del 50 % significa que el proceso de biodigestión esta inhibido.

Medidor portátil de las características del biogás - CH₄ - CO₂ - H₂S - O₂



Si se considera que el biogás es una mezcla de metano (CH_4) (CO_2), dióxido de carbono y otras trazas de gases como el sulfuro de hidrogeno (H_2S) significa que a baja concentración de CH_4 hay incremento de los otros gases. Un incremento de la concentración de H_2S puede ser de igual manera muy perjudicial para el proceso de biodigestión y para el biodigestor.

La concentración de metano se mide en porcentaje del biogás. Su medición se la realiza por medio de sensores permanentes que se colocan en la tubería de conducción de biogás o se la realiza puntualmente por medio de un medidor portátil. El tipo de medición que se utilice dependerá del tamaño del biodigestor y del uso del metano. Si se trata de una instalación que donde se aprovecha el biogás para la producción de electricidad que se vende a la red publica de electricidad, es de suma importancia medir de forma continua la concentración de metano.

CALIBRACIÓN DEL BIOGÁS

Generalmente, los generadores operan en rangos de presión desde 10 hasta 100 mbar. Raras veces se encuentran generadores que operan con presiones más elevadas. La presión de servicio para un generador se alcanza por medio del soplador o estación elevadora de presión.

Según el tipo y fabricante de las calderas, estas trabajan con presiones de servicio en rangos de 50 – 500 mbar. Generalmente, las calderas de mayor potencia > 500 BHP operan con rangos de presión del biogás en el orden de 450 mbar.

A continuación, se describen las condiciones generales de uso del biogás:

- A una distancia de 1 m desde la válvula de regulación de presión del generador, la temperatura del gas no debe sobrepasar los 40°C.
- El rango de presión requerida por el generador es de aproximadamente 50 - 150 mbar. La fluctuación de la presión no debe sobrepasar los 10 mbar.
- El contenido de metano en el biogás no debe ser menor del 45%.
- El contenido de H_2S no debe ser mayor que 100 ppm y el contenido de NH_3 debe ser menor o igual a 20 mg/Nm³.
- La granulidad de las impurezas no debe sobrepasar 5 μm y el contenido agua en el biogás no debe sobrepasar 40 g/Nm³.

CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE BIOGÁS

Las tuberías de captación y conducción de biogás requieren precauciones especiales de seguridad, ya que los escapes de biogás pueden formar mezclas explosivas con el aire. En caso de mal funcionamiento de biodigestor debido a errores de alimentación o por formación de costras, puede suceder que el nivel de líquido en el biodigestor se eleve por encima del borde de las tuberías de captación de biogás y, por lo tanto, el digestato o las espumas ingresen a las tuberías de biogás. Si no se limpian ni se someten a una inspección periódica de corrosión y fugas, se aumenta el riesgo de fugas de biogás y de explosiones.

El biogás crudo no solamente contiene dióxido de carbono y metano, sino que también contiene vapor de agua, sulfuro de hidrógeno, hidrógeno y amoníaco, que como gases reactivos puede provocar daños en tuberías metálicas. Las aguas de condensados pueden corroer las tuberías, promover el crecimiento bacteriano y la corrosión inducida microbianamente, y pueden también dañara las tuberías de biogás o filtros de purificación, lo que puede provocar bloqueos y fallas de funcionamiento, como el aumento de la presión del biogás con la consecuente rotura de tuberías o de la membrana que cubre el biodigestor.

El biogás tiene que ser comprimido para su conducción de través de la tubería de conducción hasta que llegue al punto de aprovechamiento como combustible. El sistema de compresión debe diseñarse con equipos y componentes de control para que cumpla con las normas de seguridad. Es importante que todos los componentes del sistema de compresión cumplan con la norma Atex¹.

TEMPERATURA

Los biodigestores pueden operarse en tres rangos de temperatura. Un rango psicrófilico (por debajo de 25°C), mesófilico (entre 25 y 45°C) y otro termófilico (45 - 60°C). Casi todos los biodigestores funcionan en forma óptima dentro de los límites de temperaturas mesófilicas entre 35 -37°C. Dependiendo de la temperatura del medio ambiente, puede variar también la temperatura del sustrato.

Para al control de la temperatura, se deben instalar sensores al interior del biodigestor. Los sensores, deben ubicarse estratégicamente, de tal forma, que

¹ https://es.wikipedia.org/wiki/Directiva_ATEX

se obtengan mediciones representativas del sustrato. Las especificaciones de los sensores, deben ser para aguas agresivas. Los sensores, siempre deben estar sumergidos en el sustrato. No se deben instalar sensores domésticos o portátiles, que no sean fabricados para trabajar en medios agresivos.

De acuerdo con la experiencia del autor de este libro en la operación de varios biodigestores, importante es que se mantenga siempre un rango de temperatura que varíe en $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y que estas temperaturas se mantengan a largo plazo. En países de clima tropical la temperatura se mantiene siempre sobre los 30°C lo que es suficiente para lograr una buena producción de biogás y una eficiente degradación de la materia orgánica.

ACIDEZ (pH)

El pH es uno de los parámetros de control más importantes en la operación de los biodigestores debido a que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad sus las variaciones.

Los valores de pH se deben mantener entre 6,5 y 7,5 para obtener un buen rendimiento de degradación de la biomasa y una elevada concentración de metano. La digestión anaeróbica comienza a inhibirse a un pH menor que 6,5 y mayor que 7,6. La mejor y más simple manera de corregir un pH es dejar de alimentar el biodigestor con biomasa y alimentarlo con bastante agua.

La formación excesiva de ácidos grasos volátiles (AGV) y entre ellos el acetato, tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y reducen el pH en el biodigestor. Sin embargo, el equilibrio CO_2 - bicarbonato opone resistencia al cambio de pH.

Generalmente, la concentración de ácidos grasos volátiles no debe superar los 2 a 3 g/l, expresados como ácido acético. Si sobrepasa estos valores, la biodigestión se inhibirá en dos o tres días debido a que las bacterias metanogénicas no pueden aprovechar los ácidos a la misma velocidad con que se producen.

Para lograr un adecuado funcionamiento de los sistemas anaeróbicos es indispensable generar las condiciones ambientales favorables para el desarrollo y crecimiento de las bacterias metano genéticas y de esta manera lograr las eficiencias de producción de biogás estimadas para cada proyecto.

Se pueden aplicar varios productos químicos para el control del pH. Dentro de estos productos se encuentra la cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cal virgen (CaO), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), hidróxido de sodio (NaOH), y bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3). Estos productos químicos pueden ser diferenciados en dos grupos.

- Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente como (NaOH , NaHCO_3 , NH_4HCO_3).
- Los que reaccionan con biogás carbónico para formar alcalinidad bicarbonática (CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NH_3).

La cal, es aplicada usualmente para subir el pH, por ser más barata y común, pero por ser un compuesto o producto bastante insoluble puede ocasionar serios problemas operacionales al biodigestor. El CO_2 presente en el biodigestor reacciona con la cal para formar bicarbonato de calcio pudiendo provocar un vacío (vacuo) en el biodigestor.

Si la disponibilidad de dióxido de carbono no es suficiente para reaccionar con la cal, el pH final puede ser aún más elevado, lo que puede ser más perjudicial que un pH bajo. Adicionalmente, se pueden formar en el fondo del biodigestor precipitados e incrustaciones que pueden presentar serios problemas operativos.

El bicarbonato de sodio, es fácil de manipular y es bastante más soluble que la cal, no reacciona con el CO_2 pero su costo operativo es más elevado. Para bajar el pH también se puede utilizar ácido clorhídrico o sulfato ácido de sodio (bisulfato sódico).

El pH, es también una importante variable de diagnóstico de los sistemas anaerobios, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo.

Ejemplos clásicos son las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor en la etapa metanogénica, que pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, produciendo la acumulación de éstos y el consiguiente descenso del pH, ocasionando la acidificación del biodigestor. En función de la alcalinidad del medio, el descenso del pH será más o menos rápida.

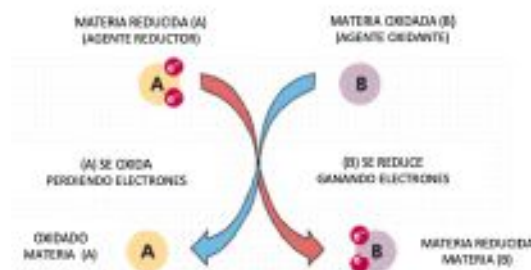
ALCALINIDAD

La alcalinidad, es una medida de la capacidad tampón del medio. Esta capacidad tampón puede ser proporcionada por un amplio rango de sustancias, siendo por tanto una medida inespecífica. En el rango de pH de 6 a 8, el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono - bicarbonato. La relación de alcalinidad, se define como la relación entre la alcalinidad ocasionada por los AGV y la debida al bicarbonato, recomendándose no sobrepasar un valor de 0,3 - 0,4 para evitar la acidificación del biodigestor. La alcalinidad al bicarbonato debe mantenerse por encima de 2.500 mg/l para asegurar la estabilidad del biodigestor (ver parámetro siguiente).

POTENCIAL Redox

El potencial redox es valor electro químico que se mide en mili voltios. Un sustrato con un redox negativo fuerte (= alto redox) como por ejemplo -400 mV es rico en electrones² y pobre en oxígeno. Un redox potencial negativo es un indicador de un proceso anaeróbico pobre en oxígeno. Las sustancias reductoras son capaces de volver más negativo el potencial redox, elevando su valor, y reduciendo el oxígeno y aumentando el número de electrones.

Potencial Redox



El potencial redox, es un indicador de la oxidación o potencial de reducción de materia. El proceso de digestión anaeróbica, ocurre únicamente en medios acuosos con un potencial redox que se ubica en un rango de -330 mV a -550 mV. La aplicación de agentes oxidantes, por ejemplo, sulfatos, nitritos, oxígeno, nitratos; pueden ocasionar un cambio muy rápido del potencial redox y una reducción del pH. Esta variación del potencial redox y del pH se debe medir continua o diariamente. Teniendo estas mediciones continuas el operador puede reaccionar rápidamente cuando se tengan valores menos fuertes del potencial

² <https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n>

redox (cuando son menores a -330 mV). El potencial redox, puede variar también, cuando hay cambios drásticos y muy rápidos en el tipo de sustrato con que se alimenta el biodigestor.

ACIDOS GRASOS VOLÁTILES

Los ácidos grasos volátiles son los más importantes intermediarios del proceso anaerobio, siendo, por ello, fundamental conocer su evolución. **Juegan un papel muy importante en la monitorización y control de los biodigestores**, mostrando una rápida respuesta a las variaciones en el sistema, por ejemplo en el caso de sobrecargas orgánicas o en el caso de la introducción de tóxicos. **El aumento de su concentración está relacionado con la disminución de la producción de biogás.**

Para concentraciones de ácidos grasos volátiles por debajo de 50 mg, equivalente a 3.000 mg acético/l, no producen ninguna disminución de la producción de metano. Son los ácidos propiónico y valérico los primeros que afectan al proceso, mientras que el butírico y el acético han de acumularse por encima de 100 mg para afectar a la tasa de producción de metano.

Altas concentraciones de ácidos grasos de cadena larga pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia. Las grasas neutras (triglicéridos) son hidrolizadas rápidamente a ácidos grasos de cadena larga (AGCL). Las concentraciones límite de inhibición no están muy claras en la bibliografía y depende mucho del tipo de ácido graso, así como de la forma en que se encuentra.

Los ácidos grasos volátiles (AGV) y entre ellos el acetato, tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y reducen el pH en el biodigestor. Sin embargo, el equilibrio CO₂-bicarbonato opone resistencia al cambio de pH. Comúnmente la concentración de ácidos grasos volátiles no supera los 2 a 3 g/l, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la digestión cesará en dos o tres días debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen.

El control online de la producción de AGV es imprescindible en biodigestores que se alimentan con sustratos que tienden a acidificarse. Ejemplo, vinazas, POME, residuos de mataderos, pasto, maíz, etc.

SULFURO DE HIDROGENO (H₂S)

Es necesario conocer la concentración del H₂S en el biogás que se produce en el biodigestor. Hay que conocer su concentración antes de su uso como combustible en calderas o en generadores a biogás. El contenido de H₂S puede estar en el rango de 500-1.000 mg/l, dependiendo del tipo de sustrato que se digieste y de las condiciones de operación. Valores mas elevados son un indicio de que el proceso de biodigestión esta inhibido.

El sulfuro de hidrógeno se produce por la degradación anaeróbica de compuestos azufrados. Al igual que con el amoníaco, la forma no disociada de sulfuro de hidrógeno libre H₂S es inhibidor del proceso de biodigestión. Además, el sulfuro de hidrógeno precipita muchos iones metálicos que pueden tener un efecto negativo sobre la biodisponibilidad de oligoelementos incluyendo el hierro. La concentración de H₂S se mide en partes por millón. Por ejemplo 10.000 ppm (1% de H₂S ppm) en el biogás corresponde a 26 mg H₂S/l.

La inhibición de sulfuro de hidrógeno comienza a una concentración de 100 mg H₂S y puede llegar a inhibir el proceso de biodigestión a valores ≥ 1000 ppm.

El H₂S es toxico y causa corrosión en tanques y equipos electro mecánicos. El sulfuro de hidrógeno es el más venenoso de los gases naturales, es seis veces más letal que el monóxido de carbono y la mitad tan letal como el cianuro de hidrógeno. Se lo reconoce de inmediato por su olor fétido a huevos podridos. El H₂S en condiciones normales de presión y temperatura se encuentra en estado gaseoso, tiene una presión de vapor de 2.026 kPa y una solubilidad en agua de 0,4 % a 25,5 °C. Es un gas incoloro, inflamable a concentraciones mayores de 4,3 % por unidad de volumen, es más denso que el aire y tiene un umbral de detección olfativo en 0,13 ppm (0,18 mg/m³).

NITRÓGENO AMONIACAL

Los residuos ganaderos contienen altas concentraciones de compuestos nitrogenados, en función del sistema de alimentación, de la composición de los piensos, del tipo de animales de los que procede, así como del tipo de granja. El nitrógeno orgánico durante el proceso anaerobio se hidroliza produciendo formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un importante nutriente para el crecimiento de los microorganismos, cuya carencia puede provocar el fracaso

en la producción de gas, una concentración excesivamente alta del mismo puede limitar su crecimiento.

Hay una gran dispersión en la bibliografía sobre la concentración de amonio inhibidora del proceso anaerobio. Así, a 50°C una concentración de 1,7 g N-NH₄⁺/L resultó inhibitoria para la digestión anaerobia de estiércol bovino. Se encontró en reactores sin aclimatar, signos de inhibición a una concentración de nitrógeno amoniacal de 2,5 g N-NH₄⁺/l, tanto en régimen mesofílico como termofílico, aunque al trabajar con reactores adaptados previamente la concentración inicial de inhibición fue de 4 g N-NH₄⁺/l en el rango termofílico.

La inhibición por amonios (NH₄-N) se produce por la degradación de proteínas durante la digestión anaeróbica de la biomasa. En un entorno acuoso tal como se presenta en un digestor, el NH₄-N está presente como iones amonio (NH₄⁺) y como amoníaco libre (NH₃). Con el aumento del pH o la temperatura, aumenta el porcentaje de NH₄-N presente como amoníaco libre (NH₃). El amoníaco libre (NH₃) es considerado como la principal causa de inestabilidad en el proceso de biodigestión.

Es necesario que los contenidos de nitrógeno amoniacal no sobrepasen los 3.000 mg/l para evitar una inhibición en el proceso de digestión.

FOS/TAC

Adicional a los parámetros indicados anteriormente existen procedimientos que ayudan a determinar si el proceso de biodigestión se está desarrollando de forma eficiente.

El análisis del FOS/TAC fue desarrollado por el Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) a partir de una prueba de valoración (Método Nordmann), con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/l. TAC significa Totales Anorganisches Carbonat, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina) y, se mide en mg CaCO₃/l. La relación FOS/TAC es reconocida desde hace tiempo como valor guía para evaluar los procesos de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente.

Las mediciones periódicas de ácidos orgánicos volátiles (FOS) y carbono inorgánico total (TAC) (es decir, capacidad de tampón de carbono) han dado a los laboratorios la capacidad de controlar la estabilidad del digestor. La estabilidad del proceso de digestión puede analizarse mediante TAC o FOS; sin embargo, se puede analizar mejor por la relación de los 2 parámetros.

Medidor FOS/TAC



El propósito de usar un método de relación es evitar resultados sesgados que pueden aparecer cuando solo se usa un método. El método de relación FOS / TAC también se usa comúnmente debido a la naturaleza costosa y lenta de otras mediciones de la calidad de las plantas de biogás.

A continuación, se presentan algunas reglas para la interpretación del FOS/TAC. Valores tomados de DEULA-Nienburg/Alemania

Interpretación de la relación FOS/TAC

Relación FOS/TAC	Interpretación	Acción
>0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la alimentación del biodigestor
0,5 – 0,6	Excesiva entrada de biomasa	Reducir la alimentación de la biomasa
0,4 – 0,5	El biodigestor está demasiado alimentado	Vigilar los parámetros de proceso con mas frecuencia
0,3 – 0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener sin variación la cantidad de biomasa con la que se alimenta el biodigestor
0,2 – 0,3	Biodigestor mal alimentado	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0,2	Biodigestor muy mal alimentado	Biodigestor mal alimentado, debe aumentarse la cantidad de biomasa con la que se alimenta el biodigestor

En la práctica, una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 es normal, aunque cada biodigestor tiene su propio valor óptimo, el cual sólo puede determinarse mediante una observación a largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato. Por ejemplo, los biodigestores que requieren biomasa renovable como maíz, pasto, etc. requieren una relación FOS/TAC de 0,4 a 0,6 para que su funcionamiento sea más estable.

El punto en el que la planta opera más eficientemente, es decir, en el que la producción de gas es máxima y no existe peligro de que el proceso se colapse, solamente puede determinarse probando diversos escenarios. Un error de alimentación puede ser muy costoso; varias semanas sin producción de biogás y la enorme cantidad de trabajo (trasiegos por bombeo, vaciado del digestor, etc.) necesario para que el biodigestor vuelva a estar operativa pueden poner en peligro la rentabilidad de todo un año.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO₅)

La DBO₅ es la cantidad de oxígeno requerida, para estabilizar la materia orgánica contenida en aguas contaminadas o aguas industriales residuales, que pueden descomponerse biológicamente. Determina la cantidad de oxígeno absorbido por un residuo en descomposición.

La demanda biológica de oxígeno (DBO_5),³ es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación. Normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO_5), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO_2/l).

El método de ensayo se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos. Es un método que constituye un medio válido para el estudio de los fenómenos naturales de degradación de la materia orgánica, representando la cantidad de oxígeno consumido por los gérmenes aerobios para asegurar la descomposición dentro de condiciones bien especificadas de las materias orgánicas contenidas en el agua a analizar.

El método pretende medir, en principio, exclusivamente la concentración de contaminantes orgánicos. Sin embargo, la oxidación de la materia orgánica no es la única causa del fenómeno, sino que también intervienen la oxidación de nitritos y de las sales amoniacales, susceptibles de ser también oxidadas por las bacterias en disolución. Para evitar este hecho se añade N-aliltiurea como inhibidor. Además, influyen las necesidades de oxígeno originadas por los fenómenos de asimilación y de formación de nuevas células.

DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)

La DQO expresa la cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar las sustancias presentes en las aguas residuales, mediante un agente químico fuertemente oxidante, como el permanganato potásico ($KMnO_4$), utilizado en aguas limpias y el dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$), utilizado en aguas residuales, ya que el uso de permanganato potásico en aguas residuales produce unos errores por defecto muy importantes. Por lo tanto, la DQO, medirá tanto la materia orgánica biodegradable por los microorganismos, como la materia orgánica no biodegradable y la materia inorgánica, oxidable por ese agente químico.

Esta medida de la DQO, es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua y es función de las características de los componentes presentes, de

³ Tomado de Wikipedia

sus proporciones respectivas, de las posibilidades de oxidación y de la temperatura y otros.

Se mide a temperatura ambiente y corresponde a una degradación de la materia orgánica entre el 70 y el 80% de la materia orgánica total en aguas residuales. Esta medida puede tardar unas 3 horas en realizarse.

La determinación de la DQO, junto con la DBO₅, permite establecer su relación y según el resultado, conocer la posibilidad o no de efectuar un tratamiento de las aguas residuales o físico-químico. Esta correlación también nos da una idea de si los vertidos que se están produciendo tiene origen industrial.

PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN

La degradación total de la biomasa orgánica hasta su mineralización sería solo posible si la biomasa no tuviera lignina. En la práctica se necesitaría tiempos de retención (TRH) muy grandes para lograr una degradación total de la biomasa. Este parámetro indica el porcentaje de la masa orgánica que se degrada durante el tiempo de retención y se transforma en biogás. La degradación de la biomasa en un biodigestor no es constante, empieza en forma acelerada y después es bastante lenta.

La producción de los últimos porcentajes de biogás (si se trata de lograr una total degradación de la biomasa) se podrían lograr teóricamente con grandes volúmenes de biodigestor. Grandes volúmenes de biodigestor ocasionan elevadas inversiones para un proyecto que podrían poner en duda su rentabilidad. Siempre es necesario seleccionar un volumen de biodigestor que reporte la mayor producción de biogás con los costos más bajos de construcción.

El porcentaje de degradación que se alcanza en un biodigestor depende también del tipo de biomasa, en el caso de los estiércoles del tipo de animal y de su alimentación. Si se co digestionan varios tipos de biomasa, el porcentaje de degradación dependerá de las características fisicoquímicas de los componentes de la mezcla en el biodigestor.

En la práctica, se logra un porcentaje de degradación del 65 al 75%. En término medio se puede lograr un porcentaje de degradación de aproximadamente el 65%. Si se trata de biodigestores que se alimentan con cultivos energéticos como el maíz, pasto, trigo, etc., se puede lograr un porcentaje de degradación en promedio del 80%.

