

CAPITULO II

MARCO TEORICO

1. Antecedentes de la Investigación

Antes de realizar cualquier investigación, se debe consultar que propuestas anteriores existen en la actualidad, las cuales podrán servir de base al trabajo. A continuación se expone cada una de ellas.

Pedraza, Chará, Conde, Giraldo y Giraldo (2002) con su investigación evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, desarrollaron un ensayo en la Finca El Vergel, ubicada en la vereda Bellavista municipio de El Dovio, en zona de ladera de la cordillera Occidental del Valle de Cauca (Colombia), y temperatura ambiental promedio de 18°C.

Su experimento comprendió dos biodigestores de plástico polietileno de invernadero y dos biodigestores en geomembrana de PVC. Cada biodigestor poseía una longitud de 2.6 m y 520 litros de volumen líquido. Se cargaron diariamente con 34.7 litros de una mezcla (26 litros de agua, 4.7 kg de estiércol y 4 litros de orina) durante las fases de arranque (3 meses) y de estabilización (3 meses).

La producción de biogás en los dos tipos de biodigestores presentó un comportamiento muy similar en la fase de arranque (66.4 litros/día en los biodigestores de geomembrana y 65.5 litros/día para los biodigestores plásticos), aumentándose en la fase de estabilización hasta 98 litros/día . Las temperaturas internas fueron muy similares en los dos tipos de biodigestor, con un promedio de 23°C.

En general el pH y la temperatura fueron ligeramente más altos en el biodigestor plástico de invernadero que en el de geomembrana. El pH a pesar de sus variaciones se mantuvo entre 6.8 y 6.9. La variación en la temperatura ambiental no tuvo efecto directo sobre la producción de biogás para ninguno de los tratamientos ($r=0.097$ para el de geomembrana y de $r=0.075$ para el de plástico). Ambos tipos de biodigestores resultaron eficientes para la remoción de la materia orgánica con valores de 91 y 92% para DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) y 88 y 89% para DQO (Demanda química de oxígeno), respectivamente.

Como principales conclusiones obtuvieron: los biodigestores tubulares de flujo continuo son una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, pues se logran altas remociones de materia orgánica y buena producción de biogás a muy bajo costo. Se estableció además que para temperaturas ambientales de 18 a 21 grados centígrados como las de este ensayo, es adecuado trabajar 15 días de tiempo de

retención y una carga volumétrica diaria de $0.066 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de biodigestor. Con estos parámetros se puede esperar una remoción de DBO mayor del 90% y de DQO mayor del 85%, y una producción de gas de 184 litros diarios por m^3 de biodigestor.

El tipo de material no afectó significativamente el comportamiento de la mayoría de los parámetros evaluados en este ensayo. La única diferencia notable entre los dos materiales es el costo, pues un biodigestor de 3m de longitud y 1m de diámetro cuesta en Colombia US\$ 33 en plástico y US\$ 100 en membrana de PVC. Sin embargo, aunque la comparación de la duración de los materiales no hizo parte de esta investigación, por experiencias anteriores con biodigestores de plástico y la duración de la lámina de PVC en otras aplicaciones se puede deducir que el PVC aunque es de mayor costo, también puede presentar una mayor durabilidad.

Las concentraciones de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal logradas en los efluentes de los biodigestores requieren de un posterior tratamiento, puesto que bajo estas condiciones pueden alterar de manera nociva el medio ambiente. Esta investigación provee datos de relevancia para llevar a cabo la propuesta por el autor, como temperaturas y tiempos de retención necesarios para obtener un aprovechamiento más eficiente del agua residual y así una mayor producción de gas. Entre las diferencias más destacadas entre la investigación y este antecedente se encuentran: las tecnologías empleadas para el análisis y el tipo de investigación.

Galvis (2004), publicó un artículo titulado “Selección de una tecnología en el tratamiento de agua para consumo humano”, donde se presenta el desarrollo del modelo de selección de tecnología y análisis de costos en sistemas de potabilización de agua (SelTec). Dicho modelo permite la selección de alternativas tecnológicas sostenibles para la potabilización de agua en una localidad donde no existe sistema de tratamiento, evaluar la sostenibilidad de la tecnología en una planta de tratamiento existente y estimar costos de inversión inicial, reposición, administración, operación y mantenimiento para las opciones tecnológicas más usadas en Colombia.

Dentro del trabajo se incluyó un modelo conceptual y un programa de computador. Aunque el primero tiene un amplio rango de aplicación, el programa se delimitó a poblaciones con menos de 30000 habitantes, que eran aquellas en situación más críticas con respecto a la suministro de agua potable en Colombia. Adicionalmente dentro del artículo, se hace un recuento de las diferentes metodologías de selección de alternativas tecnológicas.

Una de las conclusiones más destaca dentro del artículo dice que la sostenibilidad de una solución tecnológica en sistemas de potabilización de agua depende no solo de la capacidad de la tecnología para tratar el agua cruda y remover de manera eficiente sus contaminantes para llegar a cumplir con la normativa vigente en agua potable en la zona de ubicación del proyecto. También depende de aspectos como el grado de conocimiento local de la tecnología y de las características socioeconómicas y de la localidad.

Esto implica que ninguna tecnología puede ser considerada como sostenible sin haberse definido previamente el contexto en el cual va a ser aplicada. Esto invalida conceptos tradicionalmente utilizados como “tecnologías apropiadas” y “tecnologías de bajo costo”. Otra conclusión de interés dentro del estudio indica que la jerarquización de tecnologías, en relación con la variable costo, debe involucrar tanto los costos de inversión inicial como los de inversión futura, y reposición, conjuntamente con los costos de administración, operación y mantenimiento.

El aporte de este artículo a la investigación se obtiene de la metodología en el cual fue desarrollado de donde se extrajeron lineamientos y factores a considerar durante la selección de la alternativa tecnológica y el análisis económico. La diferencia más relevante entre las dos investigaciones es que el artículo trata de una selección de tratamiento para la potabilización de agua, mientras que aunque se trabaja con tecnologías de tratamientos de aguas servidas el objetivo principal de esta es la obtención de una alternativa de producción de gas.

Flotats (2005), desarrolló un trabajo titulado Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria; cuyo objetivo principal fue mejorar la producción de metano en plantas anaeróbicas esto con el fin de aumentar la rentabilidad de dichas plantas. La incorporación de sustratos orgánicos provenientes de plantas alimenticias es la mejor combinación para librarnos de problemas como inhibición y sobrecarga orgánica, la investigación se

construyo un algoritmo de simulación dinámica para el PH, basado en la ecuación de balance de cargas. Se trato el pH como una variable de estado del sistema y no como un parámetro a calcular en cada paso de integración.

El algoritmo de cálculo de pH se validó para sistemas acuosos sencillos, habiendo obtenido buenos ajustes a datos experimentales. Se introdujo en un modelo dinámico, previo, de digestión anaerobia de substratos complejos. Se incorporó, además, la simulación dinámica de las variables de la fase gaseosa.

Este modelo general de digestión anaerobia, que utiliza parámetros obtenidos de la bibliografía, ha resultado una herramienta útil para prever la respuesta del sistema ante la introducción de cosubstratos, los estados de sobrecarga o la introducción de componentes inhibidores. Los aspectos semejantes con esta investigación son el estudio de la producción de gas a partir de aguas residuales, siendo originado el gas por un proceso de metanización, y los cálculos presentes en la misma para la producción de gas por parte del digestor.

Los aportes más resaltantes que deja esta investigación son los referentes al proceso de metanización y el procedimiento para calcular el volumen de gas producido de una manera teórica. La diferencia más radical es que en esta investigación solo se estudia las variantes que se producen en el volumen de gas obtenido pero se deja de estimar la diferencia que radica en la tecnología a utilizar. Ahora bien, Hernández (2006) realizó una investigación titulada: "Optimación del compostaje de residuos sólidos

urbanos en proceso de serie anaerobio-aerobio” cuyo objetivo fue proponer la combinación secuencial de los procesos anaerobios y aerobios, con vista a mejora la calidad de los compostajes realizados a partir de los lodos.

Han sido utilizadas como metodología, la digestión anaerobia de etapa única, de doble fase (1ª fase seguida de 2ª), en rango mesofílico y digestión aerobia. En la digestión de etapa única se ha arrancado con un fango de depuradora de aguas residuales en su fase metánica. El digestor, de un volumen total de 30 L, ha sido rellenado con 22 L de fango; dejándolo en período de inercia durante cuatro días para permitir la aclimatación de los microorganismos.

Se ha alimentado cada día con la fracción orgánica de residuos de comedor previamente seleccionados. Se midió la temperatura, el pH, la alcalinidad total y la acidez volátil para controlar el funcionamiento del digestor en rango metánico. Además, se han medido los sólidos totales, volátiles y fijos, para controlar el régimen de alimentación, y la materia orgánica e inorgánica como control operativo para la calidad del lodo resultante.

El aspecto similar de este trabajo con la investigación, es el estudio del proceso de metalogénesis en un biodigestor mono etapa, en el rango mesofílico. La materia prima para la producción de gas es la misma, lodos provenientes de aguas residuales del sector industrial. Como diferencia entre investigaciones tenemos que en la anterior se realizaron mezclas de los lodos industriales con lodos de aguas domesticas.

Además que el objetivo final de la investigación fue mas basado en la producción de un compost de calidad y no en la producción de gas. El aporte al estudio actual es la apreciación de cómo en procesos donde entra a trabajar un segundo biodigestor existe una perdida de gas alta, la cual no es utilizada para ningún propósito en específico.

En el mismo orden de ideas se hace referencia a la investigación realizada por Alonso y González (2007) titulada “Tratamientos combinados físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera”, su objetivo fue el estudio de diferentes tratamientos para la reducción del carácter contaminante y para la depuración de aguas residuales de la industria del corcho.

Se estudiaron los procesos físicos químicos, de oxidación química y absorción de carbón activado. A través de pruebas de laboratorio se estimo las condiciones de tratamiento óptimas de cada uno de los procesos estudiados, así como la ventaja de usar varios de otros procesos en forma consecutiva.

En la fase previa antes de utilizar algún tratamiento, se caracterizo la composición de las aguas residuales en distintos grados de contaminación, determinando los parámetros de medición físico químicos fundamentalmente PH, alcalinidad, conductividad, sólidos totales, cloruros, aromaticidad, polifenoles totales, DQO y DBO. El aspecto similar de esta investigación con la actual, es el estudio de las alternativas para el aprovechamiento y tratamiento de aguas residuales.

Esta investigación se diferencia de la actual por el fin último de las mismas. En el estudio actual se proponen alternativas para producir gas como beneficio adicional a la planta y como valor asociado a la producción la descontaminación de efluentes, mientras que la citada investigación solo se centra en como eliminar los agentes contaminantes y sea este el valor agregado completo para la planta.

Otra investigación importante es la de Montes (2008) titulada “Estudio técnico económico de la digestión anaeróbica conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás” donde se realizan dos estudios técnicos, el primero de ellos compara el rendimiento en función de ST, STV y DQO, y la producción y riqueza de biogás de tres digestores en mono etapa usando 3 sustratos diferentes (fango, foRSU y codigestión de fango-foRSU), así como un breve análisis económico a partir de valores obtenidos respecto a la producción y riqueza del biogás.

El segundo estudio, compara las tecnologías de digestión en fases y mono etapa, utilizando como sustrato una mezcla de fango-foRSU en codigestión, en función también de ST, STV y DQO y la riqueza del biogás obtenido. Los digestores en mono etapa en rango mesofílico, alimentados con 3 sustratos diferentes (fango, foRSU y codigestión de fango-foRSU), tenían un volumen útil de 100 litros, trabajando a flujo pistón con la ayuda de una bomba tornillo. En los tres digestores aseguraron la estabilización de los lodos.

La producción específica de biogás fue mayor en el digester mono etapa en codigestión. Con respecto a la riqueza del biogás, también el digester mono etapa fango-foRSU en codigestión consiguió un mayor porcentaje, 73.09% CH₄. Los digestores en fases y mono etapa en rango mesofílico, alimentados con una mezcla de fango-foRSU en codigestión tenían un volumen útil de 130 (30 l para la fase ácida y 100 l para la fase metánica) y 100 litros para el digester en mono etapa. El digester ácido trabajó a una temperatura ambiente en mezcla completa con la ayuda de un agitador de hélices.

En el digester en fases se obtiene un porcentaje de eliminación de STV superior en 18% que en el digester en mono etapa. Siendo el porcentaje de eliminación de DQO similar en ambos sistemas. En lo que respecta, a la riqueza de biogás se obtuvo un mayor porcentaje de CH₄ (70.18%) en el digester en fases. Esta investigación servirá como ayuda al momento de especificar los requerimientos y procesos necesarios para la producción de biogás a partir de aguas residuales.

Las variables de estudio que se trajeron a colación es esta investigación en su gran mayoría se analizaran en la presente investigación. El estudio difiere con la anterior en como se estudiaran dichas variables, en el presente se estudiaran de forma documental mientras que en la otra se estudio de forma experimental. Así mismo Corrales (2008) plantea en su tesis titulada "Diseño de un biodigester para una planta de hortalizas" los parámetros necesarios para la producción de biogás de una forma estable. Su principal

aplicación está en la estabilización de lodos concentrado, producto del tratamiento de aguas residuales en el digestor suficiente gas para cubrir algunas necesidades energéticas de la planta.

Se llevo a cabo con tiempo de residencia y temperaturas, de entre 60 días a 20 C y 15 días entre 35 y 55 C, con una disminución mínima del 38% de los sólidos volátiles. Esta investigación traerá como contribución el conocimiento del pH necesario para la producción de biogás de una forma uniforme, además de los parámetros físico químicos que se deben tomar para la estabilización de los lodos, información vital para la investigación actual la cual pretende establecer la mejor tecnología para la producción de gas a partir de aguas residuales del sector industrial.

El aspecto que diferencia a la investigación actual de esta es el enfoque del uso del biodigestor debido a que en la actual se utilizara para los lodos del sector industrial y urbano como tal, en la investigación anteriormente citada el biodigestor se centraría más en las aguas de la industria de hortalizas. Esta investigación además sirve de aporte, ya que es explícita en la relación del PH de los lodos y la producción de gas por parte del biodigestor.

2. Bases teóricas

Para la ejecución de la investigación se definen teorías o modelos considerados como referencia para basarse al momento de fundamentar la problemática de la misma, y dar respuestas coherentes al presente trabajo. A

continuación se presentan una recopilación de teorías que sustentan la variable objeto de estudio, especialmente al proceso de producción de gas a partir de aguas residuales y todo lo necesario para fundamentar los indicadores de cada uno de los objetivos necesarios para poder determinar una alternativa tecnológica para la producción de gas.

2.1 Alternativa tecnológica

Para Méndez (2009) las alternativas tecnológicas son todas aquellas que constituyen posibilidades distintas a las propias del modelo establecido. Clasificándolas en las siguientes modalidades:

Tecnologías regionales, que procuran la descentralización y autosuficiencia dentro del marco geográfico propio de las unidades sociales de base.

Tecnologías ecológicas con bajo impacto sobre el medio ambiente.

Tecnologías conservadoras de recursos.

Tecnologías de pequeña escala.

Tecnologías de trabajo intensivo, que minimizan la inversión y potencian el uso de la mano de obra no especializada.

Tecnologías simples, que requieren mínima especialización y procedimientos operativos sencillos; y tecnologías liberadoras.

Estas alternativas tecnológicas, en la medida que combinan y sintetizan del modo apropiado para cada caso sus soluciones operativas, son la base técnica de las tecnologías alternativas, pero lo que define a estas últimas es

que su funcionalidad plena sólo es posible en condiciones económicas, políticas y sociales radicalmente distintas a las que caracterizan al modelo existente.

La antecedente precisión conceptual nos conduce a problemas decisivos: lo utópico de las tecnologías alternativas y la integración al paradigma vigente de las innovaciones que se crean en el marco de las alternativas arriba enumeradas. Para Rincón (2003) se denomina alternativa tecnológica a los cambios en recursos, insumos, en el manejo de la forma tradicional de operar. Los cuales se deben detallar con base en la caracterización y ser definidos mediante pruebas experimentales sustentadoras en un ambiente con parámetros controlados caracterizando los diferentes escenarios donde se puede desarrollar la variable de estudio.

Otra conceptualización es la realizada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002) el cual formula que una alternativa tecnológica es una solución de ingeniería que puede aplicarse en función de las condiciones físicas, económicas y sociales de una comunidad.

Los autores coinciden al definir la alternativa tecnológica como una solución a una problemática que los medios existentes no pueden solventar, además conviene precisar que esta alternativa también se caracteriza por la afección del problema a un sector y a un contexto particular, debido a que si dos poblaciones tienen el mismo problema en algunos casos las soluciones son diferentes ya que los contextos geográficos, políticos y económicos difieren.

Lo que convierte a una alternativa tecnológica en una llave que solo abre las puertas a la solución de un problema particular en unas condiciones dadas. Para comprender de forma mas completa la conceptualización de alternativa tecnológica es necesario desarrollar otros conceptos básicos como tecnología, clasificación tecnológica, identificación tecnológica y adopción que conforman la estructura fundamental para una acertada selección de la misma.

2.2. Tecnología

Hidalgo (1999) define tecnología como un medio para transformar conceptualizaciones en bienes o servicios, optimando procesos. Gaynor (1999) plantea la tecnología como el elemento necesario para realizar una tarea, incluyendo todo lo referente a la transformación de recursos en bienes o servicios y la considera la esencia del conocimiento científico y de ingeniería aplicable en el diseño de productos o procesos y en la búsqueda de innovaciones tecnológicas.

Los autores antes mencionados comulgan en que la tecnología es un elemento necesario en el accionar humano durante la búsqueda de la satisfacción de necesidades y continúan al destacar que evoluciona con el pasar del tiempo. Para Gaynor (1999) las tecnologías se clasifican en 10 tipos que se describen a continuación:

Tecnologías del estado del arte: Son iguales o superiores a tecnologías competidoras.

Tecnologías de propiedad intelectual: Tecnologías que se encuentran protegidas bajo figuras legales de pertenencia como patentes o derechos de reserva, las cuales crean ventajas en el mercado.

Tecnologías conocidas: Son comunes entre organizaciones, el factor de cambio es la forma en la que la usan.

Tecnologías esenciales: Necesarias para mantener una posición en el mercado

Tecnologías de apalancamiento: Apoyan a productos en específico o líneas de productos más sin embargo no toman clases de productos

Tecnologías secundarias: Son el apoyo de las tecnologías esenciales

Tecnologías de paso: Son aquellas cuya tasa de desarrollo controla la tasa de desarrollo de producto o proceso.

Tecnologías emergentes: Representan el primer paso necesario para comenzar estudios para futuros productos.

La producción del gas a partir de agua residual se encuentra en el estado de arte, debido a que a nivel mundial es tan eficiente como las demás tecnologías que producen combustible, en Venezuela no esta desarrollada este tipo de tecnología, para la fecha solo se tiene presente la producción de gas como asociado a la extracción de crudo.

Gaynor (1999), expresa que el proceso de integración tecnológica, esta estructura en cinco divisiones, siendo la primera de estas o fase 1, el área de investigación y desarrollo, llamada así debido a que en la misma se desarrollan todas las informaciones y esquemas de la tecnología en estudio.

Es de vital importancia dedicar tiempo y esfuerzos a esta primera fase dada la estrecha relación que presenta con las demás fases. (Ver cuadro 1). La fase 2 se enfoca en la manufactura luego del establecimiento de parámetros y definición del objeto de estudio, anteriormente realizadas, comenzando con los procesos de fabricación de prototipo o modelo para luego su masificación.

Cuadro 1: Integración de las funciones de los negocios en la gestión tecnológica

			I&D Diseño Manufactura Marketing	I&D Diseño Manufactura -Marketing
	Manufactura	Distribución física Servicio al cliente	Finanzas Compras Asuntos Legales y Patentes Relaciones Publicas Administración General	Patentes Relaciones Publicas Administración General Clientes Proveedores Otras influencias internas externas
Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5

Fuente: Gaynor (1999)

En cuanto a la fase 3 una vez diseñada la más manera eficiente de hacer el nuevo objeto de estudio y comprendido en su totalidad el compendio de características, se comienza la distribución a clientes y

usuarios de forma masificada, elemento fundamental para el surgimiento de una tecnología. En la fase 4 se legaliza el producto, y se masifica en forma física. En la última fase el autor comienza a incluir proveedores dentro del entorno del producto debido a que este ya pertenece a las masas y es necesario que llegue a las mismas en forma rápida.

La tecnología para la producción de gas a partir de aguas residuales a nivel mundial estará entre los niveles 4 y 5, debido a que en el mercado ya existen compañías que producen, capacitan, distribuyen y en algunos casos ya cuentan con patentes registradas. La evolución en Venezuela esta enmarcada en la fase 2 debido a que estas propuestas ya se están probando en laboratorios.

2.2.1 Proceso de Identificación y adopción de tecnologías

La adquisición de una tecnología en particular es el producto de un estudio de factibilidad técnico y económico por parte de un grupo especializado de personas, luego se adapta la tecnología adquirida para su necesidad particular y se hace correctamente la transición de la adquisición a la adaptación. Rodriguez (2006) afirma que para el proceso de identificación tecnológica las compañías tienen un mecanismo formal para estar conscientes de las tecnologías emergentes relacionadas con las necesidades existentes. En este proceso se identifica y adopta la tecnología más prometedora para el negocio. Para Alfonzo (2002), este proceso se lleva acabo en cuatro etapas.

Identificar: Las tecnologías se detectan mediante estudios de inteligencia tecnológica y elaboración de propuesta tecnológica.

Evaluar: Estableciendo efectividad, aplicabilidad y rentabilidad de la misma a través de proyectos pilotos donde se compara incertidumbre.

Transferir: Las lecciones aprendidas son puestas en práctica y el capital humano es preparado para el nuevo proceso.

Masificación: Es la materialización de la oportunidad debido a la adopción efectiva de la tecnología de punta que agreguen valor adicional.

Rodríguez (2006) conceptualiza de forma general la identificación y adaptación de tecnologías como mecanismo formal, en contraposición con Alfonso (2002) que detalla cada una de las fases de este proceso debido a la importancia que tiene la estrecha relación que hay entre ellas para una buena ejecución del mismo

En Venezuela el estado como encargado del suministro de energía en el país, solo utiliza los combustibles fósiles debido a que no existe competencia en la distribución a escala nacional y no es de su interés incentivar otras propuestas que de alguna forma aminoren sus ingresos, por lo que no promueve la búsqueda de nuevas tecnologías.

2.3. Modelo de cálculo de producción de biogás

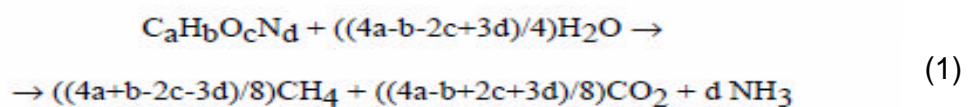
Según lo expresado por Brown y Maunder (2005), el caudal de biogás recuperable en un vertedero puede ser calculado mediante modelos matemáticos a partir de los datos de composición de los lodos residuales y

cantidades vertidas. El resultado obtenido, no obstante, esta sujeto al contraste con los resultados experimentales de ensayos de campo, estudio y caracterización de los lodos primarios. Otros autores influenciados por Brown y Maunder como Christensen (2001), también han publicado sus apreciaciones en diferentes fechas pero tomando como elemento fundamental lo descrito por los autores anteriormente citados.

El modelo consta de las siguientes etapas:

2.3.1 Volumen total de biogás generado y recuperado por la degradación de los lodos.

La cantidad de biogás recuperado puede ser calculada de acuerdo a la cantidad de lodos y la composición de los mismos. Para ser más explícitos se ahondara en mayor profundidad sirviéndose de los siguientes planteamientos. Según Agdag (2007) La materia orgánica se transforma en una degradación anaeróbica en metano y dióxido de carbono según la siguiente reacción:



Fuente: Agdag 2007

Representa la formula característica de la materia orgánica, donde los coeficientes estequiometricos a, b, c y d deben ajustarse dependiendo de la composición exacta de los residuos. Teóricamente, se puede relacionar la producción de biogás con la demanda química de oxígeno (DQO).Brown y

Maunder (2005) definen la DQO como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente un determinado sustrato. No toda la materia orgánica oxidable químicamente lo es biológicamente. Así, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos no son degradables biológicamente aunque estén reflejados en la DQO por que si lo son químicamente.

Por tanto, al calcular la producción de biogás, que depende del grado de biodegradabilidad el sustrato, en función de la DQO, se comete un error por exceso. Esta consideración será tenida en cuenta. Si la degradación de la materia orgánica fuera completa, el oxígeno necesario para oxidar 1 gramo de materia orgánica inicial sería igual al oxígeno necesario para oxidar el volumen de metano generado anaeróbicamente a partir de ese sustrato. En la combustión de un mol de metano se consumen dos moles de oxígeno. Es decir para oxidar completamente un mol de metano son necesarios dos de oxígeno.

La DQO del metano es, por tanto, 4 Gramos de oxígeno por uno de metano. Es decir se generan 0.25 gramos de metano para cada gramo de DQO de materia orgánica, lo que es equivalente a $0.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ de metano a $^{\circ}\text{C}$ y un Bar de presión. La producción de metano por Kg de DQO de materia orgánica es de $0.35 \text{ m}^3\text{N}$. Esta es la producción máxima, es decir supone la degradación máxima de los lodos, algo que regularmente no ocurre en el digestor. Los lodos contienen una variedad de compuestos orgánicos degradables por el proceso anaeróbico, naturalmente entre estos compuestos existe una variabilidad del DQO.

De acuerdo con lo antes expresado, los autores concuerdan en que el volumen del gas que se genera viene determinado por el DQO de la materia orgánica presente y que debido a esto se limita la producción a un volumen máximo.

2.3.1.1 Influencia de la composición de los residuos

Para Mejía (2006) las características del sustrato son de gran importancia dentro del proceso de digestión anaeróbica, especialmente su contenido de materia biodegradable. Además, afirma que el tipo de sustrato influye en la conversión de este a metano. Otros autores como Martin y Camps (2008), confirman esta declaración aseverando que la proporción de gas metano producido depende de la composición de la materia prima empleada. El sustrato inicial (residuos) debe tener un alto contenido de carbón, principalmente formado por azúcares, lípidos, proteínas y debe contener la menor cantidad posible de material no biodegradable.

De acuerdo con Board (2004), desde el punto de vista del diseño del proceso de biodigestión una alimentación líquida al proceso se define como los sustratos en los que la mayoría de los compuestos orgánicos biodegradables permanezcan en una forma soluble y cuyo contenido de sólidos volátiles suspendidos este por debajo 0.5% en peso. Según Williams (2005) se puede distinguir el porcentaje no biodegradable anaeróbicamente o materia inerte, y el porcentaje biodegradable anaeróbicamente o materia orgánica.

De acuerdo con Energy and Resources Institute, Institut Catala d'Energia (2004) la eficacia de un biodigestor depende de la cantidad de contenido orgánico presente en el agua residual. Dentro del porcentaje de materia orgánica se distinguen las fracciones de restos de alimentación, limpieza de jardines, papel cartón y madera.

La velocidad con que estos componentes es degradado de forma anaeróbica es diferente. Por lo que en resumen los autores afirman que las fracciones más importantes de la materia orgánica para el proceso son: la fracción de alta y media degradabilidad ya que propician una mayor producción de gas.

2.3.1.2 Caudal de biogás recuperable

Chavez, Cartolin, Villanueva y Cervantes (2007) plantean que la presión de gas disponible (gas recuperable) varía según el tipo de reactor y el excremento que se utilice. El contenido de metano del biogás depende del tipo de compuesto que se este degradando suponiendo una composición del 50% del biogás en volumen de gas seco de metano, valor habitual en el biogás de lodos industriales.

Según Agdag (2007), ningún sistema de captación es perfecto por ello se entenderá como normal la recuperación del 70% del biogás. Teniendo en cuenta que la producción teórica recuperable de biogás por tonelada de materia orgánica húmeda será de 153 m³N y 95m³N para la fracción de alta y media degradabilidad.

Chavez, Cartolin, Villanueva y Cervantes (2007) y Agdag (2007) están de acuerdo en que la producción de biogas es dependiente de la composición, sin embargo el primero asegura que además debe considerarse el tipo de reactor. Sobre este último punto Agdag (2007) sostiene que independientemente del equipo de biodigestión los sistemas de gas no son perfectos y por lo tanto se pierde un 30% de producción durante el proceso.

De acuerdo a lo antes dicho es necesario conocer las características de los lodos a digerir para determinar el volumen de gas producido y se sobreestimara el diseño tomando en cuenta el porcentaje de gas recuperable estimado que es de un 70 %. A continuación la formula que explica el proceso del cálculo realizado.

$$V = K \times (1-H) \times (1/M) \times R \times \alpha \times \beta \times \{ A \times X + B \times Y \} \quad (2)$$

Fuente: Williams 2005

2.3.1.3 Calculo de la velocidad de generación de biogás

Para Williams (2005) la velocidad en la que se destruye la materia orgánica en un biodigestor puede suponerse directamente proporcional a la cantidad de materia no tratada que se denomina C (t) o a una potencia de ella. Los distintos modelos cinéticos propuestos en la bibliografía se diferencian por el valor que le dan a la variable n que representa el orden de reacción.

Así tenemos los de orden 0 donde la $n = 0$ y por tanto la velocidad de destrucción de materia orgánica es constante; los modelos de primer orden donde $n = 1$; y los de segundo donde $n = 2$. De acuerdo a lo mencionado por Copos (2000) órdenes de reacción mayores no generan mejores resultados, de hecho la ecuación de primer orden proporciona una mejor modelización de la generación del biogás.

Ambos autores, aportan información similar sobre la cinética del proceso, pero solo Copos (2000) asegura que la velocidad de generación de gas puede calcularse de manera más eficaz empleando una ecuación de primer orden. Determinando este parámetro se establecerán los tiempos para los ciclos de ejecución de cada fase en el digestor, maximizando cada una de las reacciones que se suscitan.

2.3.2 Cálculo de los digestores

De acuerdo a lo expresado por Hernández (1999) y Agdag (2007) en el cálculo de los digestores se pretende definir el volumen de digestión necesario, se valorar la cantidad de gas producido y la reducción de sólidos. Los métodos utilizados se definen a continuación:

2.3.2.1 Método basado en el tiempo de retención

Agdag (2007) plantea que para un sistema de digestión adoptado se considera un tiempo de retención, que empíricamente sea función de la temperatura del proceso adoptada. De acuerdo con Nijaguna (2002), durante

la operación del biodigestor se mide la producción de gas a diferentes tiempos de retención. Debido a que la temperatura del digestor afecta la producción, se debe medir durante el mes más caluroso del año y durante el mes más frío.

Estas mediciones se realizan en al menos cuatro plantas de diferentes tamaños, donde los digestores tengan diferentes volúmenes. La producción de gas específica se determina dividiendo el volumen de gas medido entre la cantidad de lodo alimentado a la planta. Los resultados son graficados en una curva y luego son usados para calcular volúmenes de digestor y de gas. Agdag (2007) y Nijaguna (2002) presentan el método de manera equivalente considerando la influencia de la temperatura y el tiempo de retención en el proceso y relacionándolo con los volúmenes de gas.

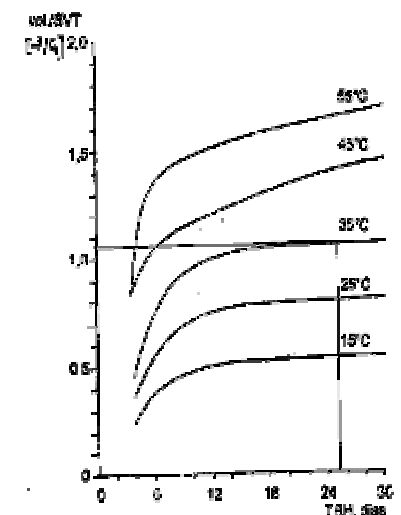


Gráfico 1. Relación Temperatura- Volumen de gas por kg de solidos Volatiles-Tiempo de Retención.

Fuente: Agdag (2007)

Por otra parte, si el estudio propuesto por Nijaguna (2002), es muy costoso y complicado para la planta, el mismo autor, plantea que la producción de gas puede calcularse a partir de datos de plantas ya existentes mediante procedimientos teóricos. Sin embargo, Hernández (1999) estipula que una de las desventajas de este método es que los supuestos son varios y el cálculo de la producción puede presentar una ligera desviación.

Los autores antes mencionados, difieren en su opinión acerca de la efectividad que tiene este método en cuanto a cálculo de producción de gas. Nijaguna (2002) asegura que los valores aportados por el mismo son confiables, mientras que Hernández (1999) plantea que cuando se trabajan con datos de otras plantas existentes se recurre a muchos supuestos restándole precisión a los resultados.

No obstante y considerando lo expuesto, si se adopta un cierto tiempo de retención, y se conoce la concentración de los sólidos totales de la alimentación al sistema, se puede determinar mediante este método la relación volumen de gas/kilogramos de sólidos volátiles totales obtenida adoptando una determinada temperatura para el sistema.

Con dicha relación se calcula efectivamente el volumen de producción de gas. Este método representa una forma práctica de estimar este parámetro, determinante al momento de la evaluación y ejecución de la propuesta, debido a que con la data apropiada, permite fácil y rápidamente conseguir este objetivo.

2.3.2.2 Método experimental

De acuerdo a la opinión de Hernández (1999) y siguiendo algunos de los múltiples modelos cinéticos del proceso, como los de Eckenfelder, Hanze y Harremoes, Chen y Hashimoto, se determinan por ensayos los parámetros cinéticos. Una vez conocidos dichos parámetros se tiene definido el modelo de cálculo. Tomando el modelo de Chen y Hashimoto (1999).

$$B = B_o \cdot \left(1 - \frac{K}{m \cdot q - 1 + K} \right) \quad (3)$$

$$S = S_o \cdot \left(R - \frac{(1-R)K}{m \cdot q - 1 + K} \right) \quad (4)$$

$$Y_v = B \cdot \frac{S_o}{q} \quad (5)$$

μ_m = Velocidad máxima específica del crecimiento de los microorganismos

K= Constante cinética adimensional.

B_o = Producción I de CH₄/g S.S.V en el lodo de alimentación.

R= Coeficiente indicador de la fracción no biodegradable (%).

B= Producción de I CH₄/g S.S.V de los lodos añadidos en continuo al digestor, en un momento dado.

S= Concentración de S.S.V en un momento dado, en (g S.S.V/l)

S_o = Concentración de S.S.V del lodo de alimentación, en (g S.S.V/l)

θ = Edad del fango (día).

Y_v = Producción de metano, en volumen (m³N)

S_o/θ = Velocidad de alimentación.

En un reactor biológico, a una temperatura constante, por ejemplo 33°C, se introducen de forma sucesiva lodos, manteniendo dichos lodos durante distintos periodos en el reactor, y determinando los volúmenes de gas producido, los S.S.V incorporados y los S.S.V al final del período, la D.Q.O de entrada y la D.Q.O de salida. Se determinan así los valores de producción de gas en ml/día y g S.S.V/día. Si se representa la curva, tomando en un eje los valores de θ en días, y en el otro los valores de B representados por la siguiente ecuación:

$$\frac{m \lg as / día}{g .S.S.V / día} \quad (6)$$

En valor asintótico se obtiene el valor de B_0 . Si se representan los valores de θ (días) sobre un eje, y sobre el otro los valores de S/S_0 , la curva obtenida tiende al aumentar θ al valor asintótico de R, esto define el % del contenido no biodegradable. Representando los resultados de los ensayos en unos nuevos ejes, sobre los abscisas los valores de θ (días), y sobre el de ordenadas los valores de $B/(B-B_0)$, la recta representada en dichos ejes, interpolación de los puntos, permite obtener los valores de K y μ_m (día⁻¹). Por último representando en otros ejes, los valores de S_0/θ en abscisas, y los valores de $B-S/\theta$ en ordenadas, el máximo de la curva de la máxima producción de metano, se obtiene el tiempo de retención

Del modelo $B=f(B_0)$, se puede establecer la relación:

$$\frac{B}{B_0 - B} = \frac{m_m}{K} q - \frac{1}{K} \quad (7)$$

Otro método planteado para estimar la producción de gas tanto experimental como teóricamente, es el método basado en retención de sólidos. proponen que la cantidad de gas metano producido puede ser calculada usando la siguiente ecuación, usando como temperatura del sistema 35°C:

$$V = 0,40 \frac{(S_o - S)(Q)}{\frac{10^3 \text{ g}}{\text{Kg}} - 1,42 P_x} \quad (8)$$

S_o = Flujo de sólidos a la entrada (Kg/d)

S = Flujo de sólidos a la salida (Kg/d)

P_x = Cantidad de sólidos volátiles producidos por día (Kg/d)

Los autores anteriormente citados presentan métodos radicalmente diferentes, Tchobanoglous, Burton, Stensel (2003) opta por cálculos que no requieren complejidad en comparación con el elaborado método presentado por Hernández (1999). Sin embargo, ninguno de los métodos experimentales presentados puede ser aplicado para la estimación, ya que los parámetros empleados en el cálculo del volumen solo pueden medirse mediante cuidadosas técnicas dentro del laboratorio que deben realizar por expertos.

2.3.2.3 Método basado en el factor de carga

El grupo de consultores Aqualimpia Beratende Ingeniure (2008) explica que la carga orgánica volumétrica, la cual se define como la cantidad de materia orgánica seca con la que se alimenta diariamente al digestor por m³ de volumen de digestor, es considerada como un parámetro para controlar la

carga del digestor y es un factor determinante para el dimensionamiento del mismo. Si el sustrato está muy diluido, las bacterias no tienen suficiente alimento para vivir; mientras que un exceso en sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y por consiguiente la efectividad del proceso, ya que les impide acceder al alimento.

El valor de la carga orgánica volumétrica depende mayormente de la temperatura del proceso en el interior del digestor y del tiempo de retención hidráulica (TRH). Si este valor es muy alto el proceso puede tornarse inestable y debe ser observado y analizado con mas frecuencia. Generalmente la carga orgánica volumétrica debe alcanzar valores entre 2-3 kgMS/m³ de digestor por día.

Hernández (1999) plantea el método conocido como factor de carga. El factor de carga de un digestor se suele expresar en kilogramos de sólidos volátiles añadidos por metro cúbico de digestor y día, o bien, por kilogramos de sólidos volátiles presentes en el digestor y día. El cálculo del volumen de digestión se efectúa dividiendo los kilogramos de sólidos volátiles producidos cada día en la estación depuradora, por el factor de carga. Es obligatorio al aplicar este método el cálculo del tiempo de retención en función de la concentración del fango, para comprobar que dicho tiempo es aceptable.

Si no se conoce alguno de los parámetros antes mencionados no podremos utilizar este método además que los espectros de temperatura son bastante amplios por ende el calculo no será preciso pero si demostrara cual es el máximo de volumen producido en las condiciones dadas. Los autores

antes citados, coinciden en que el factor de carga es determinante en el cálculo del volumen de gas que se producirá. Solo Hernández (1999) describe el procedimiento para llevar a cabo dicho cálculo.

Cuadro 2: Cargas en biodigestores

Digestión media-baja carga	Carga en Kg S.S.V/m ³ *día
Digestión de una etapa, sin calefacción	
Digestión de una etapa, con calefacción (25°C)	=0,4
Digestión de una etapa, con calefacción (32°C)	=1,0 =1,2
Digestión en dos etapas:	
Digestor primario con calefacción y agitación	=2,0 =0,5
Digestor sin calefacción y agitación	

Fuente: Hernández (1999)

Cuadro 3. Valores de varios factores en digestión anaeróbica

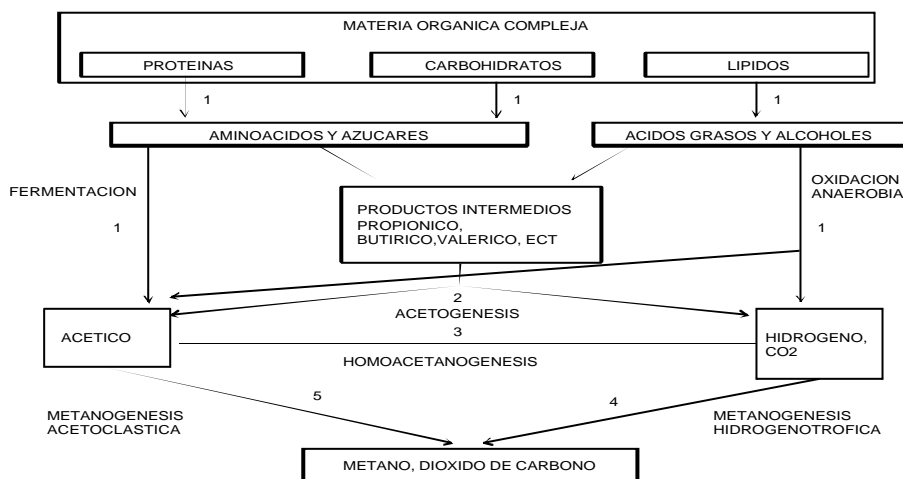
Tipo de proceso Factores	Alta carga digestor único	Alta carga digestor primario	Alta carga digestor secundario
Temperatura de operación	30-35	30-35	
Tiempo de retención(días)	10 – 20	10 - 25	3 - 8
Carga Kg S.Sv/M3.d	2-8	1.5-6.0	0.5-2
DQO Kg/M3*d	1-6	1-6	
Producción de gas M3/KgS.S.V eliminado	0.36- 0.39	0.75-1.10	
Eliminación D.Q.O %	75-95	80-95	

Fuente Hernandez (1999)

2.4 Descripción del proceso.

Según lo expresado por Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000) el proceso comienza por la mezcla de los residuos orgánicos con agua a temperatura ambiente. La mezcla homogeneizada se bombea a los tanques (digestores), donde se produce la fermentación al cabo de 15 días de permanencia, obteniéndose el compostaje y el biogás.

El biogás se almacena en un tanque desde el que se envía a los motores de combustión en los que se puede generar electricidad y el sólido seco es un compostaje fermentado. La descomposición de los residuos hasta la obtención del compostaje y el biogás es un proceso en etapas, que incluye la preparación y acondicionamiento de los residuos, la hidrólisis, la metanización o digestión, el almacenamiento de los subproductos obtenidos, así como la deshidratación de los mismos.



Grafica 2. Fases de la fermentación

Fuente: Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000)

Este proceso como tal será mejor en climas como el de Venezuela debido a que se necesita altas temperaturas para que la cinética del proceso pueda ser rápida. En el gráfico 2 se detalla como en la digestión anaeróbica los compuestos orgánicos atraviesan por una serie de procesos metabólicos interconectados que logran biodegradarlos hasta llegar al metano mediante las vías de metanogénesis acetoclástica y hidrogenotrófica.

2.4.1. Preparación y acondicionamiento de los lodos.

Para Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000) el acondicionamiento de los lodos para que se pueda proceder a su metanización se realiza en un tiempo estimado de una hora. En este lapso, la fracción orgánica menor de 40 mm, procedente de la línea de pre tratamiento, se descarga sobre los depósitos mezcladores, donde se le añade agua para producir una suspensión de residuos con un contenido máximo de materia seca entre el 10 y 15%. Los mezcladores están equipados con cuchillas rotativas para disgregar y poner en suspensión la fracción orgánica susceptible de fermentación, mientras que los componentes que no son biodegradables (plásticos, tejidos, metales, vidrio, etc.) se mantienen prácticamente intactos.

Este fenómeno se debe a que los elementos que no son de carácter orgánico dentro del agua residual no pueden participar en el proceso de fermentación, por lo cual son desechados tal y como entraron al biodigestor. La suspensión mezclada sale por la parte inferior del mezclador y fluye por gravedad hasta el separador de fracción inerte consistente en una criba

giratoria o trómel de 20 mm de luz en el que se quita la fracción ligera, formada por materia flotante, en suspensión y material grueso (madera, plástico, metal) mayor de 20 mm, de la mezcla. Esta fracción inerte se deshidrata, se compacta y se descarga en un contenedor para su posterior incorporación a la prensa de rechazos.

En síntesis, con el acondicionamiento previo se consiguen esencialmente la trituración y la disgregación de las sustancias orgánicas fermentables; la separación hidráulica de inertes y la preparación de una mezcla con fracción orgánica que puede bombearse con un contenido de materia seca entre 10--15% en peso.

2.4.2. Hidrólisis

Según lo expresado por Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000) en esta etapa del proceso los compuestos orgánicos complejos proteínas, lípidos e hidratos de carbono, son despolimerizados, debido a la acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas fácilmente degradables, ejemplo de esto son azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, entre otros. Se trata de un proceso enzimático extracelular, y las bacterias responsables de su generación son las bacterias hidrolíticas –acidogénicas.

La mezcla acuosa con residuos disueltos, obtenida en la fase de acondicionamiento, se bombea hasta el tanque de hidrólisis ubicado en el área de metanización. Antes de pasar a la etapa de hidrólisis, se debe realizar un pretratamiento de acidificación de la mezcla para regular el pH.

Según Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000) Este pretratamiento se realiza en un tanque de mezcla de una determinada capacidad, equipado con un agitador de palas con el que se consigue la mezcla total del sustrato con los reactivos químicos reguladores de pH. Este tanque actúa también como tanque pulmón regulando el flujo de entrada de la mezcla al depósito de hidrólisis.

En este depósito se consigue transformar el flujo discontinuo de la entrada del material (6 días de la semana 1 turno en línea de tratamiento primario) en un flujo continuo (7 días de la semana 24 horas) necesario para el proceso de metanización. En esta etapa de acidificación, se forman diferentes bacterias anaeróbicas, ácidos orgánicos (de cadena corta), alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. El tiempo de residencia en esta etapa de 5 días. En este pre-reactor se inicia el proceso de descomposición anaeróbica.

2.4.3. Metanización.

De acuerdo a lo publicado por Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000) la descomposición de los residuos tiene lugar en los dos tanques metálicos o digestores de diámetro y altura determinados, provistos de agitadores. Cada agitador está montado en vertical sobre el propio techo del digestor y garantiza una mezcla en continuo. De esta forma se evita la sedimentación en los tanques, la alimentación uniforme de nutrientes a las bacterias y se

compensan los gradientes de pH y la temperatura, dado que la actividad de las bacterias anaeróbicas es muy sensible a los cambios en estos parámetros.

El proceso dura aproximadamente 15 días. La alimentación al primer digestor se realiza por la parte superior; y el paso de la fase líquida del primero al segundo se realiza por la parte inferior por vasos comunicantes. Respecto a la fase gaseosa, está queda acumulada en la parte superior del primer digestor y pasa por el segundo, antes de ser enviada al tanque de almacenamiento.

De acuerdo con Agdag (2007), constructivamente, los digestores son recipientes cilíndricos de determinada capacidad, que se montan sobre cimentaciones de hormigón protegidas con un recubrimiento impermeable. Las zonas de contacto de líquido y gas deben protegerse con materiales adecuados y tanto el techo como el cuerpo quedan herméticamente sellados, previniendo las fugas de gas. Además, el cuerpo cilíndrico está aislado térmicamente.

El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia orgánica destruida, según las características del influente. El gas se compone fundamentalmente de metano y anhídrido carbónico. El contenido en metano del gas de un digestor que funcione adecuadamente variará del 65% al 70% en volumen, con una oscilación en el anhídrido carbónico del 30% al 35%. Uno o dos por ciento del gas del digestor se compone de otros gases.

Debido a la presencia de metano el gas del digestor posee un poder calorífico aproximado de 500 a 600 kilocalorías por litro. El gas del digestor puede ser extremadamente peligroso en dos aspectos. La mezcla de gas y aire en proporciones comprendidas entre el 5,5% y el 13,5% es explosiva y puede también causar asfixias por agotamiento de oxígeno. Por lo tanto, en las instalaciones de bombeo de fangos y cerca de los digestores estará prohibido encender fuego, fumar o provocar chispas.

2.4.4 Almacenamiento del digesto (compost) y el gas.

Para Pavlosthatís, Giraldo, Gómez (2000) el compost formado en los digestores se confina en el depósito de almacenamiento. En este recipiente tiene lugar la etapa de post-fermentación, donde se agota al máximo la producción de metano. Este mismo tanque sirve para almacenar provisionalmente todo el gas producido que por diferencia de densidad se acumula en la parte superior y desde allí pasa al depósito de gas para su almacenamiento previo a la cogeneración de energía (de ser este el caso).

El sistema de gas lo traslada desde el digestor hasta los puntos de consumo o al quemador de gases en exceso. El sistema de gas se compone de las siguientes partes: cúpula de gas, válvulas de seguridad y rompedora de vacío, apaga llamas, válvulas térmicas, separadores de sedimentos, purgadores de condensado, medidores de gas, manómetros, reguladores de presión, almacenamiento del gas, quemador de los gases sobrantes.

2.4.5 Deshidratación del compost

Según Pavlosthatis, Giraldo, Gómez (2000) el compost almacenado se bombea nuevamente hasta los deshidratadores. El agua extraída retornará, directamente por gravedad, hasta el depósito de agua situado muy próximo a las prensas de deshidratación. La deshidratación del compost procedente de la metanización se realiza mediante dos prensas vis-sin-fines. Previamente a la deshidratación, se realiza el acondicionamiento mediante un agente de floculación, formado por una disolución de un polímero. El agua obtenida se reutiliza para hacer una nueva mezcla con fracción orgánica procedente del pre tratamiento y la sobrante se envía al proceso de compostaje.

Los elementos de una planta biodigestora expone Agdag (2007) que son todos aquellos necesarios para poder crear una planta procesadora de biogás, donde se interrelacionan el tanque del biodigestor, el sistema de gas, el muestreador y el sistemas de calefacción. El principal elemento es el biodigestor, los tanques de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos.

El suelo del tanque está inclinado, para que la arena, el material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del influente puedan ser extraídos del tanque. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido.

Para Agdag (2007) la entrada del efluente se realiza en la mayoría de los casos por la parte superior del biodigestor y el sobrenadante se extrae por el lado contrario. Las tuberías de extracción de fangos suelen estar colocadas sobre bloques a lo largo del suelo inclinado del digestor. El fango se extrae por el centro del tanque.

Estas tuberías tienen, por lo general, 15 cm de diámetro, van equipadas con válvulas tapón para evitar obstrucciones, y se utilizan para llevar periódicamente el fango del digestor a un sistema de evacuación de fangos. Estas tuberías transportan también fangos de reserva desde el digestor secundario al primario y recirculan el fango del fondo para remover y romper la costra.

Agdag (2007) plantea que el gas del digestor puede ser utilizado en la estación depuradora de diversos modos: para calentar los digestores, en la calefacción de los edificios, como combustible de los motores para las soplantes del proceso de fangos activados, para producir la energía eléctrica de la instalación.

El sistema de gas lo traslada desde el digestor hasta los puntos de consumo o al quemador de gases en exceso. El sistema de gas se compone de las siguientes partes: cúpula de gas, válvulas de seguridad y rompedora de vacío, apaga llamas, válvulas térmicas, separadores de sedimentos, purgadores de condensado, medidores de gas, manómetros, reguladores de presión, almacenamiento del gas, quemador de los gases sobrantes. A continuación se detallara en la descripción de cada componente:

La cúpula de gas es un punto en el techo del digestor desde el cual se extrae el gas del tanque. En los tanques de cubierta fija puede haber también un cierre de agua incorporado, para proteger la estructura del tanque del exceso de presión positiva o negativa (vacío) creada por la extracción del fango o del gas demasiado rápidamente.

Expone Agdag (2007) que si la presión de gas sube por encima de los 30 cm de columna de agua, se escapará a través del cierre de agua hacia la atmósfera, sin levantar la cubierta. Si se extrae el fango o se utiliza el gas con demasiada rapidez, el vacío puede pasar de los 20 cm y romper el cierre de agua, permitiendo la entrada del aire en el tanque. Sin el cierre de agua el vacío aumentaría enormemente y destrozaría el tanque.

La tubería entre el tanque de almacenaje de gas y el digestor puede proteger a éste de las pérdidas del cierre de agua, si el paso no está cortado. Cuando se introducen líquidos en el digestor, el gas puede salir por la tubería hacia el tanque de almacenaje y cuando se extraen del digestor, este puede volver al tanque a través de la misma conducción. La válvula de seguridad y la rompedora de vacío van colocadas sobre la misma tubería, pero cada una trabaja independientemente. La válvula de seguridad consta de un plato cargado con arandelas de peso calibrado. La combinación de estos pesos junto con el peso del plato debe igualar la presión de gas del tanque.

Si la presión de gas en el tanque excede de este límite, la válvula se abrirá y dejará escapar gas durante un par de minutos. Ello debe ocurrir antes de que se rompa el cierre de agua. El cierre de agua se puede romper

cuando la alimentación del tanque sea excesiva o cuando la extracción del gas sea demasiado lenta. Según Agdag (2007) la válvula rompedora de vacío funciona de manera idéntica, excepto en que alivia las presiones negativas para evitar el colapso del tanque.

Agrega este autor que el apaga llamas típico es una caja rectangular que contiene aproximadamente de 50 a 100 placas de aluminio corrugado con agujeros taladrados. Si se ocasionara alguna llama en la tubería del gas, se enfriaría por debajo del punto de ignición al pasar a través de los deflectores, pero el gas podría seguir pasando con poca pérdida de carga. Para evitar explosiones deben de instalarse apaga llamas: entre las válvulas de seguridad y rompedora de vacío y en la cúpula del digestor, después del purgador de sedimentos, en la tubería de gas del digestor, en el quemador de gases en el exceso, delante de cada caldera, horno o llama.

Las válvulas térmicas: son dispositivos de protección instalados cerca de una fuente de llama y cerca de la cúpula de gas. Este tipo de válvulas son redondas, con un plato de cierre unido al accionamiento, por un muelle vástago. El vástago apoya sobre un disco fusible que mantiene el plato unido. Si la llama genera el calor suficiente, el elemento fusible se funde y el muelle acciona el vástago hasta que el plato asienta, para cortar el paso del gas.

Los separadores de sedimentos son recipientes de 30 a 40 cm de diámetro y 60 a 90 cm de longitud. Está situado, generalmente, en la parte superior del digestor, cerca de la cúpula de gas, y está equipado también con

un deflector interior perforado, y un drenaje de condensados cerca del fondo. El gas entra por la parte superior de un lateral del tanque, desciende, atraviesa el deflector, vuelve a subir y sale por la parte superior. La humedad del gas y todos los trozos grandes de incrustaciones quedan retenidos aquí antes de entrar en el sistema de gas.

Los medidores de gas pueden ser de diversos tipos, como fuelles, diagramas de flujo en paralelo, molinetes y placas de orificios o presión de diferencial. Los reguladores de presión se instalan, generalmente, antes y después del quemador de gases en exceso. Estos reguladores suelen ser del tipo diafragma y controlan la presión en todo el sistema de gas del digestor. Están normalmente tarados a 20 cm de columna de agua, ajustando la tensión del muelle sobre el diafragma. Si la presión de gas en el sistema es inferior a 20 cm de columna de agua, no llegará gas al quemador.

Afirma así mismo que, cuando la presión del gas alcance los 20 cm de columna de agua, el regulador se abre ligeramente, dejando que el gas pase al quemador. Si la presión continua aumentando, el regulador se abre aún más para compensar. Los reguladores de gas están también situados en otros puntos del sistema, para regular la presión de gas en las calderas, calentadores y motores. El gas producido en la digestión anaerobia se almacena en gasómetros, bien a presión bien de cubierta flotante.

Gasómetros a presión. El gas que se produce en el digestor es enviado por medio de compresores a depósitos donde queda almacenado a presión. Posteriormente, es extraído de estos depósitos y enviado a las instalaciones

de reutilización o de quemado. La presión de almacenamiento es, aproximadamente, de 3,4 atmósferas, lo que permite disminuir el volumen de gas a una tercera parte de lo que ocupa en el digestor.

Gasómetros de cubierta flotante. Almacenan el gas variando su altura. En estos gasómetros los gases se mantienen a una presión baja aproximada de 200 mm de columna de agua. Consisten en una campana flotante, similar a la cubierta flotante de un digestor primario. Una serie de ruedas permiten que la cubierta pueda deslizarse libremente hacia arriba o hacia abajo, según la cantidad de gas almacenado. Estas ruedas deslizan sobre unos perfiles de acero que actúan como guías de la campana.

Quemador de gases sobrantes: El quemador de gases se utiliza para eliminar los gases en exceso del sistema de digestión. Va provisto de una llama piloto de quemado continuo, para que cualquier exceso de gas que pase por el regulador se quemé.

El muestreador consiste en una tubería de 8 ó 10 cm de diámetro con una tapa de cierre con bisagras que penetra en el tanque de digestión, a través de la zona de gas, y que está siempre sumergida unos 30 cm en el fango del digestor. Esto permite la toma de muestras del fango del digestor.

2.5 Sistema de calentamiento del digestor

Un digestor puede funcionar a cualquier temperatura, sin embargo, el tiempo que tarda en completar la digestión es variable y está en relación con ella.

En general, los digestores modernos funcionan en un rango de temperaturas medias, entre 35 y 37°C. Agdag (2007) comenta que los digestores se pueden calentar de diversos modos, aunque las instalaciones actuales están dotadas, en general, de digestores que se calientan por medio de la recirculación de fangos del digestor a través de un intercambiador exterior de agua caliente. El gas del digestor se usa como combustible en la caldera, cuya temperatura óptima de operación es de 60 a 80°C. El agua caliente se bombea desde la caldera al intercambiador de calor, donde cede su calor al fango recirculante.

2.6 Cámaras de digestión

Según Hernández (1999), las cámaras de digestión más conocidas son los tanques denominados IMHOFF o EMSCHER. En ellos, el fango depositado en la parte inferior, no es atravesado por la corriente de agua residual, de modo que el efluente sale sin ser pútrido. Esto trae como consecuencia que los lodos salientes, son lodos tratados o fertilizantes líquidos debido a que los sólidos disueltos fueron eliminados y las bacterias metanogénicas eliminaron en los desechos orgánicos.

Las cámaras de fermentación han de equiparse con tuberías de extracción de 0.20 metros de diámetro mínimo, calculando la pérdida de carga en ellas a base de un 12.5 por 100. Las tuberías deben instalarse en forma que sea posible sacar muestras de fango digerido para los correspondientes análisis. También conviene, cuando ello es posible, poder

limpiar las tuberías con agua a presión. Debido a que este procedimiento forma parte de los mantenimientos programados para el equipo, con el fin de evitar desgastes, incrustaciones y taponamientos para así lograr un proceso de digestión anaeróbica.

2.6.1 Digestor Único

El digestor único también es denominado clásico o convencional, Hernández (1999) se caracteriza por solo tener un reactor, no se da la suficiente oportunidad a los barros crudos, que periódicamente son necesarios agregar al digestor, para que llegue la biomasa activa del proceso y puedan así ser rápida y eficientemente degradados. El lodo digerido a su vez descargado intermitentemente. Finkelstein, Davison y McMillan (2002), acota además lo siguiente dentro del reactor de una etapa (digestor único) ocurre mezcla incompleta provocada por el escape de gases del lodo en estado de digestión que permanece en la zona inferior del digestor.

De acuerdo con Davis y Masten (2004) el digestor de una etapa es usualmente calentado para aumentar la velocidad de fermentación y por lo tanto, disminuir el tiempo de retención requerido. Los tiempos de retención van en un rango de 30-60 días para estos reactores. Los mismos autores también señalan que para este digestor se requiere un volumen de tanque mayor, debido a sus largos tiempos de retención, cambios de carga intermitentes, entre otros. De hecho, solo un tercio del tanque se emplea durante el proceso de digestión.

De acuerdo con Finkelstein, Davison y McMillan (2002), en un proceso de digestión de una sola etapa (digestor único), puede ocurrir el proceso de metanización y acidificación simultáneamente lo cual dificulta mantener las condiciones óptimas de operación dentro de la digestión. De igual manera, Madan y Madan (2009), definen a un sistema de una etapa como aquel en el cual todas las reacciones biológicas ocurren en un solo digestor sellado o un tanque de retención.

Madan y Madan (2009) y Hernández (1999), definen de igual manera al proceso como aquel donde solo existe un reactor. Todos los autores anteriormente citados además concuerdan que dentro de este reactor se dan todas las reacciones y que debido a esto se necesita gran volumen de tanque. Este hecho origina que se incrementen los costos de instalación y además incrementa el grado de dificultad en la operación de la planta, dado que deben ser controladas las variables con precisión con el fin de que las reacciones de producción de metano no se vean afectadas.

Deshmukh (2005), indica que el digestor de una etapa consiste en dos partes. La parte inferior es el generador y contenedor de los lodos, tiene aberturas para deshidratar y espesar el lodo. La parte superior consiste en un colector de gas flotante en forma de domo. Durante la digestión las burbujas de gas generadas se acumulan en el domo. El gas es extraído por una conexión flexible cerca del tope del domo. El gas puede ser comprimido y almacenado en un tanque separado.

2.6.2 Digestores en dos etapas.

Van Haadel y Van der Lubbe (2007), sugieren que cuando se tratan aguas residuales con una alta fracción de partículas orgánicas grandes, puede ser beneficioso aplicar un proceso anaeróbico en dos etapas. En la primera etapa, la materia orgánica es reducida y parcialmente convertida a compuestos solubles, los cuales se llevarán al proceso de digestión que tiene lugar en un segundo reactor. Adicionalmente, plantean que el primer reactor, donde se da la hidrólisis, contiene típicamente un lodo floculante y es operado a una velocidad de flujo ascendente relativamente baja. La materia particulada influente es retenida dentro de la capa de lodo floculante y luego es convertida en productos solubles por el proceso de hidrólisis.

Dentro de este reactor se da muy poco la metanización debido a que las condiciones tanto operacionales como ambientales no promueven este proceso. Además, de que el desarrollo de la fermentación ácida puede deprimir el valor del pH por debajo del rango óptimo para que se de dicho proceso. Sin embargo, según Madan y Madan (2009) nunca podremos aislar completamente estas dos reacciones y agregan que en el primer biodigestor ocurre también la acetogénesis y acidogénesis

Según Hernández (1999), el fango de la primera etapa es conducido a la segunda etapa, donde se produce la separación del fango digerido y el sobrenadante. Esta etapa es normalmente utilizada como gasómetro, al disponer de cubierta flotante. Deshmukh (2005), esta de acuerdo con

Hernández (1999) y con Van Haadel y Van der Lubbe (2007), al definir que en el primer reactor ocurre solo la hidrólisis y reacciones previas pero agrega que la metanización comienza en la primera etapa y es completada en la segunda. Así como también señala que la acumulación de gas en la cubierta flotante es extraída al igual que el correspondiente al sistema de una etapa por una conexión ubicada cerca del tope del biodigestor.

Las dos etapas están constituidas por depósitos cilíndricos de fondo inclinado. A los depósitos se les llama digestores. A la primera etapa se le denomina normalmente digestión primaria y a la segunda etapa digestión secundaria. Van Haadel y Van der Lubbe (2007) esta de acuerdo con lo expresado por el autor antes mencionado pero adicionalmente expone que los digestores primarios tienen siempre la cubierta fija, mientras que los digestores secundarios la pueden tener fija, flotante, expandible o no tenerla.

Como se mencionó en secciones anteriores, de acuerdo con Energy and Resources Institute, Institut Català d'Energia (2004), la eficiencia de un biodigestor depende de la cantidad de contenido orgánico presente en el agua residual. Esto hace que el pretratamiento sea un paso obligado antes de la digestión tanto para el sistema de una etapa como para el de dos etapas.

En el caso del sistema de una etapa, se prepara una agitación homogénea con agua que resulta en una concentración del 15% de sólidos totales. Esta mezcla uniforme por agitación es necesaria para alcanzar una alta eficiencia de la degradación y una alta producción de biogás. Sin

embargo, este paso de agitación puede ser evitado en el proceso de dos etapas donde una alta concentración de sólidos totales de 20-40% puede ser digerida

En resumen de acuerdo a lo expuesto por los autores se llega a la conclusión que para poder producir gas de manera eficiente es necesario realizar el proceso de dos etapas, esto es debido a que con una sola etapa en primer lugar el agua residual no alcanza los niveles óptimos de tratamiento además que el desperdicio de gas es bastante significativo al momento de incorporar nuevos lodos al reactor en el caso de trabajar con uno sola para todo el proceso. Sin embargo esta conclusión esta sujeta a cambios dependiendo del medio en el se implemente la tecnología

2.7 Aspectos técnicos del proceso

2.7.1 Operación

Franklin (2000), define operación como cada una de las acciones, pasos o etapas, físicas o mentales, que es necesario ejecutar para llevar a cabo una actividad o labor determinada.

2.7.1.1 Mano de Obra.

De acuerdo con Mata (2007), la mano de obra representa el costo del trabajo manual requerido para la ejecución de los trabajos. Uno de los meritos de la tecnología de biodigestión es su simplicidad. Sin embargo,

según Hansen (1999), el entrenamiento de los operadores es recomendable para asegurar una operación apropiada, además del mantenimiento y reparación del biodigestor, por otro lado permite la familiarización de los usuarios con la tecnología.

Según Hernández (1999), para la instalación se requiere una mano de obra capacitada, pero luego de su puesta en marcha el biodigestor puede mantenerse operado por un bajo número de personal incluso una persona. Los autores están de acuerdo en que para este proceso se requiere poco personal y que el mismo no necesita mayor capacitación para manejarlo, sin embargo Hansen (1999) se recomienda el entrenamiento para a los operadores.

2.7.1.2 Mantenimiento.

Para Duffuaa (2009) el mantenimiento se define como la combinación de actividades mediante las cuales un equipo o un sistema se mantiene, o se restablece a un estado en el que puede realizar las funciones designadas. Es un factor importante en la calidad de los productos y puede utilizarse como una estrategia para una competencia exitosa. La inconsistencia en la operación del equipo de producción da por resultado una variabilidad excesiva en el producto y en consecuencia, ocasionan una producción defectuosa. Para producir con un alto nivel de calidad, el equipo de producción debe operar dentro de las especificaciones, las cuales pueden alcanzarse mediante acciones oportunas de mantenimiento.

Según Perozo, A. (2000) el mantenimiento es el trabajo generado para conservar o restaurar los equipos a un estándar requerido de operación, mediante la aplicación de métodos y técnicas especializadas con el objeto de preservar la continuidad de los procesos productivos y sustentar la rentabilidad operacional.

Rosales (2001) plantea que el mantenimiento es el conjunto de acciones que se aplican a los equipos con el objetivo de detectar, corregir y prever condiciones desfavorable en su funcionamiento, asegurando de esta manera que la calidad de servicio permanezca dentro de los límites establecidos; constituye el instrumento básico de la tecnología para atacar y resolver todos los problemas inherentes a la conservación de los bienes físicos de producción y servicios en nuestra sociedad moderna.

Los autores antes mencionados establecen de manera similar la definición del mantenimiento como el conjunto de acciones que permite conservar o restablecer un sistema de producción, para que puedan cumplir un servicio determinado, tomando en cuenta la efectiva y eficiente utilización de los recursos materiales, económicos, humanos, financieros y de tiempo, para alcanzar los objetivos del mantenimiento.

El mantenimiento nace de la necesidad que tiene un sistema productivo de tener a su propio equipo operando la mayor cantidad de tiempo posible bajo condiciones de operación recomendadas, y que al momento de una falla, puedan ponerse nuevamente en servicio en nuestra sociedad moderna. En concordancia con lo planteando por los autores, citados anteriormente, se

puede inferir que el mantenimiento es la clave para un buen funcionamiento y longevidad de los equipos en el caso de los biodigestor el mismo es clave para mantener la producción de biogás y preservar las condiciones de seguridad necesarias.

De acuerdo con Valera (2006), en el mantenimiento del biodigestor se deben tomar en cuenta dos aspectos importantes: su alimentación y la protección del medio ambiente. Una vez que el biodigestor este instalado, se debe alimentar diariamente y para ello debe tomarse en cuenta el tamaño del biodigestor.

La protección del biodigestor es otro aspecto importante, ya que de ello depende su vida útil, y por lo tanto, un mejor aprovechamiento del mismo. Para protegerlo del sol y la lluvia es importante construir un techo sobre el biodigestor, de modo que la acción de estos no degrade el material del mismo y no afecte su vida útil.

De esta información, concluimos entonces que una alimentación diaria constante nos garantiza una digestión efectiva y por tanto, una mayor producción de gas. Además de la adecuada protección a la abrasión del medio ambiente se puede añadir un mantenimiento anual programado.

2.7.1.3 Vida Util.

Errosa (2004) define la vida útil como el tiempo durante el cual se prevé que la inversión producirá los efectos deseados, sin necesidad de esfuerzos adicionales de capital fijo. Una segunda definición por parte de

Horngre (2004) plantea que la vida útil estimada es la duración que se espera del servicio que da un activo. Esta puede expresarse en años, unidades de producción, kilómetros u otra unidad de medida. Errosa y Horngre plantean desde diferentes puntos de vista la definición de vida útil, la primera abarca el impacto económico que la misma ejerce sobre un proyecto y la segunda solo la presenta como un simple parámetro de medición para el rendimiento de un servicio determinado

En el caso particular de un digestor de cúpula fija según Savran (2005) la vida útil puede variar entre 20 y 25 años. Los biodigestores tradicionales tubulares contrariamente tienen un tiempo de vida útil mucho menor, oscilando este entre 10 y 12 años de acuerdo con información suministrada por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías (2008), debido a que los materiales y su construcción son susceptibles a rupturas o degradación.

Filigrana (2006), comenta que el hermetismo y el aislamiento térmico son características constructivas que aseguran un funcionamiento eficiente de los tanques de biodigestión. Los tanques rígidos se elaboran en concreto reforzado o en lamina metálica y tienen una vida útil de entre 20 y 30 años. En tanto, los tanques flexibles se fabrican con plástico, lonas, u otras fibras sintéticas y solo pueden durar hasta 5 años.

Los autores concuerdan en que la vida útil de los biodigestores depende del material que lo compone y del mantenimiento que se le de al mismo. Además ambos estiman la misma cantidad de años de vida útil para los biodigestores estudiados.

2.7.2 Sistemas mesofilicos y termofilicos.

Según Jördening y Winter (2005), las temperaturas óptimas para el proceso de metanización son las correspondientes al rango de temperaturas mesofilicas (aproximadamente 35°C) y al rango de las temperaturas termofilicas (aproximadamente 55°C). Los reactores diseñados para una operación mesofilica son calentados a 30 o 40 °C. La estabilidad de este proceso es alta. Las variaciones pequeñas de temperatura tienen un efecto pequeño sobre las bacterias mesofilicas.

Las ventajas de los procesos mesofilicos vienen del hecho de que requieren una baja cantidad de calor y producen una alta cantidad de energía. Además, la alta estabilidad de este proceso es alcanzada debido a que una amplia gama de bacterias metano mesofilicas no sufren sensibilidad ante cambios de temperaturas. Cervantes, Pavlostathis, Van Haandel (2006), afirman por otra parte, que las desventajas de este sistema son las siguientes: requiere de tiempos de retención relativamente altos, no es tan eficiente en cuanto a la reducción de sólidos volátiles, además de que no presenta gran eficiencia en la inactividad de los patógenos.

Jördening y Winter (2005), indican que para el rango termofilico se requieren temperaturas entre 50 y 60 °C. De acuerdo con Cervantes, Pavlostathis, Van Haandel (2006), el sistema presenta ciertas ventajas como un tiempo de retención mas corto ya que los microorganismos termofilico tienen un alto metabolismo.

Bajo ciertas condiciones mesofílicas se produce una conversión más rápida a metano del sustrato por lo que el tiempo de residencia se reduce. Por otra parte Cervantes, Pavlostathis, Van Haandel (2006), agregan que este sistema presenta grandes desventajas como: efluente con una baja calidad, requiere un tratamiento muy riguroso para deshidratar el lodo remanente, además es más sensible a los cambios de condiciones de operación y a la presencia de sustancias tóxicas.

Sin embargo, de las ventajas antes mencionadas del sistema mesofílico sobre el termofílico, se deduce que el hecho de que el primero requiera menor cantidad de energía, se ve disminuido si se considera su instalación en el estado Zulia u otras tierras donde las condiciones de temperatura normales alcanzan dichas temperaturas y que con un bajo costo en energía se logra conseguir temperaturas termofílicas.

Además Hernández (1999), reafirma el hecho de que si se considera la producción de gas como símbolo de la eliminación de materia orgánica, puede decirse también que el proceso termofílico es superior, siendo tan efectivo el mismo con retenciones de 7 a 14 días, como el sistema mesofílico con retenciones de 24 a 28 días.

2.8 Evaluación económica

Ramírez (2004) conceptualiza la evaluación económica como el análisis de las acciones propuestas en un estudio de inversión a la luz de un conjunto de criterios con el objetivo de verificar la viabilidad de estas acciones y

comparar los resultados del proyecto con los recursos necesarios para alcanzarlos. Estos criterios están sostenidos en el concepto del valor del dinero en el tiempo y se conocen como métodos complejos de evaluación.

Los objetivos de esta evaluación son ordenar y sistematizar la información de carácter monetario que proporcionan las etapas anteriores en un proyecto, elaborar los cuadros analíticos y datos adicionales para la evaluación del proyecto y evaluar los antecedentes para determinar su rentabilidad.

Según Sapag (2000) la sistematización de la información financiera consiste en identificar y ordenar todas las inversiones relacionadas de alguna forma al proyecto, costo e ingresos que puedan deducirse de estudios previos. Sin embargo y debido a que no se ha proporcionado toda la información necesaria para la evaluación, en esta etapa deben definirse todos aquellos elementos que debe suministrar a evaluación económica. El caso clásico es el cálculo del monto a invertirse en capital de trabajo o el valor de desecho del proyecto.

Se han desarrollado muchos métodos para incluir el riesgo e incertidumbre de la ocurrencia de los beneficios esperados del proyecto. Algunos incorporan directamente el efecto del riesgo en los datos del proyecto, mientras otros determinan la variabilidad máxima que podrían experimentar algunas de las variables que hacen del proyecto rentable. Evaluar un proyecto a un plazo fijo puede llevar a conclusiones erradas respecto del mismo.

Muchas veces se adopta como norma que un proyecto debe evaluarse a 10 años. Sin embargo, es posible que la rentabilidad de un proyecto sea mayor si su puesta en marcha se posterga algunos periodos. Sapag (2000) indica que “no todos los proyectos rentables deben implementarse de inmediato, aun cuando existan los recursos necesarios, si se maximiza su rentabilidad postergando su iniciación”.

Siguiendo el mismo raciocinio anterior, puede concluirse que un proyecto es más rentable si se abandona antes de la fecha prevista en la evaluación. Es decir, al igual debe analizarse la postergación de la puesta en marcha, así también debe considerarse el abandono antes de la finalización prevista.

Ramírez (2004), expone que a la luz de un conjunto de criterios se puede verificar la viabilidad y los resultados de un proyecto, este punto de vista es muy ambiguo en contraste con lo que formula Sapag (2000). La evaluación económica nos muestra que el panorama para la realización de un proyecto no es estático, conforme cambien parámetros en el ambiente donde se desarrolla el mismo, puede o no ser factible su ejecución.

Los actuales métodos de evaluación toman en cuenta el valor del dinero a través del tiempo, como son la tasa interna de rendimiento y el valor presente neto; se anotan sus limitaciones de aplicación y son comparadas con métodos contables de evaluación, y en ambos se muestra su aplicación práctica. Esta parte es muy importante, pues es la que al final permite decidir la implantación del proyecto.

Normalmente no se encuentran problemas en relación con el mercado o la tecnología disponible a emplear en la fabricación del producto; por tanto, la decisión de inversión casi siempre recae en la evaluación económica, hay radica su importancia. Por eso, los métodos y los conceptos aplicados deben ser claros y convincentes para el inversionista. La evaluación económica es la parte final de toda la secuencia de análisis de factibilidad de un proyecto. Si no han existido contratiempos, se sabrá hasta este punto que existe un mercado potencial atractivo; se habrán determinado un lugar optimo.

Para la localización del proyecto y el tamaño mas adecuado para este ultimo, de acuerdo con las restricciones del medio; se conocerá y dominara el proceso de producción, así como todos los costos en que se incurrirá en la etapa productiva, además de que se habrá calculado la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto. Sin embargo, a pesar de conocer incluso las utilidades del proyecto durante los primeros cinco años de operación aun no se puede demostrar con esto que la inversión propuesta será económicamente factible. Cualquier proyecto de ingeniería requiere un estudio no solo de la ejecución del mismo en el aspecto físico, sino también en el económico.

2.8.1 Costos de Operación

Según Jimenez (2003), el costo de operación de un proceso puede evaluarse por unidad de tiempo o por unidad de producción. Este concepto incluye los costos asociados a la inversión, los costos variables, y los costos

de mano de obra. Es difícil predecir con detalle en un nivel preliminar cuanto es el monto pero puede estimarse con una fracción de la inversión. De acuerdo con lo expresado por Ballou (2004), los costos de operación son aquellos que recurren periódicamente o aquellos que fluctúan en forma directa con la variación de los niveles de actividad, salario, gastos de almacenamiento y administrativos.

En algunos casos otros gastos de fabricación o indirectos son ejemplos de costos de operación. Ambos autores coinciden en que estos costos son difíciles de estimar por lo que es importante vigilar de cerca este costo debido a que las variaciones en el mismo podrían afectar la rentabilidad del proyecto

2.8.1.1 Costos de mano de obra.

Según Horngren, Datar y Foster (2007), Los costos de mano de obra incluyen la remuneración de toda la mano de obra de fabricación que puede rastrearse al objeto del costo en forma económicamente factible. Este término, de acuerdo con Cuevas (2001), se reserva para aquellos costos laborales que pueden ser físicamente asignados a la producción de bienes y servicios. Gómez (2005), nos indica que el costo de mano de obra directa, es el pago que se puede asignar en forma directa al producto, tal como el salario de los obreros que intervienen directamente en la producción.

Las definiciones aportadas por los autores citados afirman de manera común que el costo de mano de obra esta asociado al objeto de estudio y que en general esta relacionado con el recurso humano necesario para

producirlo. Para la implementación de la alternativa tecnológica es necesario poder contar con estos costos debido a que en la instalación, construcción y mantenimiento son necesarios, ya que sin la mano de obra ninguna de estas fases se podría ejecutar. El recurso humano para el mantenimiento es necesario debido a que este alinea el proceso en su totalidad

2.8.1.2 Costos de fabricación indirectos.

Mata (2007) define los costos de fabricación indirectos son aquellos en los cuales es necesario incurrir pero que no son fácilmente cuantificables para una unidad de obra determinada, tales como gastos de administración, dirección técnica, intereses, impuestos, utilidad, etc. Estos costos indirectos se agregan a los costos directos para poder obtener el costo total de la obra.

Para Gómez Rondon (2000), los costos de fabricación indirectos constituyen el elemento del costo de producción más complejo que interviene en el proceso de manufactura, y estarán formado por todas aquellas partidas de costos, que resultan difíciles o costosas de determinar y valorar en cada una de las unidades de producción que se elaboran. En ellos se contemplan por ejemplo: los alquileres, depreciaciones, seguros, luz y fuerza eléctrica, teléfonos, mantenimiento, reparaciones, etc.; siempre y cuando sean imputables a la factoría.

Los autores comulgan en que los costos indirectos de fabricación son todos aquellos que no sean directamente imputables a unidades concretas, sino al conjunto o partes del proceso y que resulten de difícil asignación a

etapas del proceso determinado. Los costos de fabricación serán los necesarios para elaborar el biodigestor, donde estarán contemplados todos los aditamentos enumerados por los autores.

2.8.2 Valor presente neto

Baca (2007) indica que es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. De acuerdo con Macchia (2005), el método del valor presente neto es uno de los fundamentales para la evaluación de proyectos de inversión, esta basado en el descuento de los flujos de fondos del proyecto en estudio, además respeta el valor cronológico del dinero a lo largo del plazo o vida útil del proyecto.

Según Baca (2007) cuando se hacen cálculos de pasar en forma equivalente, dinero del presente al futuro, se utiliza una serie i de interés o de crecimiento del dinero; pero cuando se quiere pasar cantidades futuras al presente, como en este caso, se usa una tasa de descuento, llamada así por que descuenta el valor del dinero en el futuro a su equivalente en el presente, y a los flujo llevados al tiempo cero se les conoce como flujos descontados.

Sumar los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todos los desembolsos necesarios para producir esas ganancias, en término de su valor equivalente en este momento o tiempo cero. Es claro que para aceptar un proyecto las ganancias deberán ser mayores que los desembolsos, lo cual dará por resultado un VPN mayor que cero.

Si la tasa de descuento costo capital aplicada en el calculo el VPN fuera de la tasa inflacionaria promedio pronosticada para los próximos cinco años, las ganancias de la empresa solo servirían para mantener el valor adquisitivo real que la empresa tenia en el año cero siempre y cuando se inviertan todas las ganancias.

Con un VPN = 0 no se aumenta el patrimonio de la empresa durante el horizonte de planeación estudiado, si el costo de capital o TMAR es igual al promedio de la inflación de ese periodo. Pero aunque el VPN = 0 habrá un aumento en el patrimonio de la empresa si el TMAR aplicado para calcularlo fuera superior a la tasa inflacionaria promedio de ese periodo. Según Baca (2007), si el resultado es VPN mayor a cero, sin importar cuanto supere a cero ese valor, esto solo implica una ganancia extra después de ganar la TMAR aplicada a lo largo del periodo considerado.

Macchia (2005) además plantea que en general se emplean para el calculo tablas financieras, lo que conlleva a que este no sea una operación complicada, sobre todo con el uso de las nuevas tecnologías de computación, la expresión que nos permite conocer el valor presente neto se indica a continuación:

$$VAN = \sum_{n=0}^i an(1+i)^{-n} = \text{valor (numero)} \quad (9)$$

an= flujos de fondos netos del proyecto, a través del tiempo.

n=tiempo

i= tasa de interés

La descripción y método para el cálculo de este factor fue planteado de la misma manera por los dos autores. Como conclusiones generales acerca del uso del VPN como método de análisis se puede decir lo siguiente: se interpreta fácilmente su resultado en términos monetarios, supone una reinversión total de todas las ganancias anuales, lo cual no sucede en la mayoría de las empresas. Los criterios de evaluación son: si VPN es mayor o igual a cero, acéptese la inversión; si el VPN es menor a cero rechace.

2.8.3 Tasa mínima de retorno.

Para Baca (2007) "Es la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero. Es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial". Esta definición es compartida Boulanger, Espinoza y Fonseca (2007) que plantean que es la tasa que descuenta los flujos asociados a un proyecto hasta un valor exactamente de cero.

Según Boulanger, Espinoza y Fonseca (2007) la tasa interna de retorno se centra en la tasa de rendimiento de un proyecto. Cuando el criterio del VAN y la tasa interna de retorno entran en conflicto, la empresa debe maximizar el valor del primero, y no su tasa de rendimiento. Se le llama tasa interna de rendimiento por que supone que el dinero que se gana año con año se reinvierte en si totalidad. Baca (2007) asegura que si existe una tasa interna de rendimiento se puede preguntar si también existe una tasa externa de rendimiento. La respuesta es que si existe y esto se debe al falso supuesto, que todas las ganancias se reinvierten.

Esto no es posible, pues hay un factor limitante físico del tamaño de la empresa. La reinversión total implícitamente supondría un incremento tanto de la producción como físico de la empresa. Precisamente, cuando una empresa ha alcanzado la saturación física de su espacio disponible, o cuando sus equipos trabajan toda su capacidad, la empresa ya no puede tener reinversión interna y empieza a invertir en alternativas externas. Estas pueden ser la adquisición de valores o acciones de otras empresas, la creación de otras empresas o sucursales, la adquisición de bienes raíces o cualquier otro tipo de inversión externa.

En la operación práctica de una empresa puede darse el caso de que exista una pérdida en determinado periodo. En esta situación se recomienda no usar el TIR como método de evaluación y en cambio usar el VPN que no presenta ninguna desventaja. Este tipo de conocimientos y su aplicación los adquiere el evaluador por medio de la experiencia y conocimientos anexos de la evaluación de otros proyectos.

2.8.4. Análisis de sensibilidad

Wooldridge (2001) define el análisis de sensibilidad como el proceso de verificar si los efectos estimados y la significancia estadísticas de las variables explicativas claves son sensibles a la inclusión de otras variables explicativas, otra forma funcional, a la eliminación de posibles observaciones aberrantes o a métodos diferentes de estimación. De igual manera Vidales Rubí (2003) afirma que este análisis consiste en una serie de simulaciones

de escenarios mediante los cuales se busca observar los cambios en los resultados del modelo, obtenidos con base en variaciones en sus principales variables.

Gitman y Gitman (2003) exponen que el análisis de sensibilidad utiliza varias estimaciones de rendimiento posible para obtener una idea de variabilidad entre resultados. El método más común implica hacer estimaciones pesimistas, más probables y optimistas de los rendimientos asociados a un activo dado

Según Degarmo (2004) el manejo de sensibilidad en la mayoría de los proyectos de ingeniería resulta útil determinar que tan susceptible a variaciones en los factores que entran en juego para así conocer la rentabilidad de un proyecto.

De acuerdo con Martínez (2001) aunque se trata de un análisis que puede llegar a ser muy complejo, incluso desde el punto de vista matemático, lo más importante es tomar en cuenta que si la mejor opción en sus peores condiciones sigue apareciendo mejor que la siguiente opción en sus mejores condiciones no se requieren estudios adicionales que siguieran comparándolas. Los autores coinciden en que el análisis de sensibilidad plantea estimaciones para medir el impacto económico sobre el proyecto ante la variación de costos fundamentales para el desarrollo del mismo.

En general sensibilidad significa la magnitud relativa del cambio en la medición de la ventaja es decir el TIR y el VPN que ocasiona uno o más cambios en los valores estimados de los factores en el estudio. También se

define de manera mas especifica como la magnitud relativa del cambio en uno o más factores que revertirá la decisión entre las alternativas de un proyecto o decisión acerca de la aceptación económica de un proyecto.

2.8.5 Simulación de Montecarlo.

Parra Guerrero (2005) define el método (simulación) de Montecarlo como una simulación con técnicas de muestreo, es decir, que en vez de obtener muestras de una población real, se obtienen de un duplicado teórico de esta, al que se le asignan los valores de acuerdo con la probabilidad de los valores reales de la variable.

De acuerdo con Walley, Haycox y Boland (2005) el proceso de realización de una simulación de Montecarlo consiste en la simulación repetida del modelo, extrayendo cada vez un grupo distinto de valores de la distribución de muestras de los parámetros del modelo, cuyo resultado es un conjunto de posibles resultados (efectos). Esto permite generar una distribución de costos y resultados esperados, que refleja la incertidumbre de las estimaciones de los parámetros. Para realizar simulaciones de Monte Carlo debe definirse con antelación la distribución de las muestras de los parámetros del modelo (recursos necesarios).

Otra conceptualización de modelo de simulación Montecarlo, desde un punto de vista económico, es la generada por Sapag Chain (2007) que define a la misma como los posibles valores que puede tomar el VAN de un proyecto, mediante la asignación aleatoria de un valor a cada variable

pertinente del flujo de caja. La selección de valores aleatorios otorga la posibilidad de que al aplicarlo repetidas veces a las variables relevantes, se obtengan suficientes resultados de prueba para que se aproxime a la forma de distribución estimada.

Parra Guerrero (2005) y Walley, Haycox y Boland (2005) presentan una definición donde resalta el empleo de técnicas de muestreo y simulación de escenarios, Sapag (2007) se aboca netamente al punto de vista económico.

3. Definición conceptual y operacional de las categorías

En la presente investigación las categorías de análisis fueron cuatro: Volumen de producción de gas a partir de aguas residuales, alternativas tecnológicas para el proceso de digestión anaeróbica, aspectos técnicos del proceso, aspectos económicos del proceso. La conceptualización de las categorías se refiere a como desea el investigador que sean interpretadas; y la operacionalización de las mismas. Se define directamente como se medirá en las variables en términos de las sub categorías y elementos de análisis que la conforman.

3.1 Categoría: Volumen de producción de gas a partir de aguas residuales

Definición conceptual: Según lo expresado por Lin y Lee (2007) la producción de gas es uno de los parámetros mas importantes para medir el desempeño de un digestor. Usualmente la producción de gas alcanza un

rango 13 a 18 ft³ por kilogramo de sólidos volátiles.

La misma se puede medir mediante diferentes ecuaciones empíricas. De manera congruente con esta afirmación, Spellman (2008) plantea que la producción de gas puede calcularse mediante el producto del porcentaje de reducción de materia volátil, la cantidad de materia volátil y la tasa de producción.

Definición operacional: El volumen de producción de gas es aquel que puede calcular sea partir de modelos matemáticos se simula el proceso de metanogénesis y de acuerdo a la misma se puede tener una cifra referencial de la producción de metano dentro de un biodigestor.

3.2 Categoría: Alternativas tecnológicas para el proceso de digestión anaeróbica.

Definición conceptual: Quiroz, Arce y Holle (2006), plantean que el termino “alternativa tecnológica” surgió a raíz de que el termino paquete tecnológico implicaba contradicciones con la forma real en que el individuo adopta y adapta la información a su esquema de producción integrado, frecuente en la experiencia en procesos de investigación y transferencia tecnológica donde cada evaluador desarma los paquetes e integra en su propio sistema las partes que cree necesitar. De acuerdo con Erossa Martin (2004) las alternativas tecnológicas se derivan del empleo de diferentes técnicas en la fabricación para los mismos productos por diferencias de las características de estos productos o por la combinación de ambos factores.

Definición operacional: Las alternativas tecnológicas para el proceso de digestión anaeróbica son aquellas que hacen posible producir gas a partir de aguas residuales y representan una forma alterna de producción del mismo. Se definen mediante el estudio de las diferentes tecnologías conocidas y de cómo los procesos asociados a la digestión (hidrólisis, metanogenesis, etc) se desarrollan a través de ellas.

3.3 Categoría: Aspectos técnicos del proceso.

Definición conceptual: De acuerdo con Tamayo (2004) un buen investigador planea cuidadosamente los aspectos técnicos (llamados también científicos técnicos) para llevar a cabo su investigación, y estos se definen como aquellos que determinan el que y el como de algo, son parámetros conceptuales. Avila y Lugo (2004) afirman que con la evaluación de los aspectos técnicos se busca contemplar las diversas opciones técnicas que existen para el desarrollo del proyecto, a fin de seleccionar la que garantice tecnológica y económicamente su competitividad.

Muñoz Negron (2009) expone que la decisión de la selección de la tecnología a tomar para el proceso dependerá de la estrategia a largo plazo, así como de los aspectos técnicos, algunos de los cuales pueden estar en estrecha relación con el entorno mismo en el que se ubica el proceso.

Definición operacional: Los aspectos técnicos son todos aquellos lineamientos y procedimientos estandarizados para la correcta utilización de una planta de biogás.

3.4 Aspectos económicos del proceso

Definición conceptual: El Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (2006) expresa que el análisis económico del proyecto debe ser esencialmente cuantitativo, partiendo de los elementos que aportan el análisis técnico y financiero.

Avila y Lugo (2004) plantea que el estudio de los aspectos financiero-económicos tiene como propósito diseñar una estrategia que permita que al proyecto allegar los recursos necesarios para su ejecución, y generar la suficiente liquidez y solvencia para sus operaciones productivas y comerciales. Aporta también información necesaria para evaluar el proyecto en su conjunto y estimar rentabilidad.

Definición operacional: Los aspectos económicos del proceso son todos aquellos relacionado con el estudio de la relevancia de variables difícilmente medibles para determinar la factibilidad y rentabilidad de la selección de la alternativa tecnológica de producción de gas a partir de aguas residuales y se miden calculando el riesgo y los costos asociados a la propuesta.

El cuadro donde se establecen las categorías, sub categorías y elementos de análisis es el que aparece a continuación. Especificando los elementos esenciales para la creación de matrices de análisis paso siguiente dentro de lo estipulado para culminar el proceso de investigación de este tópico

Cuadro 4: Operacionalización de las variables

OBJETIVOS	CATEGORIA	SUB CATEGORIA	ELEMENTO DE ANALISIS
Determinar el volumen de la producción de gas con aguas residuales	Volumen de producción de gas a partir de aguas residuales	Factores que influyen en el volumen de biogás generado Calculo de caudal de un biodigestor	Influencia de la composición de los residuos Caudal de biogás recuperable Método basado en el tiempo de retención Método experimental Método basado en el factor de carga
Analizar las alternativas tecnológicas para la producción de gas a partir de aguas residuales	Las alternativas tecnológicas	Digestor Único Digestor de dos etapas	Preparación y acondicionamiento de lodos Hidrólisis Metanización Almacenamiento de digesto y el gas Deshidratación del compost
Describir los aspectos técnicos de las alternativas a seleccionar	Aspectos técnicos del proceso	Operación	Mano de obra Mantenimiento Vida útil
		Sistema en el cual se desarrolla	Mesofílico Termofílico
Determinar los aspectos económicos de la alternativa seleccionada	Aspectos económicos	Costos	Costo de instalación de construcción Costos de mantenimiento
		Riesgo	Análisis de sensibilidad Simulación de Montecarlo
Seleccionar la mejor alternativa para la producción de gas a partir de aguas residuales	Seleccionar la mejor alternativa tecnológica para la producción de gas	Se desarrollara con el cumplimiento de los objetivos anteriores	

Fuente: Valenzuela (2010)