



Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Tucumán

**DISEÑO PRELIMINAR DE UN SISTEMA DE
TRATAMIENTO ANAERÓBICO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE DESECHOS
PORCINOS**

**TRABAJO INTEGRADOR PRESENTADO PARA OBTENER EL TÍTULO ACADÉMICO DE
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA BIOENERGÉTICA**

Alumno: Ing. José Ulises Diez Gómez

Director: Magister. Ing. Eugenio Quaia

Año 2017

ÍNDICE

Agradecimientos.....	4
Introducción.....	5
Alcance.....	9
Objetivos específicos:.....	9
Resultados esperados:.....	9
Microbiología de la digestión anaeróbica.....	10
Hidrólisis y fermentación.....	10
Acetogénesis y deshidrogenación.....	11
Metanogénesis.....	11
Fundamentos para el desarrollo del modelo.....	13
Estequiometría de la digestión anaeróbica.....	14
Cinética del crecimiento bacteriano.....	16
Factores ambientales a controlar en la digestión anaeróbica.....	18
Tipo de sustrato y contenido de nutrientes.....	18
Características de los sustratos para digestión anaeróbica:.....	26
Características de los residuos porcinos.....	28
El biogás.....	30
Acondicionamiento del biogás.....	32
Remoción de CO ₂ :.....	32
Remoción de agua.....	32
Remoción del H ₂ S.....	32
Remoción del amoníaco.....	33
Usos del biogás:.....	33
Generación de energía eléctrica.....	33
Caso de estudio.....	35
Generación de purines:.....	38

Consideraciones de diseño. Descripción y dimensionado del sistema.	40
Dimensionado del sistema.....	43
Resumen de las variables de diseño	46
Descripción del sistema.....	49
Conclusiones	55
Referencias	57

A G R A D E C I M I E N T O S

A Dios que me ilumina y me otorga la capacidad de ser una persona pensante y poder seguir aprendiendo todos los días de mi vida cosas nuevas que me quitan la ignorancia innata y me permite aplicarla cotidianamente para ser una persona de bien y un mejor profesional.

A mi familia que me acompaña en el camino de la vida y a quienes le debo el esfuerzo por el cual les quité tantas horas de compañía y de compartir momentos invaluable. A mi esposa e hija les agradezco la tolerancia y la comprensión.

A mi madre que me hizo la persona que soy y me inculcó la importancia del estudio.

A ellos mi gratitud.

INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables (solar, eólica, biocombustibles líquidos, biogás, etc.) se está expandiendo alrededor del mundo debido a varias razones, algunas relacionadas al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y otras relacionadas al cuidado del medio ambiente y el control del calentamiento global.

El cambio climático global es una de las amenazas con las que se enfrenta hoy la humanidad. A partir de la revolución industrial, las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera se han incrementado rápidamente.

Las actividades agrícolas y ganaderas contribuyen directamente a la emisión de gases de efecto invernadero, la mayor parte de las mismas es ocasionada por la ganadería que, después del sector energético, es la actividad más comprometida; aportando el 35% de las emisiones totales del país (Berra G., Finster L., 2002).

La ganadería contribuye a la emisión de metano, por la fermentación entérica y las excreciones de los animales. Estas últimas también son fuente de óxido nitroso.

En los animales no rumiantes (porcinos, equinos, mulares, asnales) la fermentación microbiana ocurre en el intestino grueso, que tiene una capacidad de producción de metano mucho menor que el rumen.

El manejo del estiércol del ganado produce emisiones de metano y de óxido nitroso.

El metano se produce mediante la descomposición anaeróbica del estiércol, mientras que el óxido nitroso se forma como parte del ciclo del nitrógeno, a través de la desnitrificación del nitrógeno orgánico presente en el estiércol y en la orina del ganado.

Cuando el estiércol se dispone en sistemas que promueven las condiciones anaeróbicas (por ejemplo, en forma líquida en lagunas, tanques o fosas), la descomposición de la materia tiende a producir metano. Cuando el estiércol se maneja en forma sólida (por ejemplo, almacenamiento en pilas) o queda depositado sobre las pasturas y los campos naturales, tiende a descomponerse aeróbicamente y produce muy poco o nada de metano.

Los porcinos son los principales responsables de las emisiones de metano, debido a que son la especie ganadera que se mantiene con mayor grado de confinamiento en el país, manejándose sus efluentes en forma líquida. (Berra G., Finster L., 2002).

El tratamiento de los desechos porcinos reviste cada día de una mayor importancia debido a la dimensión del problema que representa la degradación de los recursos agua, suelo y aire,

la proliferación de plagas sinantrópicas como moscas, roedores, ente otras y la generación de olores indeseables producidos cuando no poseen una correcta disposición.

Entre algunos de los factores de contaminación ambiental podemos mencionar:

- Eutrofización de aguas superficiales.
- Problemas localizados de malos olores y polvos lo que puede generar conflictos sociales.
- Contaminación por nitratos de aguas subterráneas.
- Acidificación de aguas y suelos producida por amoníaco.
- Dispersión de metales pesados (Cu, Zn) en agua y suelo.
- Vuelco de materia orgánica no estabilizada con alto contenido de bacterias fecales, parásitos, larvas.
- Aparición de insectos y roedores.
- Emisiones descontroladas de gases efecto invernadero (GEI) a la atmósfera.

En el caso de los sistemas productivos intensivos en corral se presenta la ventaja que las emisiones de desecho por deyecciones animales se encuentran controladas y presentan mayor facilidad su recolección y tratamiento y disposición final.

Hoy en día se estima que el país posee 3.437.000 cabezas (MAGyP con datos de SENASA, 2012) y la cantidad de madres que se consideran en estrato comercial 345.000. En cuanto a la distribución del stock nacional por provincia, existe una marcada concentración en las provincias de la pampa húmeda, donde Buenos Aires posee el 26,77 %, Córdoba el 24,45 % y Santa Fe el 20,42 %. El resto del país tiene el 29 % del stock, destacándose por su importancia Salta, Chaco, Entre Ríos, Formosa, La Pampa, Santiago del Estero y San Luis) (Vicari P., 2012).

Estimación de la producción total nacional de efluentes porcinos en Argentina:

- Cabezas totales: 3.437.000 (SENASA, 2011)
- Madres que se consideran en estrato comercial: 345.000
- % de madres bajo sistemas de producción intensivos: 39 %
- Madres bajo sistemas de producción intensivos: 134.550
- % de madres sobre el total de animales en confinamiento: 10 %
- Animales en confinamiento: 1.345.500
- Producción promedio de efluentes por animal por día: 20lt
- Producción total nacional de efluentes por día: 26.910.000 lt

Teniendo en cuenta que la densidad del efluente, según el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (2005) es en promedio igual a 1, se puede estimar la producción diaria de efluentes en nuestro país, en alrededor de 26.910 tn. Este dato nos muestra la magnitud del problema de los efluentes generados en nuestro país. (Vicari P., 2012).

El tratamiento por digestión anaeróbica reviste una marcada importancia debido a que permite obtener biogás como producto del proceso.

Este hecho tiene dos impactos positivos. El primero relacionado a la reducción de impacto ambiental por control de emisiones y el segundo relacionado con la obtención de un combustible gaseoso alternativo a los combustibles fósiles.

Con respecto a los sistemas de producción en nuestro país, se estima que un 39 % se encuentran bajo confinamiento con una productividad promedio por madre/año de 20 animales terminados. (Vicari P., 2012)

La producción porcina en Tucumán es desarrollada en casi todos los departamentos de la Provincia, sin embargo, los que muestran un mayor avance tecnológico-empresarial se localizan en los departamentos de: Burreyacú, Leales, Trancas, Cruz Alta, donde se concentra el 65% de la actividad porcina y la mayor producción granífera, principal insumo (alimento) para el desarrollo de la actividad.

El stock de cerdos en la Provincia para el año 2013, en base a información del SENASA asciende a 24.047 cabezas distribuidos entre padrillos, cerdas, lechones, capones y cachorros que se reparten en 178 unidades productivas.

El caso de estudio es una granja de cerdos denominada “Establecimiento Ayala” ubicado en la localidad de La Ramada de Abajo en el departamento Burreyacú.

Esta explotación porcina intensiva posee un sistema de producción sobre pisos con desnivel a canales de recolección y *sobre fosa*, es decir, los animales están alojados en corrales sobre *slats* de hormigón por los que caen las deyecciones, el agua de limpieza y el desecho, tanto de alimentos como de agua de bebida de los animales, de manera que se produce una gran cantidad de estiércol denominado **purín** de consistencia casi líquida pero con una elevada carga en materia orgánica, nitrógeno y fósforo principalmente.

El propósito del estudio es realizar el análisis de factibilidad técnica y diseño de un sistema de digestión anaeróbica para producir biogás por medio de un biodigestor tipo tanque agitado, el cuál podrá ser empleado en el emprendimiento para generar energía térmica reemplazando parcial o totalmente los combustibles fósiles que puedan estar empleándose actualmente. Todo ello dependerá del potencial de generación relacionado a la cantidad y las

características del purín producido y de la posibilidad de captar y centralizar el tratamiento de la mayor cantidad posible de desechos para maximizar los beneficios.

Con la implementación del proyecto de producción de biogás por medio de la digestión anaeróbica se pretende atacar dos problemas específicos. El primero relacionado al impacto ambiental generado por las explotaciones porcinas intensivas y el segundo como alternativa de generación de energías alternativas provenientes de fuentes renovables.

El diseño se basará en el concepto de la mínima utilización de energía para el mantenimiento del sistema y maximizar el beneficio de la generación energética a partir de los desechos porcinos de la granja.

A L C A N C E

El alcance del proyecto comprende la captación de una parte del purín del emprendimiento de la granja de cerdos, desde la salida del corral, la conducción al sistema de tratamiento, la generación de biogás y su correspondiente acondicionamiento para uso, recolección del efluente resultantes del proceso y destino de los mismos en el establecimiento.

Objetivos específicos:

Realizar la caracterización de los purines generados determinando las principales variables físicas, químicas y biológicas para definir su tratabilidad anaeróbica.

Determinar la escala de trabajo y diseño del sistema.

Diseñar el sistema de tratamiento de purín de cerdo por digestión anaeróbica determinando la ubicación más conveniente del sistema, diseño de flow sheet, con su correspondiente dimensionado de cañerías, tanques, reactor, bombas y demás equipos.

Captación del biogás producido en el proceso y acondicionándolo para su uso.

Captar y dar disposición en campo del efluente generado.

Resultados esperados:

Dimensionado del sistema de biodigestión anaeróbica en función de la escala elegida.

La implementación de este proyecto es importante para obtener valores de rendimientos en la reducción de la DQO del desecho generado, realizar ajustes en variables como la utilización de agua para lograr las condiciones óptimas para una transformación eficiente con la consecuente generación de biogás.

MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica de la materia orgánica es la etapa del ciclo del carbono que se produce por la acción simbiótica de un consorcio de microorganismos en ausencia de oxígeno (Gropelli E., Giampaoli O.; 2012). Esta materia orgánica generalmente es compleja y está compuesta por una mezcla de hidratos de carbono, ácidos grasos, proteínas, polímeros naturales como la celulosa, etc.

Como consecuencia de la respiración celular en condiciones anaeróbicas las bacterias producen metabolitos extracelulares dentro de los cuales los más importantes son el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y en menor medida sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2) y agua (H_2O).

Los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica actúan en diferentes etapas o niveles dentro de los cuáles los productos metabólicos de un determinado grupo sirven como alimento o sustrato de otros grupos lográndose así una acción simbiótica.

Si bien el proceso de digestión anaeróbica es complejo desde el punto de vista biológico, podemos dividirlo en tres etapas principales para su comprensión.

Hidrólisis y fermentación

En esta etapa las macromoléculas o moléculas complejas (proteínas, lípidos, carbohidratos) son hidrolizadas en condiciones anaeróbicas por bacterias hidrolíticas por medio de enzimas extracelulares (lipasas, proteasas, amilasas, celulasas, etc) adheridas a su pared celular o liberadas al medio acuoso. Estas enzimas reducen las moléculas complejas a otras más simples que son asimiladas más fácilmente por los microorganismos que intervienen en las siguientes etapas.

Los productos formados en esta etapa son monómeros o moléculas más sencillas como glucosa, aminoácidos, péptidos, galactosa, polioles, glicerol, fenoles, ácidos grasos de cadenas largas, entre otros, que a su vez experimentan una fermentación ácida produciendo butirato, propionato, acetato y en menor medida CO_2 , este último entrará a la etapa de generación de CH_4 por bacterias hidrogenofílicas.

El rango de pH óptimo para esta etapa es de 5,5 a 6,5.

Acetogénesis y deshidrogenación

En esta etapa actúan bacterias acetogénicas denominadas *sintróficas obligadas* debido a que necesitan la existencia de las bacterias metanogénicas para que consuman el hidrógeno producto de su metabolismo para que este siga funcionando.

Estas bacterias acetogénicas transforman los productos de la etapa anterior principalmente en ácido acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), H_2 y CO_2 .

De no existir las bacterias metanogénicas la producción de CH_3COOH se inhibe y por lo tanto la producción de CH_4 . Esto muestra la dependencia de la existencia de los distintos consorcios de microorganismos.

Los ácidos orgánicos de cadenas cortas producidos por las primeras etapas de la digestión son los compuestos de mayor importancia y son a partir de los cuales las bacterias metanogénicas producen la mayor cantidad de CH_4 mediante fermentación. De estos el más importante es el CH_3COOH a partir del cual se transforma a CH_4 aproximadamente el 70% de la DQO inicial, el segundo en importancia es el propiónico a partir del cual se forma aproximadamente el 13% en CH_4 . Los otros intermedios son de menor importancia.

El CH_3COOH se produce por la fermentación de proteínas, hidratos de carbono y ácidos grasos, por eso es uno de los más abundantes dado que la mayoría de los sustratos a digerir contienen estos tres componentes en distintas proporciones dependiendo de la fuente de la cual provengan, mientras que el $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ se forma principalmente a partir de la fermentación de hidratos de carbono y proteínas (McCarty; 1964).

Metanogénesis

En esta etapa actúan bacterias anaeróbicas estrictas, denominadas metanogénicas, que desde el punto de vista metabólico son las únicas capaces de producir CH_4 metabolizando los productos generados en las etapas anteriores. Estas bacterias son de crecimiento muy lento y son las que limitan el proceso de estabilización y producción de CH_4 . Presentan una alta sensibilidad a la presencia de oxígeno aún en pequeñas concentraciones.(McCarty; 1964).

El CH_4 puede producirse por dos grupos de bacterias principales; las bacterias metanogénicas acetoclásticas o acetotróficas responsables de la producción de aproximadamente el 70-72% del CH_4 total producido a partir de CH_3COOH y las bacterias

metanogénicas hidrogenofílicas o hidrogenotróficas que producen el 28-30% del CH₄ usando el H₂ producido por las bacterias acetogénicas para reducir el CO₂ (generación de CH₄ por vía reductiva de CO₂) (Parra Huertas, 2015).

El rango óptimo de pH para estas bacterias es de 6,7-7,3. En la práctica un biodigestor puede trabajar en un rango de pH entre 6-8 sin que la inhibición produzca problemas significativos (Gropelli E., Giampaoli O.; 2012).

El diseño del proceso y sistema de tratamiento deberá considerar variables que favorezcan esta etapa del ciclo, es decir, que al ser bacterias de crecimiento lento deberá seleccionarse un tiempo de retención celular adecuado que a su vez está relacionado con la temperatura ambiente donde se implemente el sistema de tratamiento. Estos valores de tiempo de retención celular se encuentran tabulados.

En el figura 1 se muestran esquemáticamente las distintas etapas de la digestión anaeróbica donde se indican la importancia relativa de cada una de ellas expresando los porcentajes estimados tanto de degradación de materia orgánica, los aportes de productos intermedios y las contribuciones en la formación de CH₄ como así también los rangos de pH óptimos de cada etapa de acuerdo a lo descrito precedentemente.

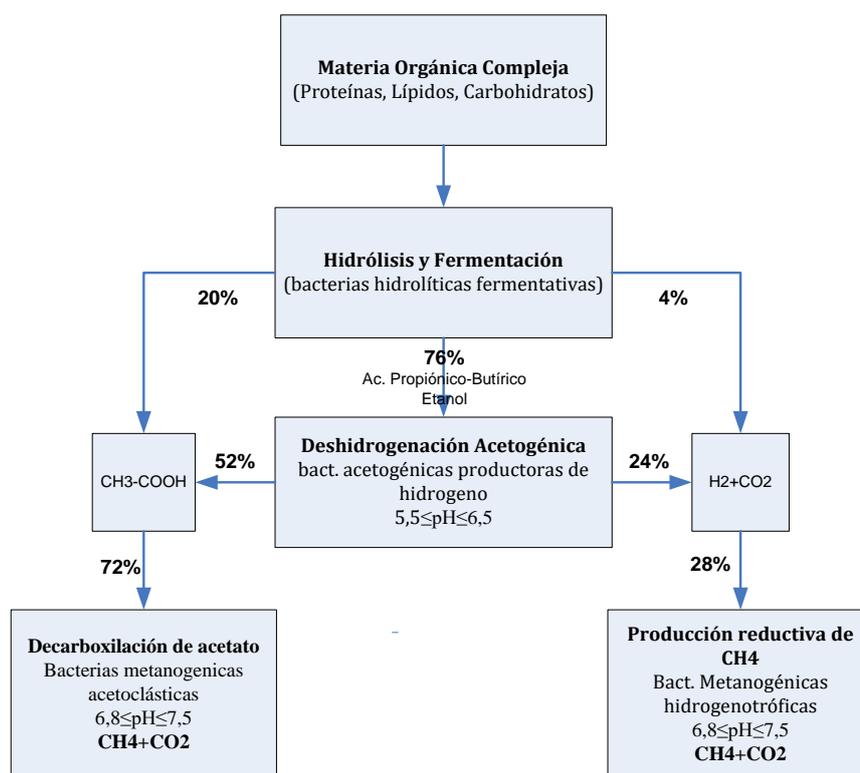


Figura 1. Etapas principales de la digestión anaeróbica (Gropelli E., Giampaoli O.; 2012).

Fundamentos para el desarrollo del modelo

En la digestión anaeróbica de la materia orgánica, generalmente compleja, el sustrato orgánico es transformado en CH_4 y CO_2 con poca liberación de energía, la que es aprovechada por las bacterias metanogénicas para su crecimiento celular. Este crecimiento es muy lento y solamente una pequeña porción del sustrato se transforma en nuevas células. La mayor porción del sustrato orgánico se degrada para producir CH_4 , constituyendo la verdadera estabilización de la materia orgánica, no así la conversión a biomasa bacteriana. El CH_4 producido es insoluble y se desprende de la masa en tratamiento.

Esta característica de baja velocidad de crecimiento bacteriano constituye la etapa limitante de la estabilización de la materia orgánica por digestión anaeróbica ya que sin la existencia de las bacterias metanogénicas no podría llevarse a cabo.

Alrededor del 80 al 90% de la materia orgánica biodegradable puede ser estabilizada y convertida en CH_4 bajo determinadas condiciones (McCarty, 1964).

El modelado de los procesos de digestión anaeróbica se realiza a partir de la etapa metanogénica.

Las etapas de hidrólisis y fermentación no son tenidas en cuenta puesto que las velocidades de estos procesos son muchos mayores a los de la etapa metanogénica y por lo tanto pueden considerarse en estado estacionario desde el punto de vistas de la cinética de la fase biológica.

Bajo este concepto la cinética limitante es la de la etapa metanogénica y la producción de CH_4 tiene relación directa con la biomasa de las bacterias productoras de CH_4 .

Hasta que la población de bacterias metanogénicas no esté completamente establecida y en equilibrio con el resto de las bacterias intervinientes el proceso no estará completamente en operación, a menos que se haga una inoculación con lodos conteniendo las poblaciones de bacterias metanogénicas necesarias para el proceso en función a los ácidos volátiles presentes.

El balance entre las bacterias formadoras de ácidos y las bacterias metanogénicas se controla por medio de la concentración de ácidos volátiles.

El modelo considera que la fuente principal de CH_4 es el CH_3COOH a partir del cual se produce la mayor transformación. El resto del CH_4 se produce a partir de la reducción del CO_2 por medio del H_2 que se remueve de los compuestos orgánicos por medio de las enzimas (McCarty, 1964).

Las concentraciones de sustrato o materia orgánica a estabilizar se expresarán por medio de la DQO, mientras que para expresar la concentración de biomasa bacteriana se emplea el contenido de sólidos suspendidos volátiles (SSV) expresados en porcentaje.

El volumen de CH₄ se expresará en unidades de volumen en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT).

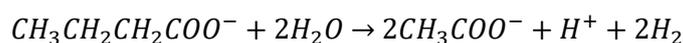
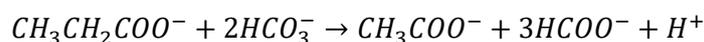
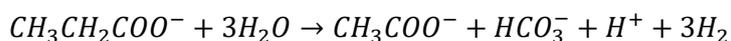
Todas las unidades del modelo se unificarán en unidades equivalentes de DQO que es la unidad adoptada por el IWA Task Group for Mathematical Modelling of anaerobic Digestion Process.

Estequiometría de la digestión anaeróbica

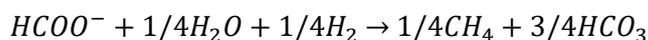
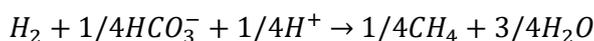
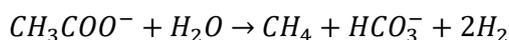
De acuerdo a lo descrito en el punto anterior, vamos a desarrollar la estequiometría de las etapas más importantes del proceso y a plantear los equivalentes en términos de DQO y volúmenes de CH₄ producidos en CNPT.

Para la etapa de acetogénesis, la estequiometría se plantea para la transformación de los ácidos propiónico (CH₃CH₂COOH) y butírico (CH₃CH₂CH₂COOH) en ácido acético (CH₃COOH).

Acetogénesis:

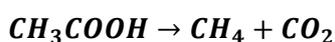


Metanogénesis:



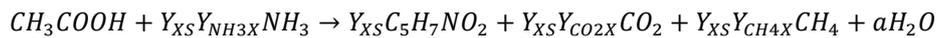
Reacciones de las etapas acetogénicas y metanogénicas (Parra Huertas, 2015)

De este conjunto de reacciones químicas se emplean para el modelado la primera de la etapa metanogénica ya que es la más importante y pueden escribirse de forma simplificada de la siguiente manera:



Por otro lado se puede plantear la estequiometría de la conversión de CH_3COOH en biomasa con la consiguiente producción de CH_4 y CO_2 y la transformación de biomasa en CH_4 y CO_2 correspondiente a la etapa de declinación o muerte celular (Cakir F., Stenstrom M., UCLA, Los Angeles 90095-1593).

La biomasa bacteriana puede ser expresada por la forma química $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ propuesta originalmente por Hoover y Porges (1952). Esta fórmula química es la que generalmente se emplea para su representación.



Donde:

$\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ = molécula de biomasa bacteriana

X = sustrato (CH_3COOH).

Y_{XS} = rendimiento biomasa respecto del sustrato. Indica cuantos moles de biomasa se forman por cada mol de sustrato digerido. Función del tipo del sistema bacteria-sustrato y de la temperatura.

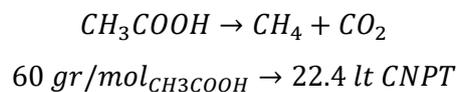
Y_{NH_3X} = rendimiento amoniacado respecto a biomasa.

Y_{CO_2X} = rendimiento CO_2 respecto del biomasa.

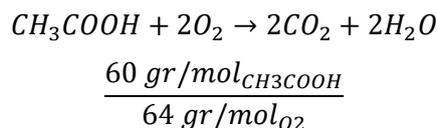
Y_{CH_4X} = rendimiento de CH_4 respecto del biomasa. Indica cuantos moles de CH_4 se generan por cada mol de biomasa formada/destruida.

A continuación se muestran estas equivalencias en términos de DQO consideradas en el modelado del proceso partiendo de la hipótesis que todo el CH_4 se forma a partir de CH_3COOH y que toda la DQO estabilizada proviene del CH_3COOH .

Generación de CH_4 :



Estequiometría de la estabilización del CH_3COOH para expresar en términos de DQO:

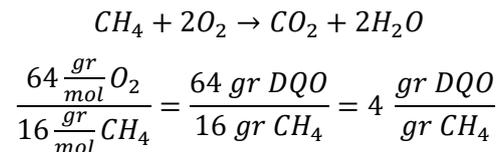


Esto es equivalente a escribir el siguiente planteo por cada mol de CH₄ formado se necesitan dos moles de O₂ para estabilizar el sustrato del que se produce el CH₄:

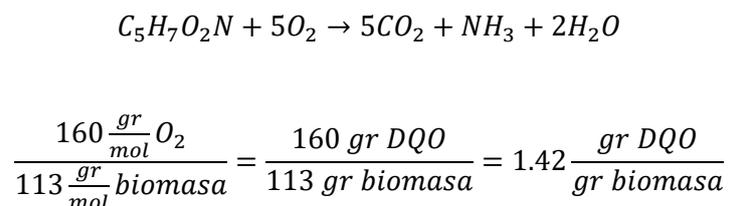
$$\frac{22.4 \text{ lt } CH_4}{64 \text{ gr DQO}} = 0.35 \frac{\text{lt } CH_4}{\text{gr DQO}} = 350 \frac{\text{lt } CH_4}{\text{Kg DQO}}$$

Por cada kg de DQO estabilizada se producen 350 lt de CH₄ en CNPT. Este puede definirse como el rendimiento teórico de CH₄ respecto de la DQO estabilizada.

El equivalente de CH₄ en DQO se plantea a partir de la oxidación completa:



De la misma forma se puede expresar el equivalente en DQO de la biomasa bacteriana planteando la estequiometría de la oxidación completa:



Cinética del crecimiento bacteriano

La relación que existe entre la velocidad de crecimiento bacteriano y el consumo de sustrato se expresa por la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{dX}{dt} = Y_{XS} \frac{dS}{dt} - k_d \cdot X$$

Donde:

dX/dt = velocidad neta de crecimiento bacteriano [masa SSV/(volumen x tiempo)]

Y_{XS} = rendimiento biomasa/sustrato [masa de SSV/masa DQO]

dS/dt = velocidad de utilización de sustrato por las microorganismos [mas DQO/volumen x tiempo]

k_d = constante de desaparición de bacterias o coeficiente de respiración endógeno. Tiene en cuenta la muerte bacteriana por declinación. [tiempo⁻¹]

X = concentración de bacterias expresadas como SSV. [masa SSV/volumen].

La velocidad de consumo de sustrato puede expresarse de la siguiente manera empleando una ecuación del tipo de cinética de Michaelis-Menten:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{K \cdot X \cdot S}{K_S + S}$$

Donde:

K = máxima velocidad específica de utilización de sustrato [masa DQO/masa SSV.tiempo].

K_S =constante de saturación. Valor de concentración de sustrato para el cual la velocidad de utilización de sustrato por unidad de masa de biomasa es la mitad de la velocidad máxima ($K/2$). [masa DQO/volumen]

S =concentración de sustrato en el medio (en el caso del biodigestor será la concentración en el reactor). [masa DQO/volumen].

Dividiendo miembro a miembro en X y reordenando la ecuación puede escribirse como:

$$\frac{dX/dt}{X} = Y_{XS} \cdot \frac{dS/dt}{X} - kd = Y_{XS} \cdot \frac{K \cdot S}{K_S + S} - kd$$

$$\mu = \frac{dX/dt}{X} = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_S + S} - kd$$

Denominada ecuación de Monod, donde:

μ = velocidad específica de crecimiento de biomasa [gr SSV/gr SSV.dia]

μ_{max} = máxima velocidad específica de crecimiento de biomasa.[gr SSV/grSSV.dia].

S = concentración de sustrato en el reactor [gr DQO/lt]

K_S = constante media de saturación [gr DQO/lt].

Kd = coeficiente de respiración endógeno [dia⁻¹]

$$\mu_{max} = Y_{XS} \cdot K$$

Donde:

Y_{XS} = rendimiento biomasa/sustrato [gr SSV/gr DQO]

K = máxima velocidad específica de utilización de sustrato [grDQO/gr SSV. dia]

Estas ecuaciones son aplicables a sistemas de tratamientos que utilizan bacterias como microorganismos principales y consideran la parte de residuo soluble y biodegradable (Metcalf-Eddy, 1977).

Sustrato	Y_{XS} [grSSV/grDQO]	K_d [dia ⁻¹]
Ácido graso	0.054	0.038
Hidratos de Carbono	0.240	0.033
Proteínas	0.076	0.014

Tabla 1. Constantes cinéticas empleadas en el modelo de cálculo. (Metcalf-Eddy, 1977-McCarty, 1964).

Factores ambientales a controlar en la digestión anaeróbica

Las bacterias metanogénicas son de crecimiento muy lento y requieren de largos periodos de tiempo para adaptarse a los cambios de carga orgánica del medio, temperatura o cualquier otra condición ambiental.

Por este motivo es deseable que el diseño y la operación de los sistemas de tratamientos se hagan en las condiciones ambientales más próximas a las óptimas a los efectos de lograr la mayor eficiencia y un rápido tratamiento (McCarty, 1964).

Entre los factores más importantes podemos mencionar el tipo de sustrato, contenido y relación de nutrientes, la temperatura del medio (es uno de los factores más importantes), la carga volumétrica o carga de sólidos, el tiempo de retención hidráulico (función de la temperatura y del tipo de sustrato a tratar), pH (otro de los factores de importancia), presencia de elementos o sustancias inhibidoras, grado de mezclado, presencia de inóculos.

Tipo de sustrato y contenido de nutrientes

El crecimiento bacteriano además de requerir fuentes de carbono (C) y nitrógeno (N), también necesita de la presencia de otros elementos minerales en un cierto equilibrio como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores (S, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Mo, Zn, Co, Se, Tg, Ni, etc).

Es normal que los desechos orgánicos como los estiércoles y los lodos cloacales presenten esos elementos en condiciones adecuadas cercanas a las ideales.

Relación Carbono / Nitrógeno (C/N) y relación Nitrógeno/Fósforo (N/P):

El carbono se emplea como fuente de energía y el nitrógeno como elemento para la formación de nuevas células. El consumo de carbono es 30 veces superior al de nitrógeno.

En general es aceptable una relación C/N de 20-30:1. (Guevara Vera, 1996)

También se requiere una cantidad adecuada de nitrógeno y fósforo en la relación N/P=5.

Temperatura

La temperatura de operación del digestor es considerada uno de los principales parámetros de diseño debido a su gran influencia en la velocidad de digestión anaeróbica.

El proceso se lleva a cabo con buena eficiencia en dos rangos de temperatura bien definidos, 10° a 37°C para la población de bacterias mesofílicas y entre 55° a 60°C para la población termofílica.

El proceso mesofílico es más estable y más adecuado de emplear en medio rural con digestores de pequeño volumen.

Las temperaturas de trabajo mencionadas deben lograrse desde el exterior ya sea por la temperatura ambiente o por adición de una fuente auxiliar de calor.

La solubilidad de los gases producidos desciende al aumentar la temperatura. Esto es positivo para gases como el NH₃, H₂S y H₂ dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos.

La solubilidad de las sales también aumenta con el incremento de temperatura haciendo que los nutrientes estén más accesibles para la biomasa bacteriana lo que mejora la velocidad del proceso. Por otra parte se genera un efecto negativo de los compuestos tóxicos que al aumentar su solubilidad perjudican el proceso.

La viscosidad del medio disminuye con el incremento de temperatura lo que reduce las necesidades de agitación. (Varnero Moreno, 2011)

Tiempo de retención

La temperatura está directamente relacionada con el tiempo que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para lograr un adecuado nivel de degradación. A medida que aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención.

En este punto deben discriminarse dos tiempos de retención asociados a los procesos.

El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y el Tiempo de Retención Celular (TRC).

TRC: depende de la velocidad de crecimiento de la población bacteriana. Es el tiempo medio que la biomasa bacteriana permanece dentro del reactor.

TRH: este concepto encuentra su mayor aplicación para reactores del tipo continuo. Es el tiempo medio que tarda en renovarse el volumen contenido dentro del reactor y matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$TRH = \frac{\text{Volumen hidráulico de reactor}}{\text{Caudal volumétrico de alimentación al reactor}} = \frac{V_H}{Q}$$

Existe un cierto valor mínimo de TRC por debajo del cual la estabilización del residuo no se produce y se denomina Tiempo Medio Mínimo de Retención Celular (TRC_m) y representa el tiempo de retención en el cuál las células se destruyen o son eliminadas del sistema a una velocidad que no les permite su incremento como biomasa. En este punto la concentración de sustrato que entra (S₀) y sale (S) del reactor son iguales (Metcalf-Eddy 1977).

Los sistemas de tratamiento biológico no deben proyectarse a TRC=TRC_m.

Las relaciones que se emplean normalmente para el diseño son:

$$2 \cdot TRC_m \leq TRC \leq 20 \cdot TRC_m$$

Para el caso particular de un biodigestor que trabaja con régimen continuo y mezcla completa el TRC=TRH.

Ambos tiempos se encuentran en la tabla 2.

Temperatura de funcionamiento [°C]	TRC _m [días]	TRH [días]
18	11	28
24	8	20
29	6	14
35	4	10
40	4	10

Tabla 2. Tiempos medios de retención celular sugeridos para utilizar en el diseño de digestores de mezcla completa (Metcalf-Eddy, 1977).

Por otro lado sabemos que el TRC y el TRH están ligados al tipo de sustrato y a la temperatura.

En la tabla 3 se puede observar el TRH para algunos tipos de estiércoles en el rango de operación mesofílico:

Sustrato	TRH [días]
Estiércol vacuno líquido	20-30
Estiércol porcino líquido	15-25
Estiércol aviar líquido	20-40

Tabla 3. Tiempo de retención Hidráulico para algunos tipos de estiércoles para el rango mesofílico. (Hilbert, 2011).

pH

Esta es una de las variables ambientales más importantes a controlar debido a que las bacterias metanogénicas son más sensibles a las variaciones de pH q el resto de los microorganismos de la biomasa bacteriana.

El pH se utiliza como parámetro para evaluar la correcta operación del sistema.

La digestión anaeróbica se realiza adecuadamente en un rango de pH de 6.6 a 7.6 con un rango óptimo cercano a la neutralidad en los valores de 7.0 a 7.2. Fuera de esos límites el proceso puede producirse pero con una menor eficiencia (figura 2).

En el rango de pH entre 6 y 8 el control de pH del proceso está regido por el sistema químico dióxido de carbono-bicarbonato, que está relacionado con el pH por medio de la siguiente ecuación:

$$[H^+] = K_i \frac{[H_2CO_3]}{[HCO_3^-]}$$

La concentración de ácido carbónico $[H_2CO_3]$ está relacionada con el porcentaje de dióxido de carbono en el digestor. K_i es la constante de ionización para el ácido carbónico. La concentración de ion bicarbonato $[HCO_3^-]$ forma parte de la alcalinidad total del sistema.

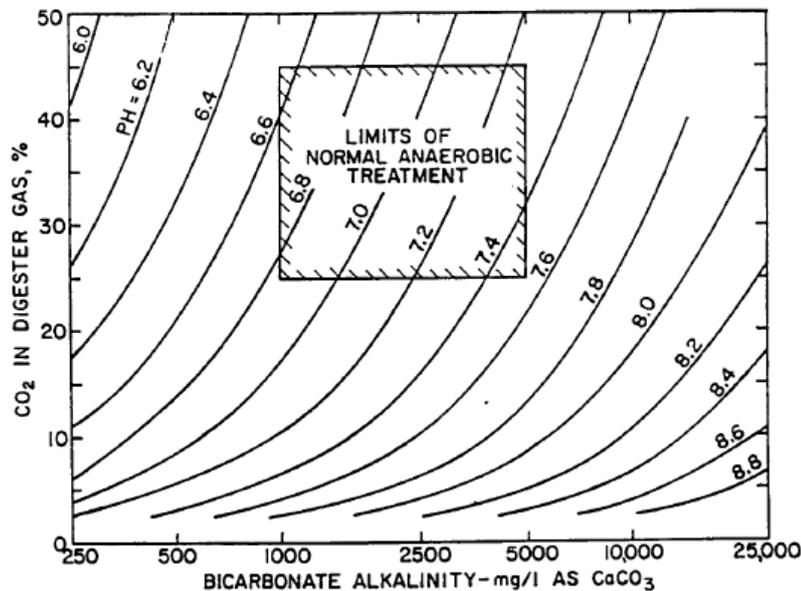


Figura 2. Relación entre el pH y la concentración de ion bicarbonato a temp. de 35°C. (McCarty, 1964).

Carga de sólidos

La movilidad de las bacterias dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la producción de gas.

Experimentalmente se ha determinado que para mezclas de estiércoles de animales en agua el porcentaje óptimo de sólidos totales oscila entre 8% y 10% trabajando con digestores continuos y semicontinuos. (Hilbert, 2011).

Presencia de sustancias tóxicas e inhibidores

El proceso de digestión anaeróbica puede ser inhibido por sustancias presentes en el desecho a digerir o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de la biomasa anaeróbica que en determinadas condiciones presentan toxicidad.

Entre las sustancias que pueden acompañar al sustrato orgánico a digerir podemos mencionar al amoníaco (NH₃), metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles. Algunos de los subproductos de la actividad metabólica son el sulfuro, NH₃ y ácidos grasos volátiles (AGV).

Ácidos Grasos Volátiles (AGV):

En un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV es relativamente baja y se encuentra en el orden de 50-250 mgCH₃COOH/lit.

Un incremento en la concentración de AGV en el sistema indica una desestabilización del proceso.

Nitrógeno Amoniacal:

Una concentración excesiva puede resultar inhibitoria del proceso como se indica en la tabla 4.

Concentración de nitrógeno amoniacal [mg/lit]	Efecto en el tratamiento anaeróbico
50-200	Beneficioso
200-1000	Sin efectos adversos
1500-3000	Inhibitorio a valores de pH elevado
>3000	Tóxico

Tabla 4. Efectos de la concentración de nitrógeno amoniacal en el tratamiento anaeróbico. (McCarty, 1964).

Sulfatos y sulfuros:

La metanogénesis puede resultar inhibida por la presencia de elevadas concentraciones de sulfatos en el sustrato orgánico a digerir.

El sulfuro se produce durante la degradación de materia orgánica que contiene proteínas como por ejemplo el estiércol de cerdo.

El sulfuro comienza a ser tóxico para las bacterias metanogénicas a partir de una concentración de 50 mg/lit.

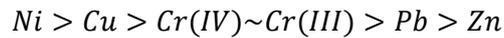
La forma no ionizada presenta mayor toxicidad por lo que es de esperarse que un pH bajo y una baja temperatura favorezcan la inhibición.

Cationes y metales pesados:

Los cationes de metales alcalino y alcalino térreos tienen efecto estimulador de la actividad bacteriana cuando se encuentran en bajas concentraciones.

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo tanto, los metales pesados provocan toxicidad a baja concentración (tabla 5) .

Orden de toxicidad de metales pesados es el siguiente:



Catión	Estimulante	Moderada inhibición	Fuerte inhibición
Sodio (Na ⁺)	100-200	3500-5500	8000
Potasio (K ⁺)	200-400	2500-4500	12000
Calcio (Ca ⁺⁺)	100-200	2500-4500	8000
Magnesio (Mg ⁺⁺)	75-150	1000-1500	3000

Tabla 5. Efecto de la concentración de cationes alcalino y alcalino-térreos [mg/lt]. (McCarty, 1964).

Elementos	Concentración inhibitoria
SO ₄ ²⁻	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO ₃ ⁻ (según contenido de nitrógeno)	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/lt
Cr	200 mg/lt
Ni	200-500 mg/lt
CN ⁻	25 mg/lt
ABS (Detergente Sintético)	20-40 mg/lt
Na ⁺	3500-5500 mg/lt
K ⁺	2500-4500 mg/lt
Ca ⁺⁺	2500-450 mg/lt
Mg ⁺⁺	1000-1500 mg/lt

Tabla 6. Resumen de elementos inhibidores del proceso anaeróbico y sus concentraciones correspondientes. (Guevara Vera, 1996).

Potencial Redox

El valor del potencial Redox para una óptima actividad de las bacterias metanogénicas debe estar entre -110mV y -350mV a pH 7,0 para asegurar un ambiente fuertemente reductor (Varnero Moreno, 2011).

Agitación y mezclado

La agitación es muy importante para lograr la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, uniformar la concentración de sustrato dentro del digestor y mezclarlo con la biomasa para lograr un contacto íntimo y facilitar su digestión, evitar la formación de costras, uniformar la distribución de biomasa bacteriana dentro del reductor para evitar volúmenes muertos y prevenir la formación de espumas y sedimentación.

El resultado de la agitación se traduce en un incremento en la producción de biogás y en la reducción del TRH debido a las siguientes razones:

Distribución uniforme de sustrato y temperatura en el interior del reactor.

Distribución uniforme de productos intermedios y finales.

Contacto íntimo entre las bacterias y el sustrato mejorando la disponibilidad del mismo.

Minimizar la acumulación de lodos y de espuma que dificulta la liberación del biogás producido.

La agitación y el mezclado puede realizarse en forma mecánica, hidráulica o por burbujeo mediante la recirculación del biogás producido.

Puede realizarse en forma continua o intermitente.

Inóculos

El uso de inóculos se realiza para reducir el tiempo de arranque del reactor o digestor, llevando la biomasa bacteriana a la fase estacionaria con lo cual se incrementa la producción de biogás por kg de DQO.

Características de los sustratos para digestión anaeróbica:

En términos generales todo sustrato orgánico que presente materia orgánica volátil puede ser tratado biológicamente por bacterias metanogénicas para generar biogás.

Como se describió anteriormente, el crecimiento bacteriano además de requerir fuentes de carbono (C) y nitrógeno (N), también necesita de la presencia de otros elementos minerales en un cierto equilibrio como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores (S, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Mo, Zn, Co, Se, Tg, Ni, etc).

Normalmente los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas.

En los estiércoles animales tanto los contenidos de nutrientes como su degradabilidad, rendimiento de producción y composición de biogás dependerá del tipo de animal y de la alimentación que reciben (Hilbert, 2011).

El potencial de generación de biogás y el tipo de tratamiento o proceso a emplear dependen del origen, la composición, características físico químicas y condiciones ambientales del sustrato a tratar.

Como la degradación de la materia orgánica es compleja, podemos simplificar la situación diciendo que las fuentes carbonadas más empleadas por la biomasa bacteriana son los ácidos grasos, los hidratos de carbono y las proteínas.

Especie	Peso Vivo	Kg estiércol/día	Biogás [lt/kg SV]	CH₄ %
Cerdos	50	4.5-6	340-550	65-70
Vacunos	400	25-40	90-310	65
Equinos	150	12-16	200-300	65
Ovinos	45	2.5	90-310	63
Aves	1.5	0.06	310-620	60
Caprinos	40	1.5	110-290

Tabla 7, Producción de estiércol de distintas especies animales y la producción de biogás referida a los sólidos volátiles. (Hilbert, 2011).

Los valores de la tabla 7 son indicativos y representan rangos tanto de producción de estiércol como de producción de biogás y contenido porcentual de CH₄.

La cantidad de biogás producida y su contenido de CH₄ está relacionada su composición en ácidos grasos, carbohidratos, proteínas que también determina los contenidos de carbono (C), nitrógeno(N) y su relación C/N.

Material	% Nitrógeno (base seca)	% de carbono (base seca)	Relación C/N
Estiércol bovino	1.70	30.6	18:1
Estiércol equino	2.30	57.6	25:1
Estiércol ovino	3.80	83.6	22:1
Estiércol porcino	3.80	76.0	20:1
Estiércol aviar	6.30	50.0	8:1
Hojas secas	1.00	41.0	41:1
Pajas de arroz	0.63	42.0	67:1
Paja de trigo	0.53	46.0	87:1
Rastrojo de maíz	0.75	40.0	53:1
Rastrojo de soja	1.30	41.0	32:1
Sorgo granífero	1.63	31.8	19:1

Tabla 8, Relación Carbono/ Nitrógeno de diversos sustratos orgánicos. (Gropelli E., Giampaoli O., 2012)

Residuos animales	% Sólidos Totales (ST)
Bovinos	13.4-56.2
Porcinos	15.0-49.0
Aviar	26.0-92.0
Caprinos	83.0-92.0
Ovinos	32.0-45.0
Conejos	34.7-90.8
Equinos	19.0-42.9
Humanos	17

Tabla 9, Porcentaje promedio de ST en diferentes residuos animales. (Varnero Moreno, 2011).

CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PORCINOS

Los residuos animales de las explotaciones ganaderas están constituidos por una parte seca, formada por el estiércol de los animales y restos de alimentos, y otra líquida formada por orina, remanentes de agua de los bebederos, agua de lavado de la explotación y, pueden contener agua de lluvia si el sistema de recolección no está cubierto. En el caso de las explotaciones porcinas esta mezcla se denomina purín.

El purín es un material no estéril, generalmente básico y bastante salino. Posee cantidades importantes de hidratos de carbono, lípidos, aminoácidos, proteínas, urea y compuestos azufrados, como así también elevados contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na). También contiene micronutrientes como hierro (Fe), cinc (Zn), cobre (Cu) y manganeso (Mn).

VARIABLES COMO LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS QUE LO CONSTITUYE Y EL VOLUMEN DE GENERACIÓN DIARIO, DEPENDEN DE FACTORES COMO: LA RAZA, EL ESTADO FISIOLÓGICO, EL TIPO DE ALIMENTACIÓN Y EL TIPO DE ALMACENAMIENTO, LA CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA EN LA LIMPIEZA, LOS PRODUCTOS UTILIZADOS EN LA DESINFECCIÓN Y LA ÉPOCA DEL AÑO (INTA, Buenas Prácticas Pecuarias, 2012).

Parámetro	Concentración
Materia seca	5-7%
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	15000-25000 mg/lt
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	35000-60000 mg/lt
Nitrógeno amoniacal	3000-5000 mg/lt
Sodio (Na)	1000-2000 mg/lt
Fósforo (P)	1000-3000 mg/lt
Potasio (K)	1000-3000 mg/lt
Cobre (Cu)	20-40 mg/lt
Zinc (Zn)	20-40 mg/lt
Hierro (Fe)	50-150 mg/lt

Tabla 10, Concentración media de los principales parámetros de los purines de cerdo. (INTA, BPP, 2012).

En el caso de producción porcina de ciclo completo en sistemas confinados la generación de deyecciones depende de la etapa fisiológica del animal (tabla 11). En nuestro país este tipo

de sistemas abarca el 60% de la producción porcina del país y engloba al 40% de las madres existentes.

Es importante contabilizar las cantidades de excretas generadas en todo el sistema de producción animal para poder realizar una estimación de los volúmenes a tratar para poder dimensionar en forma correcta el sistema de tratamiento, como así también el potencial de generación de biogás.

Etapa reproductiva	Peso vivo [Kg]	Volumen [lt/dia]	Promedio [lt/dia]	Materia sólida %
Lechones hasta 3 semanas	5		1.0	10
Lechones destetados	12	1.5-2.5	2.0	10
Cerdos de engorde con alimento solo	50	2.0-5.5	4.0	10
Cerdos de engorde con agua: alimento (2.5:1)	50	2.0-5.0	4.0	10
Cerdos de engorde con agua:alimento (4:1)	50	4.0-9.0	7.0	6.0
Cerdos engordados con subproductos alimenticios	50	variable	15.0	10
Cerdos engordados con suero	50	14.0-17.0	14.0	2
Verraco	200		5.0	10
Cerda destetada (seca)	150		4.5	10
Cerda con camada de 3 semanas	150		15.0	10

Tabla 11. Volumen de deyecciones (excretas y orín) en función de la etapa fisiológica (INTA, BPP, 2012).

El máximo beneficio en la digestión anaeróbica de purines se logra cuando son los más frescos posibles.

EL BIOGÁS

El biogás es una mezcla de gases obtenidos a partir de la digestión anaeróbica de sustratos o desechos orgánicos biodegradables. Sus principales componentes son el metano (CH₄) y el dióxido de Carbono (CO₂) y en menor proporción sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃), Nitrógeno (N₂), Hidrógeno (H₂) y vapor de agua (H₂O) que se producen durante la fermentación anaeróbica. La proporción de cada uno de estos componentes es función del origen y la composición del sustrato orgánico.

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
CH ₄	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
CO ₂	20-50%	20-50%	30-50%	34-55%
H ₂ O	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
H ₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
H ₂ S	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
NH ₄	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
N ₂	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
O ₂	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	trazas	trazas	trazas	5 ppm (terpenos, esteres)

Tabla 12. Componentes del biogás en función del sustrato empleado. (Acosta L., Abreu C., 2005).

Esta mezcla gaseosa es combustible y presenta un poder calorífico inferior que oscila entre los 5000 y 5500 Kcal/m³ teniendo en cuenta que las proporciones de metano son variables (Gropelli E., Giampaoli O., 2012).

El aprovechamiento del biogás produce un ahorro energético por sustitución de otros combustibles de fuentes no renovables y un impacto positivo sobre el medio ambiente debido al control de las emisiones líquidas y gaseosas de la gestión de residuos orgánicos. Recordemos que el potencial de calentamiento del CH₄ es 21 veces superior al CO₂ (empleado como referencia y al cuál se le asigna por convención el valor 1).

Las tablas 13 y 14 muestran las comparaciones del biogas con otros combustibles convencionales ya sea para sustitución o para manipuleo.

Combustible	Poder calorífico inferior	Equivalencia biogás de 5500 Kcal/m³
Gas natural	9300 Kcal/m ³	1.7
Gas envasado grado 1	12013 Kcal/Kg	2.18
Gas envasado grado 3	11878 Kcal/Kg	2.16
Leña blanda	1840 Kcal/Kg	0.33
Leña dura	2300 Kcal/Kg	0.42
Nafta	8232 Kcal/lit	1.50
Kerosene	8945 Kcal/lit	1.63
Gas-oil	9211 Kcal/lit	1.67
Fuel-oil	12013 Kcal/Kg	1.87

Tabla 13. Equivalencia del biogás de 5500 Kcal/m³ con otros combustibles. (Gropelli E., Giampaoli O., 2012).

Variable	Biogás	Gas Natural	Gas Propano	Metano	Hidrogeno
PCI [Kwh/m ³]	7.0	10	26	10	3
Densidad [Tn/m ³]	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad relativa al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosividad (% gas en aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura encendido [°C]	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido [m/s]	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire [m ³ /M ³]	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

Tabla 14, Energía equivalente del biogás (65% CH₄ y 35% CO₂) vs otros combustibles gaseosos (Varnero Moreno, 2011).

Acondicionamiento del biogás

Debido a que el biogás es una mezcla gaseosa, existen componentes de la misma que deben eliminarse en mayor o menor medida dependiendo de la utilización que se dará al biogás.

Esta purificación o acondicionamiento es importante por dos razones:

- Incrementar el poder calorífico del biogás.
- Adecuarlo a requerimientos de algunas aplicaciones, como uso en motores, calderas, celdas de combustible, etc.

Remoción de CO₂:

La remoción de CO₂ se realiza para enriquecer el contenido de CH₄ en la mezcla gaseosa.

Los métodos de eliminación más comúnmente empleados son:

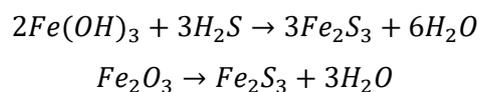
Remoción de agua

Generalmente el biogás está saturado de agua a la salida del digestor. Es recomendable que su humedad relativa sea inferior al 60% para prevenir la formación de condensados en las cañerías y equipos.

Remoción del H₂S

Es muy importante la remoción del H₂S debido a que por combinación con el agua puede producir H₂SO₄ corrosivo para motores y cañerías. Además a concentraciones de 100ppm en volumen es tóxico.

Puede removerse por absorción en compuestos de hierro. En este procedimiento el H₂S es absorbido por el hidróxido de hierro (III) y/o óxido de hierro (III) produciendo una desulfuración seca.



Remoción del amoníaco.

Una de las formas más comunes de eliminar el amoníaco es haciendo pasar la mezcla por una solución ácida lográndose la solubilización como sal de amonio.

Usos del biogás:

Todos los artefactos de uso doméstico corriente que funcionen a gas natural o envasado pueden ser convertidos a biogás adaptando las boquillas de los quemadores.

El biogás requiere de una mayor presión de aire, esto puede lograrse incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la del metano puro). (Varnero Moreno, 2011).

La presión adecuada para un óptimo uso del biogás oscila entre los 7 y 20 mbar, variable a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de los equipos de quema.

Generación de energía eléctrica

La generación de energía eléctrica puede realizarse a partir de un motor de ciclo Otto acoplado a un generador eléctrico.

El motor debe estar adaptado para que funcione con biogás sustituyendo el sistema de carburación y con un adelanto de encendido para compensar la menor velocidad del frente de llama, logrando una mejor eficiencia.

El octanaje aproximado del biogás es de 120 que comparándolo con las naftas de uso común que tienen un número de octano de 95 a 97 nos permite su sustitución.

Se debe hacer la salvedad que el motor entregará menos potencia con biogás que con nafta debido al contenido de CO₂ que ronda el 40% en el biogás.

El rendimiento de conversión de biogás en energía motriz es de 0.50 m³/Hp. hora aproximadamente. (Gropelli E., Giampaoli O., 2012)

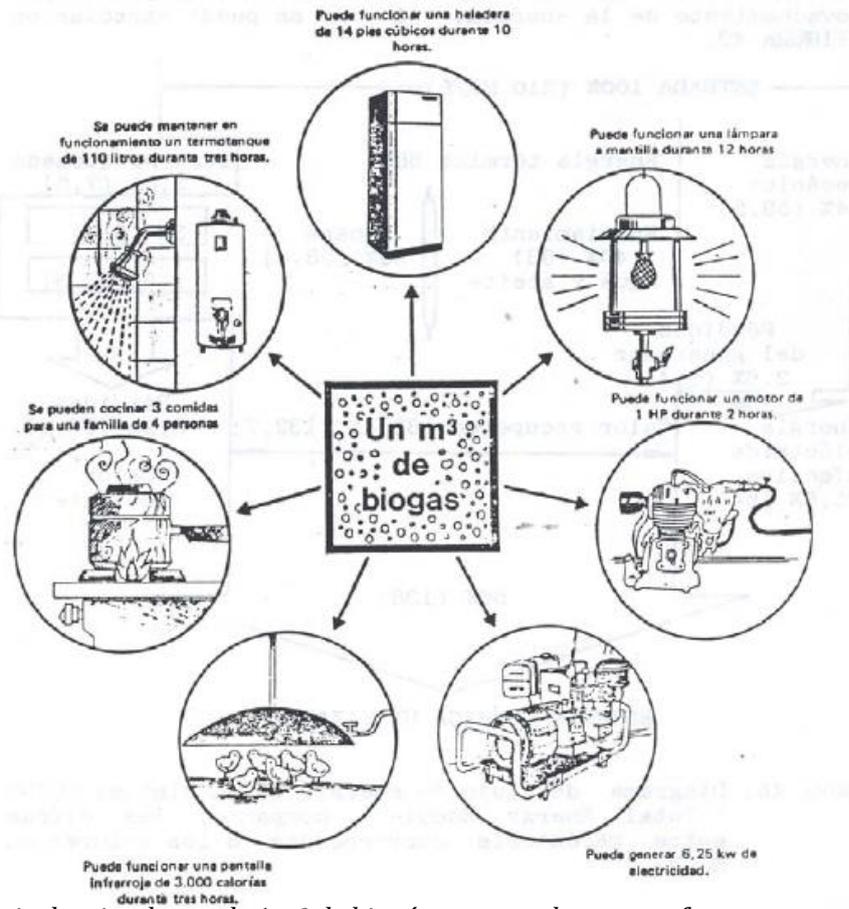


Figura 3., equivalencias de uso de 1 m³ de biogás comparado con artefactos comunes de uso. (Hilbert, 2011).

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se aplica a una granja de cerdos de ciclo completo denominado “Establecimiento Ayala” ubicado en el km16 de la Ruta Provincial N°317, en la localidad de La Ramada de Abajo en el departamento Burruyacú.

El tipo de clima de la zona según la clasificación climática de W. Köppen-Geiser es CWA (cálido y templado) con invierno seco, con temperatura de mes más cálido superior a 24°C, temperatura media anual 19,6°C.

Esta explotación porcina intensiva posee un sistema de producción sobre pisos con desnivel a canales de recolección y *sobre fosa* (fig. 4), es decir, los animales están alojados en corrales sobre *slats* de hormigón, madera y plástico por los que caen las deyecciones, el agua de limpieza y el desecho, tanto de alimentos como de agua de bebida de los animales a una fosa de recolección para luego eliminarse por canales propios del establecimiento. De manera que se produce una gran cantidad de estiércol denominado **purín** de consistencia casi líquida pero con una elevada carga en materia orgánica, nitrógeno y fósforo principalmente. Las etapas del ciclo completo comprenden el servicio y reproducción con 50 hembras y 10 machos reproductores (fig. 5), la etapa de maternidad (fig. 6), la etapa de recría (fig. 7) y la etapa de engorde o finalización de ciclo (fig. 8) donde los animales llegan al peso para venta a frigorífico (tabla 15).

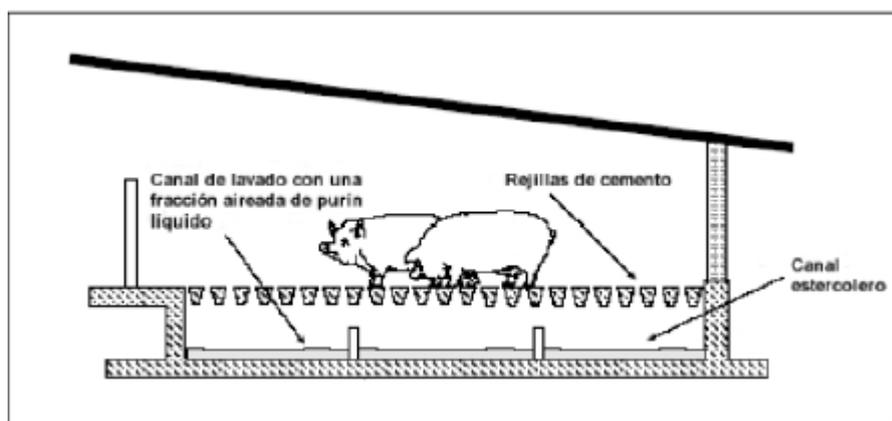


Figura 4. Esquema de corral sobre fosa con recolección de deyecciones animales y residuos

La capacidad máxima de trabajo actual es de 600 animales, con proyección de aumento de hasta 800 animales.

Al momento de realizarse el relevamiento la granja presentaba una capacidad de trabajo de 530 animales distribuidos según se muestra en la tabla a continuación.

Etapa del ciclo	Cantidad de animales	Peso [kg]	Peso promedio [Kg]
Reproducción	60	150-220	160
Maternidad	150	<8	7
Recría	120	8-20	15
Engorde	200	20-100	70

Tabla 15. Distribución de animales según el ciclo de cría. Fuente: relevamiento in situ fecha 23-04-2016



Figura 5. Etapa de reproducción.



Figura 6. Etapa de maternidad



Figura 7. Etapa de recría.

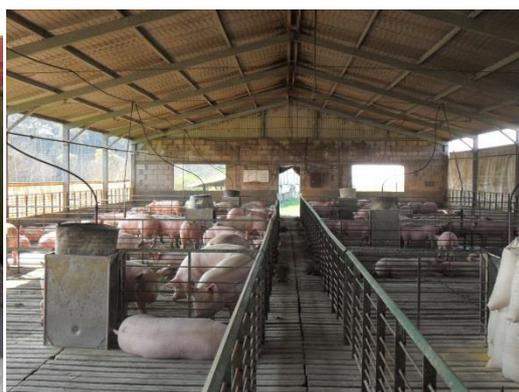


Figura 8. Etapa de engorde y terminación.

El sistema de trabajo es continuo y con carga animal distribuida a lo largo del año notándose una reducción en el número de animales hacia el verano debido a la demanda que presenta el mercado.

El tipo de alimentación se realiza con diferentes tipos de raciones dependiendo de los ingredientes que se produzcan en la zona como ser granos de maíz, subproductos de la industria y núcleos proteicos y vitamínicos. El alimento para cada etapa y categoría de animales se prepara en el establecimiento en las instalaciones destinadas para tal fin teniendo su fuerte en el alimento balanceado con base en el maíz. (Salas H., Estudio de Impacto ambiental, 2009). El consumo de alimento ronda los 500 a 700 kg/día.

Las excretas se manejan recolectándolas diariamente por limpieza de los corrales a través a canales secundarios los que confluyen a un canal principal que alimenta una laguna donde se hace la captación general de las etapas de reproducción, maternidad y engorde (fig. 9). Las dimensiones de la laguna son de 25mx40mx4m de profundidad.

La etapa de recría se encuentra separada del resto de las etapas y las excretas confluyen a una laguna de dimensiones 30mx10mx2 m de profundidad (fig. 10).

Ambas lagunas funcionan como acumuladores de desechos donde se produce la evaporación de una parte importante del agua que forma parte del purín y por otra parte se produce degradación y estabilización de la materia orgánica con importante producción de lodos.

Las lagunas son de tipo facultativo con una fase superior aeróbica y una inferior anaeróbica ya que se encuentran a cielo abierto.

Este tipo de gestión de residuos produce olores nauseabundos y promueve las condiciones para la proliferación de insectos y alimañas.

Se debe resaltar el hecho que no se producen vuelcos a cursos de agua y que tampoco se aplica a campo en forma directa.

Todas las emisiones de gases resultantes del proceso, entre ellos el CH₄, son venteados a la atmósfera desaprovechando su potencial utilización por la incapacidad actual de captación.



Figura 9. Laguna recolectora de purines de cerdo provenientes de las etapas de reproducción, maternidad y engorde.



Figura 10. Laguna recolectora de purines provenientes de la etapa de recría.

Generación de purines:

El criterio a emplear para el cálculo de excretas diarias es a partir de tabla 16 de acuerdo a lo que se detalla en el manual de Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) de INTA, año 2012.

Los valores de volúmenes de desechos producidos corresponden a la sumatoria:

$$\text{volumen purín producido} \left[\frac{\text{lt}}{\text{día}} \right] = \text{heces} + \text{orina} + \text{agua de bebida} + \text{agua de limpieza}$$

Etapa reproductiva	Peso vivo [Kg]	Volumen [lt/dia]	Promedio [lt/dia]	Materia sólida %
Lechones hasta 3 semanas	5		1.0	10
Lechones destetados	12	1.5-2.5	2.0	10
Cerdos de engorde con alimento solo	50	2.0-5.5	4.0	10
Cerdos de engorde con agua:alimento (2.5:1)	50	2.0-5.0	4.0	10
Cerdos de engorde con agua:alimento (4:1)	50	4.0-9.0	7.0	6.0
Cerdos engordados con subproductos alimenticios	50	variable	15.0	10
Cerdos engordados con suero	50	14.0-17.0	14.0	2
Verraco	200		5.0	10
Cerda destetada (seca)	150		4.5	10
Cerda con camada de 3 semanas	150		15.0	10

Tabla 16. Volumen de deyecciones (excretas y orín) en función de la etapa fisiológica (INTA, BPP, 2012).

CONSIDERACIONES DE DISEÑO. DESCRIPCIÓN Y DIMENSIONADO DEL SISTEMA

La etapa de dimensionado del proyecto consiste en primer lugar en la caracterización de los purines generados en el establecimiento muestreados en el canal a la salida de los corrales y previo a la entrada en las lagunas de acumulación.

Se tomó una muestra por duplicado de purín de dos litros cada una y se mantuvieron refrigeradas hasta el momento de los ensayos de laboratorio.

Los recipientes usados para el muestreo fueron botellas vacías de agua mineral.

Al momento del muestreo se midió la temperatura de la muestra empleando termómetro capilar de mercurio con escala de -10 a 60°C.

Las muestras de purín fueron analizadas en el laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes bajo protocolos correspondientes.

En función a los resultados se determina si es necesario realizar alguna adecuación del residuo de acuerdo a las variables analizadas en capítulos anteriores para su tratamiento en el proceso.

Por otra parte se realizó la caracterización de los lodos anaeróbicos de fondo de laguna para evaluar su aptitud como inóculo para el arranque del sistema.

Se hizo una estimación de las cantidades de purín producidas diariamente en el establecimiento para definición de escala más conveniente.

En función de la cantidad de animales existentes, su etapa fisiológica y las cantidades promedio de producción de purín de la tabla 17, se calculó estimativamente la cantidad de desechos a tratar.

Etapa	Peso vivo (PV) [Kg]	Cantidad de animales	Volumen unitario [lt/día]	Volumen producido [lt/día]
verraco	200	10	5	50
Cerda con camada de 3 semanas	150	50	15	750
Lechones hasta 3 semanas	5	150	1	150
Lechones destetados	12	120	2	240
Cerdos de engorde con alimento solo	50	200	4	800
Volumen total de purín producido [lt/día]				1990 lt/día

Tabla 17. Volúmenes de purín producidos de acuerdo a la etapa fisiológica.

Los resultados de la caracterización de purín a la salida de los corrales antes de la entrada a las lagunas de tratamiento se muestran a continuación:

muestra	pH	DQO [mg/lt]	ST [g/lt]	SF [g/lt]	SV [g/lt]	SST [g/lt]	SSF [g/lt]	SSV [g/lt]	AME
1	7.33	13600	11.66	5.28	6.38	3.61	0.93	2.68	0.202
2	7.30	14180	11.16	4.95	6.21	2.81	0.60	2.21	
promedio		13890	11.41	5.12	6.30	3.21	0.76	2.45	

Tabla 18. Valores de caracterización de muestra purín de cerdo (Laboratorio de Investigaciones Ambientales, EEAOC, mayo 2016).

La densidad de la muestra es próxima a la del agua, por lo tanto se toma como valor 1kg/lt como se indicara en la Introducción.

Temperatura de la muestra fue de 21°C.

Resultados de caracterización de lodos anaeróbicos de la laguna recolectora de las etapas de reproducción, maternidad y engorde:

ST [g/lit]	SF [g/lit]	SV [g/lit]	SST [g/lit]	SSF [g/lit]	SSV [g/lit]	AME
102.09	58.13	43.36	88.40	47.69	40.70	0.299

Tabla 19. Valores de caracterización de lodos anaeróbicos de la laguna recolectora de las etapas de reproducción, maternidad y engorde (Laboratorio de Investigaciones Ambientales, EEAO, mayo 2016).

En ambos casos la Actividad Metanogénica Específica (AME) se expresa en [gDQOCH₄/gSSV.d] (gramos de materia orgánica transformada en CH₄ expresadas como DQO por cada gramo de Sólidos Suspending Volátiles (SSV) por día).

Los sólidos suspendidos volátiles se aproximan a biomasa bacteriana.

Como se puede observar en la tabla 18., los valores de ST porcentuales en el purín tienen un promedio de 1.14% el cual es muy bajo comparados con los de un purín típico de la tabla 9, lo que nos lleva a concluir que está usando exceso de agua para limpieza y desplazamiento de desechos.

Lo mismo ocurre al comparar los valores de DQO de la tabla 18 con los de la tabla 10.

Se estima que se emplea un exceso de 2-3lt de agua por lt de purín generado normalmente, por lo tanto se debe realizar un ajuste de volumen para el correcto dimensionado.

Teniendo en cuenta el exceso de volumen en la cantidad de purín generado y sabiendo que el volumen del biodigestor está relacionado a esta variable es de esperarse que los tamaños requeridos de reactor sean más grandes de lo que correspondería a un purín sin exceso de agua.

Para el dimensionado se considera que el agua en exceso es de 2lt/lt purín.

Por otro lado, la etapa del ciclo de la granja que se considera para el dimensionado es la de recría, debido a que se encuentra separada del resto y la salida de los corrales se encuentra muy próximo a la laguna de acumulación, por lo tanto el sistema de biodigestión se puede instalar entre los corrales y la laguna, pudiéndose emplear esta como lugar de disposición final del efluente estabilizado del sistema de biodigestión.

De acuerdo a lo descrito se puede estimar el volumen de purín a tratar de la etapa de recría considerando el valor de tabla más el exceso de agua estimado.

$$\text{Purín de Recría} \left[\frac{\text{lt}}{\text{día}} \right] = \text{valores estimado de tabla} + \text{exceso de agua}$$

$$\text{Purín de Recría} \left[\frac{\text{lt}}{\text{día}} \right] = 690$$

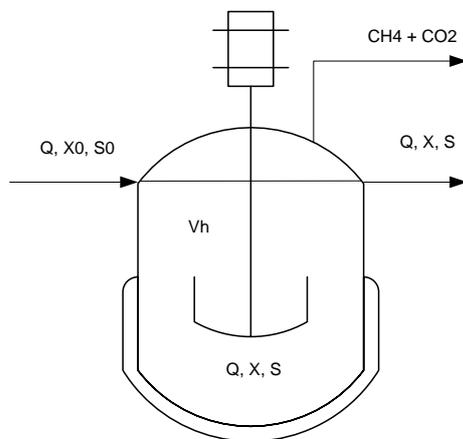
El tipo de reactor a utilizar es del tipo tanque agitado que puede operar en forma continua.

Dimensionado del sistema

Para realizar el dimensionado del sistema de tratamiento se empleó un modelo de cálculo planteado por Metcalf-Eddy (1977) que usa el método de Tiempo Medio de Retención Celular.

Este método tiene en cuenta los conceptos de los procesos biológicos que ocurren dentro del sistema y más específicamente en el interior del biodigestor.

El desarrollo del método aplica los balances en estado estacionario de masa a biomasa y sustrato



Hipótesis: estado estacionario y mezcla completa sin recirculación:

$$\text{entra} - \text{sale} + \text{genera} - \text{consume} = 0$$

Biomasa:

$$\text{sale} - \text{entra} = \text{genera}$$

$$Q \cdot X - Q \cdot X_0 = r_X \cdot V_h$$

Donde.

Q = caudal volumétrico [lt/día]

X_0 = concentración de biomasa a la entrada del reactor [g SSV/lt]

X = concentración de biomasa a la salida y dentro del reactor [g SSV/lt]

r_X = velocidad de generación de biomasa [gSSV/lt.día]

V_h = volumen hidráulico del reactor o volumen de la masa reaccionante [lt].

Aplicando los conceptos desarrollados en el apartado “**Cinética del crecimiento bacteriano**” podemos escribir la ecuación de balance para la Biomasa Bacteriana:

$$Q(X - X_0) = (\mu - K_d) \cdot X \cdot V_h$$

$$\frac{Q}{V_h} \cdot (X - X_0) = \left(Y_{XS} \cdot \frac{K \cdot S}{k_s + S} - k_d \right) \cdot X$$

$$\frac{1}{TRH} \cdot (X - X_0) = \left(Y_{XS} \cdot \frac{K \cdot S}{k_s + S} - k_d \right) \cdot X$$

Donde:

TRH= tiempo de residencia hidráulico [día]

X₀=concentración de biomasa bacteriana a la entrada del reactor [g SSV/l]

X= concentración de biomasa bacteriana a la salida y dentro del reactor [g SSV/l]

μ= velocidad específica de crecimiento de biomasa [gr SSV/gr SSV.día]

Y_{XS}= rendimiento biomasa/sustrato [gr SSV/gr DQO]

K= máxima velocidad específica de utilización de sustrato [grDQO/gr SSV. día]

S= concentración de sustrato en le reactor [gr DQO/l]

k_s= constante media de saturación [gr DQO/l].

k_d= coeficiente de respiración endógeno [día⁻¹]

Balance de Sustrato:

entra – sale = consume

$$Q \cdot S_0 - Q \cdot S = r_s \cdot V_h$$

Donde.

Q= caudal volumétrico [lt/día]

S₀=concentración de sustrato a la entrada del reactor [g DQO/l]

S= concentración de sustrato a la salida y dentro del reactor [g DQOV/l]

r_s= velocidad de consumo de sustrato [gDQO/lt.día]

V_h= volumen hidráulico del reactor o volumen de la masa reaccionante[lt].

Por otro lado sabemos que:

$$r_s = \frac{r_x}{Y_{XS}} = \frac{\mu \cdot X}{Y_{XS}} = \frac{K \cdot S \cdot X}{k_s + S} = \frac{dS}{dt}$$

Donde:

dS/dt= velocidad de consumo de sustrato [gDQO/lt.día].

Reemplazando en la ecuación de balance de sustrato y reordenando:

$$\frac{1}{TRH} \cdot (S_0 - S) = \frac{K \cdot S \cdot X}{k_S + S} = \frac{ds}{dt}$$

Como se puede observar las dos ecuaciones de balance de masa tanto de sustrato como de biomasa bacteriana quedan expresadas en función del tiempo de residencia hidráulico (TRH).

La hipótesis que usa el método es que no existe biomasa en la alimentación del reactor, por lo tanto $X_0=0$.

Si bien la alimentación contiene biomasa bacteriana, esta no es tomada en cuenta frente a la concentración de biomasa existente en el reactor una vez que este se encuentra en estado estacionario. Además en la mayoría de los casos se realiza una inoculación del reactor para acortar los tiempos de arranque y entrada en régimen, por lo tanto, es válida esta simplificación.

Aplicando esta hipótesis a las ecuaciones de balance tenemos que para el caso de biomasa bacteriana resulta:

$$\frac{1}{TRH} = Y_{XS} \frac{K \cdot S}{k_S + S} - k_d$$

De la cuál puede determinarse la concentración de sustrato en la salida y en el reactor:

$$S = \frac{k_S(1 + k_d \cdot TRH)}{TRH \cdot (Y_{XS} \cdot K - k_d) - 1}$$

Como se puede ver la concentración de sustrato en el interior y en la salida del reactor sólo dependen de parámetros cinéticos de la biomasa y del tiempo de retención hidráulico, lo cual es lógico.

Un parámetro muy importante a determinar en este método y en los sistemas de tratamiento continuo y semicontinuo es el tiempo mínimo de retención hidráulico o tiempo mínimo de retención celular definido anteriormente.

Si bien estos valores se pueden calcular, existen tablas con los tiempos de retención celular sugeridos para reactores de mezcla completa (tabla 2).

Como vimos en el apartado “**Cinética del crecimiento bacteriano**”, las constantes cinéticas se encuentran en la tabla 1 y son función del tipo de sustrato empleado en la etapa limitante del proceso. En este caso la metanogénesis.

Resumen de las variables de diseño

Q [lt/día]	S ₀ [gDQO/lt]	X ₀ [gSSV/lt]	pH	Temp [°C]	TRH [d]	Y _{xs} [gSSV/gDQO]	K _d [d ⁻¹]	AME [gDQO/gSSV.d]
690	13,89	2,45	7,3	>22	20	0,054	0,038	0,202

Tabla 20. Resumen de las variables de diseño del sistema.

Eficiencia **adoptada** en la utilización de sustrato= $\epsilon=0,75$. ($0,6<\epsilon<0,9$, Mercalf-Eddy, 1977)

Rendimiento teórico en la producción de CH₄=R_{to} CH₄=350 lt CH₄/kg DQO

CH₄ en biogás=65%

Volumen del biodigestor:

Se determinó teniendo en cuenta el caudal de alimentación y el TRH sugerido de tabla 23:

$$V_h = Q \cdot TRH = 690 \frac{lt}{d} \cdot 20d = 13800lt$$

En la práctica el factor de llenado del reactor varía entre 80 y 90% del volumen total.

Se adoptó como volumen de reactor un tanque de 15000 litros debido a que es un volumen estándar que se puede conseguir en el mercado.

$$Volumen\ total\ de\ reactor = V_r = 15000\ litros$$

Recordemos la determinación de volumen se realiza con las condiciones actuales de funcionamiento donde existe un exceso del volumen de agua empleado, por lo tanto es de esperarse que optimizando el uso de agua incrementando el tiempo de retención hidráulica y por lo tanto el tiempo de retención celular, lográndose una mejor estabilización y por consiguiente mayor producción de metano.

Estabilización de materia orgánica (DQO):

- Determinación de carga de DQO:

$$\text{carga de DQO} \left[\frac{gDQO}{d} \right] = Q \cdot S_0 = 690 \frac{lt}{d} \cdot 13,89 \frac{gDQO}{lt} = 9584,1 \frac{gDQO}{d}$$

- Determinación de la carga volumétrica del reactor:

$$\text{Varga volumétrica} \left[\frac{gDQO}{lt_{reactor}} \cdot dia \right] = \frac{\text{carga DQO}}{V_h} = \frac{9584,1 \frac{gDQO}{d}}{13800 lt} = 0,695 \frac{gDQO}{lt_{reactor} \cdot d}$$

- Determinación de la biomasa producida:

En este punto se define la eficiencia en la utilización de residuo indicado anteriormente (Metcalf-Eddy, 1977)

Valor medio= $\epsilon=0,75$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Y_{XS} \cdot \frac{dS}{dt}}{1 + k_d \cdot TRH}$$

Donde:

$$\frac{dS}{dt} = \epsilon \cdot \text{carga DQO}$$

Reemplazando resulta:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Y_{XS} \cdot \epsilon \cdot \text{carga DQO}}{1 + k_d \cdot TRH}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{0,054 \frac{gSSV}{gDQO} \cdot 0,75 \cdot 9584,1 \frac{gDQO}{d}}{1 + 0,038 d^{-1} \cdot 20d} = 220,54 \frac{gSSV}{d}$$

- Determinación de la eficiencia en la remoción de DQO:

$$\text{DQO removida \%} = \frac{\epsilon \cdot \text{carga DQO} - 1,42 \frac{dX}{dt}}{\text{carga DQO}}$$

$$\text{DQO removida \%} = \frac{0,75 \cdot 9584,1 \frac{gDQO}{d} - 1,42 \cdot 220,54 \frac{gSSV}{d}}{9584,1 \frac{gDQO}{d}} \cdot 100 = 71,7\%$$

El valor de DQO removido es razonable y se encuentra dentro de los valores que se obtienen en la práctica (60% a 85%).

Determinación de los volúmenes de metano (CH₄) y biogás producidos:

$$\text{Producción } CH_4 \left[\frac{lt}{d} \right] = R_{to} CH_4 \cdot (\varepsilon \cdot \text{carga DQO} - 1.42 \cdot \frac{dX}{dt})$$

$$\text{Producción } CH_4 \left[\frac{lt}{d} \right] = 0,350 \frac{lt CH_4}{g DQO} \cdot \left(0,75 \cdot 9584,1 \frac{gDQO}{d} - 1.42 \cdot 220,54 \frac{gSSV}{d} \right)$$

$\text{Producción } CH_4 \left[\frac{lt}{d} \right] = 2406,2 \frac{lt}{d}$

$$\text{Producción de biogas} \left[\frac{lt}{d} \right] = \frac{\text{Producción } CH_4}{0.65}$$

$\text{Producción de biogas} = 3702 \frac{lt}{d}$

Otro método que se puede utilizar para el cálculo de la producción de CH₄ emplea la actividad metanogénica específica (AME), siendo este un método simplificado y aproximado. En este caso se supone que el biodigestor se encuentra a la misma concentración de SSV que la alimentación y se aplica una eficiencia de funcionamiento al reactor.

El valor de AME que se empleó es el de los lodos de inoculación.

$$\text{Producción de } CH_4 - AME \left[\frac{lt}{d} \right] = V_h \cdot X_0 \cdot AME \cdot R_{to} CH_4 \cdot \text{eficiencia reactor}$$

Donde:

AME= actividad específica del lodo de inoculación=0,299 gDQOCH₄/gSSV

Eficiencia reactor =0.8 (valor adoptado)

V_h= volumen hidráulico del reactor

X₀= concentración de sólidos suspendidos volátiles en la alimentación.

R_{to} CH₄=0,35 lt CH₄/gSSV

$$\text{Producción de } CH_4 - AME = 13800lt \cdot 2,45 \frac{gSSV}{lt} \cdot 0,299 \frac{gDQO}{gSSV} \cdot 0,35 \frac{lt CH_4}{gDQO} \cdot 0,8$$

$$\text{Producción de } CH_4 - \text{AME} = 2830,6 \text{ lt } \frac{CH_4}{d}$$

Comparando ambos valores vemos que la producción de CH₄ calculada con el método empleando la AME es ligeramente superior al valor calculado con el método cinético propuesto por Metcalf-Eddy (1977).

Sin embargo ambos pueden considerarse válidos.

Descripción del sistema

Biodigestor:

El reactor consistirá de un tanque comercial de polietileno de alta densidad de una capacidad de 15000 litros, con la parte superior en forma de convexa la cuál funcionará como colectora de gas (fig. 11). Este tipo de biodigestor se denomina de campana fija o modelo chino.

El mismo se instalará semienterrado envuelto en aislante de lana mineral de 2" de espesor para conseguir mayor estabilidad térmica. La profundidad será hasta el nivel de líquido por cuestiones de ahorro energético en el movimiento de fluidos. De esta manera se aprovechará la pendiente de las cañerías actuales para alimentar al reactor.

Debido a que el caudal diario es bajo no hace falta la instalación de un tanque ecualizador.

La salida del biodigestor estará conectada a una cámara séptica de 900 litros con fondo cónico (fig. 12) para retener parte de la biomasa generada que sale con el efluente del reactor y por usarla eventualmente como inóculo o recircularlo al sistema.

La salida de esta cámara se conectará directamente a la laguna actual para su posterior utilización como agua de riego.

Especificaciones del reactor:

Capacidad [lt]	Tipo	Material	Diámetro [m]	Altura [m]
15000	Vertical	PEAD	2,50	3,20



Fig 11; modelo de tanque a emplear como reactor.



Especificaciones de la cámara de salida:

Capacidad [lt]	Tipo	Material	Diam [m]	Altura [m]
900	Vertical	PEBD	1,70	0,98

Base tipo cónica autonivelante.

Fig 12, modelo de cámara de salida de reactor.

Agitación de la mezcla:

La agitación de la mezcla reaccionante se realizará por medio de bomba centrífuga con un caudal adecuado para recircular el volumen del reactor en forma intermitente durante el día. La bomba seleccionada es del tipo centrífuga, autocebante de 0,75 HP, línea piscina con canasto para retener sólidos gruesos, caudal máximo 18500 litros/hora, monofásica, marca Pluvial (fig. 13).

De esta manera haciendo funcionar la bomba en ciclos de 1 hora durante el día se puede lograr la remezcla del contenido del reactor, mejorar el contacto sustrato-biomasa bacteriana, homogeneizar el contenido y lograr una mayor estabilidad térmica y minimizar los espacios muertos en el reactor.

Para la fijación de los intervalos de tiempo de parada de la bomba se debe realizar un estudio de velocidad de sedimentación de la mezcla reaccionante. De esta manera se puede determinar cuánto tiempo se puede mantener la mezcla sin agitación en el interior del reactor sin que se produzca la sedimentación total de sólidos, debido a que este límite operativo reduce la eficiencia en la producción de biogas

Para la etapa de arranque se propone una agitación continua hasta la entrada en régimen del biodigestor.

Una vez que el proceso se haya estabilizado se deberá realizar el estudio de sedimentación y ajustar los intervalos de funcionamiento y parada de bomba de agitación.

Esta propuesta se hace a los fines de optimizar el uso de energía exterior y mejorar el balance energético del sistema.

Lo recomendable es accionar la bomba de agitación por medio de un tablero eléctrico con temporizador para asegurar tanto el funcionamiento y el tiempo de mezclado.



Figura 13. Bomba centrífuga para agitación de mezcla marca Fluvial.

Modelo	Potencia [HP]	Consumo [amp]	H max [m]	Q max [lt/h]
Plata 3	0,75	3,9	18	18500

Tabla 21, características de la bomba a emplear para la agitación del contenido del digester.

(Fuente www.Fluvial.com/línea-plata3, consultada 28/02/2017).

Conexiones de entrada y salida a la bomba son de diámetro 1 ½ pulgadas.

Gasómetro

El gasómetro a emplear será el correspondiente a un biodigester del tipo chino o de campana fija, donde la cámara formada sobre la superficie de líquido funcionará como acumulador de gas generado.

Como ya hemos mencionado en la selección del tamaño de reactor se adopta un volumen de 15000 litros y el volumen reaccionante o volumen hidráulico calculado de reactor es de 13800 lt, por lo tanto el gasómetro tendrá un volumen de 1200 litros (9-10% del volumen hidráulico).

Se recomienda almacenar el volumen medio diario de producción, sin embargo el volumen de gasómetro puede estar entre 20% y 100% de la producción diaria. (Guevara Vera, 1996).

En nuestro caso el volumen de gasómetro está en el orden del 50% de la producción diaria.

Acondicionamiento de biogás

El acondicionamiento del biogás consistirá en la eliminación del vapor de agua contenido en el mismo y del sulfuro de hidrógeno perjudicial para elementos metálicos en el circuito de conducción y consumo.

Parte del vapor de agua se eliminará por condensación natural en la campana fija del reactor y el resto por burbujeo en una solución de glicol.

Por otro lado el H_2S se eliminará haciendo pasar el biogás por un filtro construido en caño de PVC de 160 mm de diámetro y un metro de largo relleno con viruta media de hierro produciéndose las reacciones de óxido reducción descritas anteriormente.

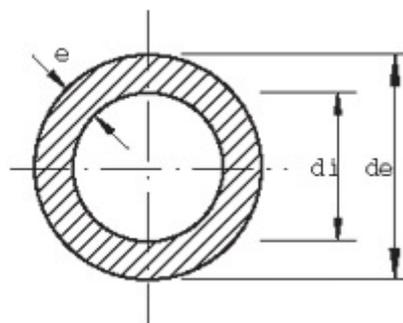
Cañerías

Las cañerías de entrada y salida al biodigestor, entrada y salida a la cámara receptora de lodos y conexión a la laguna serán de PVC de 110 mm de diámetro nominal, 3,2 mm de espesor de pared, todas las cañerías pegadas con pegamento para PVC.

Las cañerías y accesorios de la línea de agitación y mezclado será de polipropileno (PP) de 1 ½ pulgadas de diámetro nominal con uniones roscadas y selladas con sellador para cañerías plásticas.

Las cañerías y accesorios de la línea de salida y conducción de biogás será de polipropileno copolímero Random (tipo3), PN20, termofusionables de 32 mm de diámetro nominal.

Se emplea este tipo de cañerías para minimizar pérdidas por eventuales fugas en las uniones que se presentan generalmente en las uniones roscadas.



Especificaciones de las cañerías:

Descripción	Peso [kg/m]	Secc. Int. [cm ²]	e [mm]	di [mm]	de [mm]	dn [mm]	PN [bar]
Caños A.S.Mag. PN 20 32mm	0,37	4,23	4,4	23,20	32	32	20

Tabla 22. Especificaciones técnicas para cañerías termofusionables para la línea de biogás.

(Fuente : <http://www.conducciondefluidos.com.ar/productos/tubo-acqua-system-r-magnum-pn20-acqua-system-101>, consultado 28/02/2017)

Diagrama de flujos del proceso propuesto para el tratamiento de purín de cerdo de la etapa de recría en Establecimiento Ayala. La Ramada de Abajo

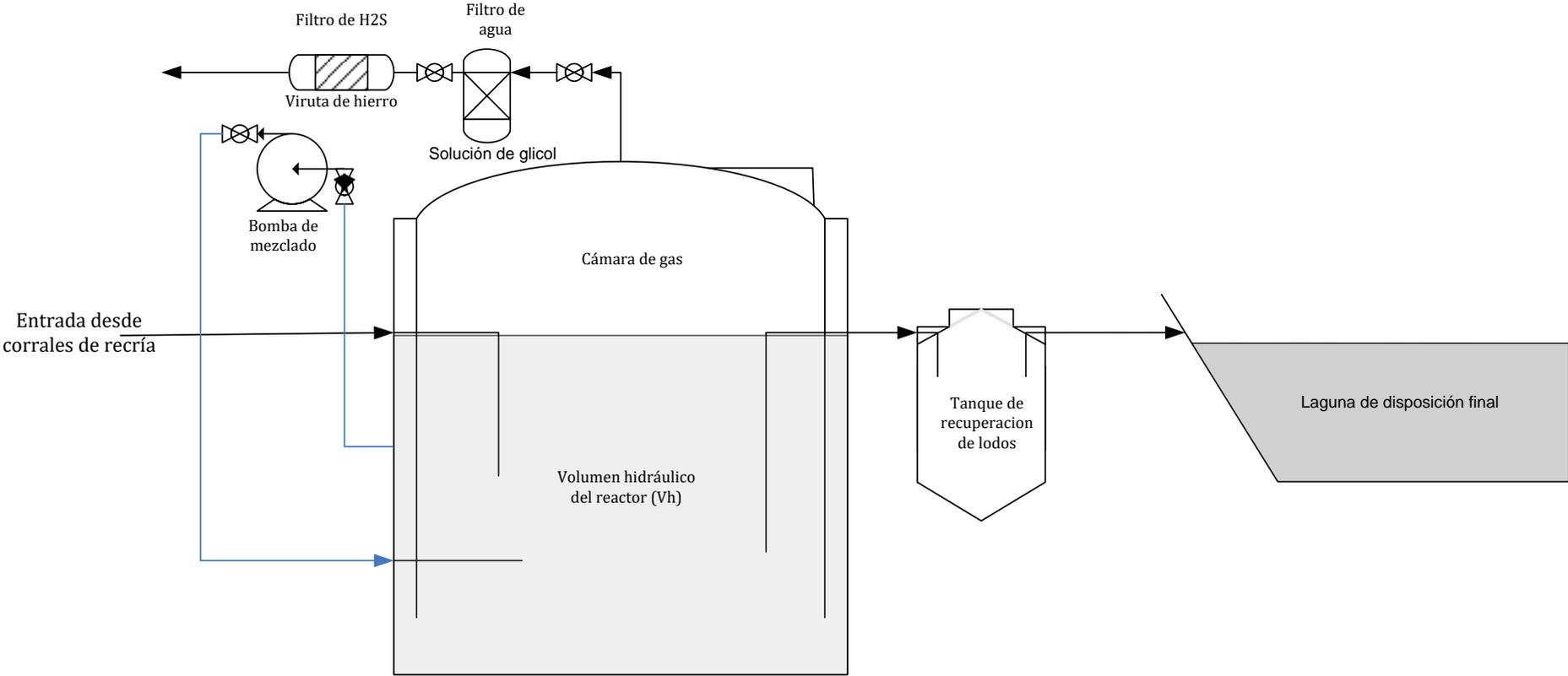


Figura 14. Diagrama de flujos propuesto para el proceso.

CONCLUSIONES

El manejo actual de desechos porcinos del establecimiento presenta un exceso de agua que reduce los valores de los parámetros de diseño y operación por debajo de los óptimos recomendados.

Esto se debe a que la laguna de disposición que concentra la mayor cantidad de desechos se encuentra a una distancia de aproximadamente 100 metros de los corrales, por lo tanto, si se manejara el purín en sus condiciones naturales sería muy difícil que pueda llegar sin la ayuda de agua en exceso, sobre todo porque las pendientes de los canales no son adecuados para manejar residuos viscosos. La otra alternativa es el empleo de una bomba de lodos.

Este exceso en la cantidad de agua resulta en volúmenes de reactor inconvenientemente grandes teniendo en cuenta que los tiempos de retención hidráulicos para el tipo de desecho y sistema elegido es de 20 días para la temperatura ambiente de la zona.

La optimización en el uso de agua mejora las condiciones de alimentación y funcionamiento de los reactores y sobre todo reduce el consumo energético de las operaciones de mezcla.

Por este motivo se optó por trabajar con una etapa ciclo de cría y se eligió la etapa de recria debido a que se encontraba aislada del resto de las etapas del ciclo y los efluentes de corral eran volcados a una laguna independiente con mayor cercanía al punto de generación de purines.

Por otra parte el volumen de purín producido es sustancialmente menor por tratarse de una etapa que maneja menor cantidad de animales.

El modelo de cálculo empleado se ajusta al tipo de sistema de las hipótesis planteadas por Metcalf-Eddy en el libro "Tratamiento y Depuración de Aguas Residuales", en los capítulos 10 y 13, primera edición, año 1977.

Los resultados obtenidos por el modelo de cálculo empleado brindan valores similares a los calculados por el método simplificado de empleo de la AME (actividad Metanogénica Específica) como parámetro de cálculo.

Bajo estas condiciones elegidas se determinó un volumen de reactor razonable y de fácil operación, sobre todo a lo que se refiere a la operación de mezcla con bajo consumo de energía.

Se elige como sistema de mezclado la recirculación por bomba centrífuga con un caudal suficiente para lograr la circulación de un volumen completo de reactor por cada hora de funcionamiento. Esto nos asegura generar el suficiente movimiento de fluido para lograr la mezcla y el contacto íntimo entre la biomasa bacteriana y el sustrato orgánico a estabilizar.

El volumen de biogás producido es importante aun tratándose de una parte del proyecto y equivale a generar 23,1 KW de electricidad o a 11 hs de funcionamiento de un termotanque de 110 litros o a 7,4 hs de funcionamiento de un motor estacionario de 1HP.

La reducción de la carga orgánica se estima en 71,7%, lo que indica que el efluente a la salida del reactor produce menor impacto al medio ambiente comparado con el vuelco sin tratar.

La implementación del sistema y su monitoreo continuo en las distintas estaciones del año puede brindar información específica y precisa para determinar los parámetros de funcionamiento y diseño para el desarrollo de un sistema integral de tratamiento de desechos de la granja de cerdos del "Establecimiento Ayala" y de cualquier otro proyecto que genere desechos porcinos de ciclo de cría y se encuentren en condiciones ambientales similares.

Se estima que por la simplicidad del sistema, la inversión para implementación del mismo no es grande comparada con el daño ambiental producido y la recuperación de energía que se obtiene. Este último punto puede evaluarse como un retorno económico si se usa el biogás para ahorrar energía proveniente de otra fuente.

REFERENCIAS

- Acosta L.; Abreu C. La Digestión Anaeróbica. Aspectos Teóricos. Parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Nº 1, 2005.
- Berra, G., Finster, L. *Emisión de gases de efecto invernadero; influencia de la ganadería argentina*; Instituto de Patobiología, I.N.T.A. Castelar; 2002.
- Gropelli, E; Giampaoli O. Biodigestores. Una propuesta sustentable. Primera Edición, Ediciones UNL, 2012, ISBN 9789876577946.
- Guevara Vera, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1996.
- Hilbert, J.A. Manual para la producción de biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T. A - Castelar, 2011.
- INTA; Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar, ISBN 978-92-5-306794-7, FAO 2012.
- McCarty, P.L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Public Works, 1964.
- Metcalf, L., Eddy, H. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Primera Edición, McGraw-Hill, 1977, ISBN 8433564161.
- Salas, H. Proyecto de producción de engorde a corral para ganado vacuno (Feedlot) y granja porcina. Estudio de impacto ambiental. Tucumán, Estudio Hugo Salas, 2009.
- Varnero Moreno, M.T. Manual del biogás, Ministerio de Energía, Gobierno Chile, 2011.
- Vicari, María P. 2012. Efluentes en producción porcina en Argentina : generación, impacto ambiental y posibles tratamientos [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en:

<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/efluentesproduccion-porcina-argentina.pdf> [Fecha de consulta:01/02/2017]