



**TÍTULO:**

Estudio del proceso de producción de biogás de la planta de 42 m<sup>3</sup> en la Empresa Genético Porcino de Cienfuegos.

**Tesis de Grado: Erisbel Carral Castro.**

**Tutor: Dr. C. Jesús Manuel Guzmán China.**

Año 57 de la Revolución, Cienfuegos 2015.

*"El mundo no es. El mundo está siendo.*

*Para mí, como subjetividad curiosa, inteligente, que interfiere en la objetividad con la que dialécticamente me relaciono, mi papel en el mundo no es sólo de quien constata lo que ocurre sino también el de quien interviene como sujeto de lo que ocurrirá. No soy sólo un objeto de la historia, sino, igualmente, su sujeto"*

Paulo Freire

**Pensamiento**  
Pensamiento



A mi tutor, quien motivó la realización de este proyecto, por la paciencia y el apoyo incondicional a pesar de haber tenido sus problemas de salud.

A mi mamá que está a mi lado cuando más los solicito.

A mi papá gracias por la ayuda brindada.

A mis abuelos, por todo el apoyo que me dieron en ciertos momentos que necesitaba.

Al resto de mi familia que siempre han estado pendientes de mí.

A todas mis amistades que siempre se preocuparon por mí en todo el transcurso de mi carrera.

A Elizabeth, por brindarme su ayuda que fue clave en mi tesis.

A Ibys muchas gracias, te agradezco la ayuda que me diste.

A los trabajadores del Genético, gracias por la ayuda también.

A mi amigo casi hermano Eduardo, por ser mi apoyo ante las adversidades de cinco años.

A todos mis profesores de la Facultad de Mecánica, ¡gracias!

# **Agradecimientos**



De corazón dedico

esta tesis a mi mamá y a mis abuelos que son los que más han influido en mi vida y

el transcurso de mi carrera. Si ellos no hubiera podido concluir la universidad.

¡GRACIAS!

# **Dedicatoria**



## **Resumen**

En la actualidad nuestro país cuenta con algunas vías para remediar los problemas energéticos y ambientales, entre las que se encuentran, con mayor aprovechamiento, las Fuentes de energía renovables, y dentro de estas, se destaca el uso de la biomasa. El presente trabajo de investigación se desarrolló en la UEB “Genético Porcino de Cienfuegos”, con el objetivo de realizar un diagnóstico en el proceso de producción de biogás de la planta. Se utilizaron distintas técnicas y métodos para localizar los principales problemas que afectan la eficiencia y estabilidad en la misma; la observación, la comparación de datos, entrevistas y se empleo el método Delphi. Como resultado se obtuvo un estimado teórico para la producción de biogás de 11.34 m<sup>3</sup>/d, por la generación de 5,05 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales provenientes de las áreas porcinas, caracterizadas por su bajo contenido de sólidos totales en un rango de 0.86 – 1.43 %. Los valores obtenidos en el FOS/TAC, entre 0.69 – 1.13, demostraron la baja eficiencia y estabilidad en el proceso de digestión anaerobia con una acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) de 7334.43 mg/L. Los parámetros operacionales se encontraron fuera del rango reportado para este tipo de planta; estos fueron de 1.7 días y 6.49 kg SV/m<sup>3</sup>d para el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y la Carga Orgánica Volumétrica (COV), respectivamente. En el diagnostico se comprobó que existía problemas constructivos que afectan la eficiencia de la planta. Se elaboró un plan de medidas de acuerdo a las dificultades detectadas con vistas a mejorar el proceso de producción de biogás.

**Palabras claves:** Biogás, Digestión, Codigestión, Anaerobia, Residuos

## Summary

At the present time our country has some roads to remedy the energy and environmental problems, among the one that meets with more use they are the Fuentes of renewable energy and inside of this he/she stands out the use of the biomass. The present investigation work was developed in the Swinish "Genetic UEB of Cienfuegos", with the objective of carrying out a diagnosis in the process of production of biogas of the plant. They were used different technical and methods to locate the main problems that affect the efficiency and stability in the same one; the observation, the comparison of data, interviews, diagram Ishikawa (cause-effect) and Pareto. As a result a dear one was obtained theoretical for the production of biogas of 11.34 m<sup>3</sup>/d, for the generation of 5,05 m<sup>3</sup>/d of residual waters coming from the swinish areas, characterized by their contained first floor of total solids in a range of 0.86 – 1.43%. The values obtained in the FOS/TAC, among 0.69 – 1.13, they demonstrated the drop efficiency and stability in the process of digestion anaerobia with an accumulation of Volatile Fatty Acids (AGV) of 7334.43 mg/L. The operational parameters were outside of the range reported for this plant type; these they were of 1.7 days and 6,49 kg SV/m<sup>3</sup>d for the Time of Hydraulic Retention (TRH) and the Volumetric Organic Load (COV), respectively. In the diagnosis it was verified that there was construction problems affecting the efficiency of the plant. A plan of action according to the problems encountered with a view to improving the production process of biogas is produced.

**Keywords:** Biogás, Digestion, Codigestion, Anaerobia, Residuals

# Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1.....	5
Marco teórico referencial de la investigación.....	5
1.1 Generación de residuos orgánicos.....	5
1.1.1 Residuos porcinos. ....	6
1.1.2 Los Residuos vacunos.....	8
1.2 Codigestión de residuos orgánicos. ....	10
1.3 Proceso de digestión anaerobia.....	14
1.3.1 Factores que influyen en el proceso de digestión anaerobia. ....	16
1.4 Tecnologías de digestión anaerobia. ....	22
1.5 Usos y aplicaciones de los subproductos del proceso de digestión anaerobia. ....	28
1.6 Aspectos a considerar en el análisis de una planta de biogás.....	29
1.6.1 Evaluación Técnica.....	29
Capítulo 2.....	31
Diagnóstico del proceso de producción de biogás de la planta.....	31
2.1 Caracterización general de la planta objeto de estudio.....	31
2.2 Descripción general del proceso de producción de biogás.....	31
2.3 Determinación de los parámetros de control, de operación e indicadores de eficiencia de la planta de biogás. ....	32
2.4 Herramientas empleadas para identificar las principales dificultades y propuestas de mejoras.....	38
2.4.1 Procedimiento para la selección y análisis de los riesgos del proyecto mediante el método Delphi. ....	39
2.4.2 Resultado obtenido de la aplicación del método Delphi.....	48
Capítulo 3.....	53
Diagnóstico del proceso de producción de biogás en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos. ....	53
3.1 Caracterización general de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.....	53
3.1.1 Objeto Social. ....	54
3.1.2 Misión y Visión.....	55
3.1.3 Caracterización del entorno. ....	56
3.1.4 Estructura organizativa. ....	57

3.2 Descripción general del proceso de producción de biogás en la planta de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos. ....	58
3.3 Determinación de los parámetros de control, de operación e indicadores de eficiencia en la planta de biogás de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.....	64
3.4 Principales dificultades y acciones a realizar para obtener mejoras en el proceso de producción de biogás. ....	72
3.4.1 Causas que inciden en la afectación de la estabilidad y eficiencia de la planta. ....	72
3.4.2 Plan de medidas para mejorar eficiencia del reactor. ....	73
Conclusiones.....	74
Recomendaciones.....	75
Bibliografía .....	77
Anexos .....	81



# Introducción

En la actualidad las sociedades presentan un gran problema dado por el consumo de los recursos que cada vez son más escasos para satisfacer las crecientes necesidades de la humanidad. Los recursos que nos provee el medio ambiente son limitados, es por ello que los asuntos referidos a su administración, distribución, así como los daños que se le ocasionen se erigen como primordiales. En el milenio que recién comienza el tema que más ha acaparado la atención de los hombres de ciencia y principales personalidades del planeta es precisamente este, ya que constituyen la razón de ser de nuestra especie en el afán de cuidar su espacio vital y hasta su propia supervivencia.

La tecnología para generar el biogás y explotar su energía es ampliamente empleada en los países centro europeos, la implantación de la tecnología de P+L como un gestor de residuos y un productor de energía eléctrica en régimen especial, no solo permite el aprovechamiento de la energía térmica generada sino también reporta una bondad añadida con el uso del biofertilizante para los cultivos.

La estrategia energética de Cuba se dirige hacia una energía limpia, segura y sustentable, o lo que es lo mismo hacia las fuentes renovables de energía. Por ello, hoy constituye una prioridad el estudio de las inversiones en las tecnologías necesarias para la explotación de estas fuentes renovables y la comprensión de sus costos, a fin de preservar las conquistas alcanzadas por la revolución.

Muchas plantas de biogás, a pesar de estar bien construidas y de contar con suficiente producto para alimentar el digestor, no se obtienen los resultados esperados en la producción de gas, simplemente por no ser operadas eficientemente, lo que ocasiona en algunos casos su abandono por parte del usuario. Si importante es el buen diseño y la construcción de la planta, un papel

más importante aun lo desempeña la correcta explotación, ya que existe una variedad de factores que influyen sobre la producción de biogás.

La cantidad y calidad de residuos producida varía mucho, en dependencia del tipo de animal, de la composición de la alimentación y del sistema de manejo de las granjas, fincas, UBPC, CCS y CPA, (sistema de alimentación, bebederos, sistema de limpieza, tipo de estercolero o balsa).

Entre los principales problemas que se presentan en la provincia se encuentran: la escasez de combustible de uso doméstico para la cocción de alimentos, la inexistencia de infraestructuras para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, el incremento de la carga contaminante de origen animal que se vierte al medio, fundamentalmente a las aguas superficiales y subterráneas, y los relacionados con la deforestación y la pérdida de fertilidad de los suelos.

Adicionalmente, la tecnología del biogás puede mitigar la contaminación del medio ambiente, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir al ahorro de los combustibles fósiles y productos derivados del petróleo. Sin embargo, existen barreras que dificultan un mayor desarrollo de este tipo de energía, como por ejemplo, la falta de conocimiento sobre las tecnologías, técnicas aún incipientes, entre otras.

Para producir biogás se puede partir de una gran diversidad de sustancias orgánicas, por lo que las posibles materias primas a emplear en el proceso conforman un amplio rango de posibilidades y combinaciones. Son utilizables desechos de diversa naturaleza, como excrementos de animales, residuos de cosechas agrícolas, residuales de industrias (agro-azucareras, alimenticias y otras), residuos de procesos industriales tales como las fábricas de Glucosa, el Combinado Lácteo, la Torrefactora de Café, entre otras, residuos sólidos municipales, residuales líquidos de procesos agroindustriales, aguas albañales y otros.

Desde el año 2014 el proyecto de investigación del biogás de la Universidad de Cienfuegos liderada por el Departamento de Química, realiza un trabajo encaminado al desarrollo de estas fuentes de energía renovable y el uso de todas sus bondades.

Es por ello que el presente trabajo se desarrolla en la UEB “Genético Porcino de Cienfuegos”, empresa que cuenta con una planta de biogás para el tratamiento de los residuales porcinos, de la cual se genera nuestra **Situación Problemática** debido a que desde su fecha de construcción en el año 2011 y luego de 4 años de explotación ininterrumpida, nunca ha recibido ni mantenimiento ni reparación, lo que puede estar limitando el grado de la efectividad de la misma así como su desempeño futuro. Este fenómeno constituye la base de nuestra incógnita y nos da paso al siguiente **Problema de Investigación**: realizar un diagnóstico del proceso de producción de biogás para determinar su eficiencia y estabilidad operacional.

**Hipótesis:** Al realizar el diagnóstico del proceso de producción de biogás de la planta de 42 m<sup>3</sup> en la Empresa Genético Porcino de Cienfuegos, se podrá determinar su eficiencia y estabilidad operacional.

**Objetivo General:** Diagnosticar el proceso de producción de biogás en la planta de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

**Objetivos específicos:**

1. Realizar la revisión de la bibliografía científica disponible para determinar el “estado del arte” y de la práctica sobre biogás, características, parámetros y estudios de eficiencia y estabilidad de plantas.
2. Caracterizar el proceso de producción de biogás en la planta de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.
3. Identificar las principales dificultades que inciden en la estabilidad y eficiencia de la planta.

4. Elaborar un plan de acciones para mejorar el proceso de producción de biogás.

**Variable Independiente:** Diagnóstico del proceso de producción de biogás en la planta de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos,.

**Variable Dependiente:** Determinar eficiencia y estabilidad de la planta.

**Campo de Acción:** Proceso de producción de biogás en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

**Objeto de Estudio:** Diagnóstico del proceso de producción de biogás en la planta de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.,

**Justificación de la Investigación:** La investigación está plenamente justificada a partir del potencial de residuos existentes en el centro objeto de estudio, que pudieran ser aprovechados de forma eficiente para generar calor y electricidad.

No se encontraron referencias de trabajos relacionados con su control y monitoreo, siendo ésta, la de mayor volumen de capacidad en la provincia. Por ello se hace necesario realizar un diagnóstico del proceso de producción de biogás que considere de forma sistemática cada uno de los elementos relacionados con este fin.

**Valor Práctico:** Contribuirá a crear las condiciones para una eficiente y estable producción y utilización del biogás en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

**Valor Teórico:** Ofrecerá un medio para examinar el estado actual de las plantas de biogás en la provincia.

**Valor Social:** Aportará información clave para el desarrollo de la producción de biogás en beneficio de la sociedad.

**Valor Ambiental:** por la reducción de la carga contaminante que se vierte al medio ambiente.

# Capítulo 1.

## Marco teórico referencial de la investigación.

### 1.1 Generación de residuos orgánicos.

Existen distintos tipos de residuos orgánicos que podremos tratar, algunos de los cuales se detallan en los siguientes subapartados. La mezcla de los diferentes residuos será muy común, bien porque son generados por los usuarios y todos deben tratarse o bien porque las características del sustrato no son buenas (humedad, ratio C/N...).

En el caso de disponer de residuos de origen animal y vegetal, si la cantidad de sólidos totales no excede del 10 a 12%, los reactores simples de digestión anaerobia pueden trabajar sin problemas con una mezcla de estiércol animal y restos vegetales (paja, forraje). Los restos vegetales deberán ser triturados antes de introducirlos en el reactor.

En cuanto a la composición del sustrato, el ratio C/N de excrementos de animales y humanos es favorable para la fermentación anaerobia (encontrándose entre el 9:1 y el 25:1), mientras que los vegetales tienen un mayor contenido carbonoso.

En muchos casos se mezclarán distintos tipos de sustratos para optimizar la producción de gas y la estabilización del proceso de fermentación.

El aumento de la producción porcina conlleva, necesariamente al aumento de la producción de residuos. El principal problema para la gestión de los residuos no es tanto la cantidad total, sino la excesiva concentración en determinadas áreas, que supera la capacidad de aceptación del medio.

La cantidad y calidad de residuos producida varía mucho, dependiendo del tipo de animal, de la composición de la alimentación y del sistema de manejo de la granja (sistema de alimentación, bebederos, sistema de limpieza, tipo de estercolero o balsa, etc.).

La aplicación excesiva de residuos porcinos al suelo contribuye a la contaminación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, por nutrientes y por organismos patógenos. También son importante los efectos sobre la atmósfera, por la producción de olores y emisiones gaseosas de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SH}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , compuestos orgánicos volátiles, etc., procedentes las balsas de almacenamiento y de la aplicación al suelo. Finalmente, contribuyen a la contaminación del suelo, resultado de una aplicación excesiva de nutrientes, llevando a un desequilibrio y a la acumulación de determinados elementos.

El producto final, para que tenga valor como fertilizante, deberá cumplir los siguientes requisitos: producto estable, con mínima concentración de materia orgánica fácilmente degradable; mínimo volumen con máxima concentración de nutrientes; relación Nitrógeno, Fósforo, Potasio (N:P:K) adecuada; mínima concentración de metales pesados y tóxicos; higienizado, con nula concentración de patógenos, semillas de malas hierbas, larvas o huevos de insectos, etc.; olor agradable, o en todo caso que no recuerde su origen; composición estable, con mínimas variaciones temporales.

### **1.1.1 Residuos porcinos.**

Las excretas porcinas son una mezcla compleja, compuesta por una porción de alimento sin digerir, bacterias arrastradas del tracto digestivo, líquidos digestivos y agua. La porción fecal del estiércol contiene un gran número de ingredientes alimenticios en su forma original. Las excretas también contienen sustancias que fueron transformadas por la actividad metabólica de las bacterias en el tracto digestivo, así como por la acción enzimática de los jugos digestivos.

Las excretas porcinas son una mezcla compleja que puede ser considerada como un fango líquido con una concentración media en materia seca en el entorno del 6%, con una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de alrededor de 75.000 mg/l y una Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de aproximadamente 26.000 mg/l.

El empleo de una determinada tecnología en el tratamiento de los residuales porcinos está en dependencia de los siguientes factores:

- Cantidad de animales en granja y los que se pretendan incorporar en un futuro inmediato
- Disponibilidad de terreno para realizar la construcción del sistema de tratamiento de los residuales.
- Recursos financieros y materiales de que se disponga para tratar los residuales.
- Disposición final de los efluentes o residuales de los sistemas de tratamiento de residuales (IIP, 2005).

En las excretas se encuentran cantidades apreciables de elementos fertilizantes, en proporciones que oscilan alrededor de los siguientes valores, al cabo de unos tres días de ser producidos:

Nitrógeno total 0.68%

Nitrógeno orgánico 0.15%

Nitrógeno amoniacal 0.53%

Fósforo 1.40 g/m<sup>3</sup>

Potasio 6.12 g/m<sup>3</sup>

La producción de biogás a partir de residuos porcinos presenta diferencias de acuerdo al tipo de establo. En establos sin pavimentarse, se recogerá únicamente la parte sólida de la excreta y deberá instalarse una cámara de premezcla donde se mezclen la excreta y agua. La función será doble, de homogeneizador y de desarenador. Esta mezcla deberá ser mecánica o cerrada, puesto que manual es repulsivo y no se aconseja.

En establos de suelos pavimentándose se recolectará de forma conjunta la orina y la excreta, siempre que la topografía lo permita. La circulación de la mezcla y la introducción al digestor se hará por gravedad. El agua de limpieza se minimizará para no aumentar el volumen del digestor. Normalmente se

colectará el estiércol en baldes. En estos casos, se deberá instalarse una trampa de arena para evitar que esta entre en el digestor.

La aplicación al suelo ha sido y será la forma más beneficiosa de gestión de las producciones de excreta porcina, por sus características físico-químicas en virtud de los nutrientes, incluida la materia orgánica de la que nuestro suelo es en general deficitario. Superados los límites de tolerancia del suelo local cabría el transporte a zonas alejadas de los lugares de producción, lo cual, considerando que la excreta porcina tiene un alto contenido en agua (95%), tiene una vertiente económica difícil de soslayar.

En este sentido un tratamiento que estabilice y neutralice en la medida de lo posible los componentes orgánicos y nutricionales de la excreta porcina y que reduzca su volumen, facilitaría sin duda el transporte y aplicación a distancia del lugar de producción, evitándose la sobresaturación de los terrenos colindantes, como pasaría con la digestión anaerobia.

### **1.1.2 Los Residuos vacunos.**

Son muy útiles para iniciar el proceso de fermentación, puesto que estos tienen un contenido elevado de bacterias metanogénicas. Por el contrario, la producción de gas será menor que la obtenida por otro tipo de sustratos debido a dos factores: en primer lugar, los vacunos extraen mayor parte de nutrientes del forraje y dejan complejos lignosos del forraje más fibroso, que son muy resistentes a la degradación anaerobia, y en segundo lugar, porque realizan una digestión anaerobia parcial y reducen así el potencial de producción de la biomasa. La orina, que contiene menos nutrientes, contribuye poco a la producción específica de gas, pero incrementan notablemente las propiedades fertilizantes del biol, a la vez que diluye el sustrato, ahorrando agua. La carga del digestor será más fácil si disponemos de un establo con suelo pavimentado que recoja ambas cosas, estiércol y orina.

La mayor parte de los biodigestores simples se alimenta con excretas (estiércol y orina), puesto que estos residuos fermentan bien y producen una buena cantidad de biogás. La cantidad y la composición de las excretas dependen de:

- La cantidad de forraje ingerido y su digestibilidad; de media un 40-80% del contenido orgánico de éste se recoge en las excretas (los ganados por ejemplo excretan aproximadamente un tercio de las fibras del forraje)
- La calidad del forraje usado y del peso medio de los animales.

Es difícil dar valores medios de producción de excretas, puesto que existe una gran variación. En el caso del ganado, por ejemplo, la media puede ir desde 8 a 40 kg por cabeza de animal y día, dependiendo de la intensidad de crianza.

La producción media de excretas deberá ser medida y calculada previamente en base a la masa de los animales, puesto que existe una buena correlación entre estos dos factores.

Se muestra en la tabla 1.1 las cantidades medias de excretas, para animales que están todo el día en el establo y el establo está diseñado para recoger orina y estiércol.

Tabla 1.1: Valores estándares de masa de los animales y la producción de excretas. Fuente: (Mandujano Sánchez P, 2001)

Especies	Excreta diaria en función del peso del animal		Sólidos del estiércol fresco		Peso animales (kg)
	Estiércol	Orina	ST (%)	SV (%)	
Vacuno	5	4.5	16	13	135-800
Bufalo	5	4.5	14	12	340-420
Porcino	2	3	16	12	30-75
Ovejas/cabras	3	1-1.5	30	20	30-100
Gallinas	4.5		25	17	1.5-2
Humanos	1	2	20	15	50-80

Se muestran también las características de digestibilidad de los residuos de cría de animales en la tabla 1.2 del siguiente apartado.

Tabla 1.2: Características de digestión de los residuos de criaderos de animales. Fuente: (Mandujano Sánchez P, 2001)

Sustrato	Formación Espuma / Sedimentación		Digestión	Tiempo de Retención recomendado (días)	Ratio gas comparado estiércol ganado
Estiércol vacuno	No	No	Muy estable	60-80	100%
+ 10% paja	Elevada	Ligera	Muy estable	60-100	120%
Estiércol porcino	Ligera a elevada	Elevada a ligera	Problemas de desestabilización (p.e. acidificación, será necesario estiércol vacuno para arrancar)	40-60	200%
+ 10% de paja	Pesada	Ligera		60-80	...
Estiércol de pollo	Ligera a elevada	Elevada	Funcionamiento lento, siendo aconsejable el uso de estiércol de ganado; peligro de desestabilización	80	200%
Estiércol de oveja o cabra	Media a elevada	No	Estable	80-100	80%

Las deyecciones ganaderas pueden aplicarse directamente a los terrenos agrícolas como fertilizante, siendo esta simbiosis entre ganadería y agricultura beneficiosa para ambos y para el medioambiente.

## 1.2 Codigestión de residuos orgánicos.

La codigestión consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con el objetivo de:

- 1- Aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de proceso más eficaces.
- 2 - Compartir instalaciones de tratamiento.
- 3 - Unificar metodologías de gestión.
- 4 - Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.
- 5- Reducir costes de inversión y explotación.

El término codigestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. La codigestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico.

La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa, tanto en régimen termofílico como en el mesofílico (Brinkman, J., 1999) .

La principal ventaja de la codigestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado.

En Dinamarca funcionan alrededor de 20 plantas centralizadas de producción de biogás desde los años ochenta, lo que ha posibilitado el tratamiento combinado de residuos ganaderos y residuos orgánicos procedentes de la industria alimentaria, de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas, residuos de mataderos y la fracción orgánica de RSU (Angelidaki, I., &Ahring, B.K., 1997a).

Los residuos urbanos e industriales suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable (lípidos, carbohidratos y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, de 30 a 500 m<sup>3</sup>/t (Ahring, B.K., García, H., Mathrani, I., Angelidaki, I., 1992); (Angelidaki, I., & Ahring, B.K., 1997a); (Bardiya et al., 1996) mejorando la viabilidad económica de las plantas (Ahring *et al.*, 1992). Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas para su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoque problemas mecánicos (Banks, C.J., Humphreys, P.N., 1998).

En el caso de los residuos ganaderos, y en concreto el purín de cerdo, el potencial de producción de biogás es relativamente bajo debido a su poco contenido de materia orgánica, comparados con otros tipos de residuos, y la baja biodegradabilidad de la materia orgánica. Sin embargo, estos residuos son una buena base para la codigestión porque generalmente presentan un contenido de agua más alto que la mayoría de los residuos industriales, una mayor capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios.

En la figura 1.1 se muestra, de manera gráfica, el potencial de biogás de

diferentes sustratos, lo que demuestra la viabilidad del proceso de codigestión para un mejor aprovechamiento de estos residuales.

**Producción potencial de biogás**

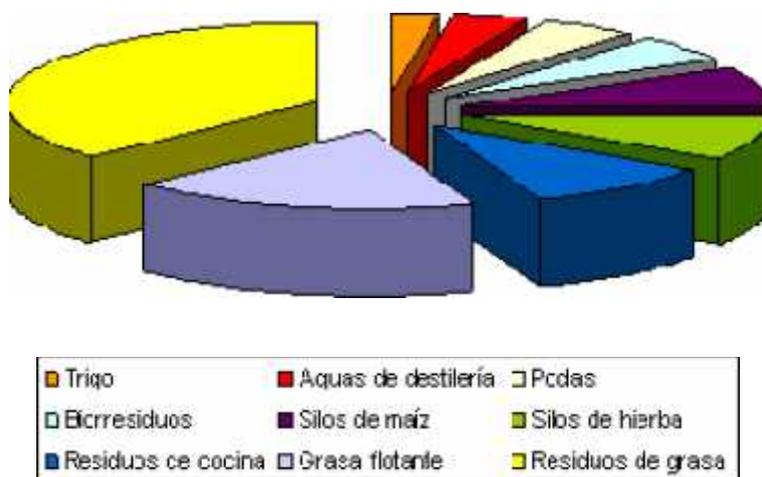


Figura 1.1: Potencial de producción de biogás desde varios sustratos. Fuente: (Sánchez P., 2006)

Se han encontrado buenos resultados para mezclas de varios tipos de residuos de industrias cárnicas y mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de metano, del orden de 47 m<sup>3</sup>/t de residuo introducido (Brinkman, J., 1999). También ha dado buenos resultados la codigestión de lodos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales, FORM (Di Palma L., Medici F., Merli C., Petrucci E., n.d.); (Hamzawi N., Kennedy K.J., McLean D.D., 1998) y la mezcla de residuos sólidos urbanos (RSU), principalmente a base de restos de vegetales, y aguas residuales urbanas, así como de lodos de depuradora y residuos de frutas y vegetales.

Los efectos beneficiosos de la introducción de mezclas de residuos ganaderos con residuos industriales se han puesto de manifiesto en plantas a escala real en varios países.

Diferentes tipos de residuos, principalmente de la industria agroalimentaria, se han testado ya como posibles cosustratos para la digestión de residuos ganaderos. La viabilidad de la codigestión de estiércol con residuos de la elaboración de piensos.

Debido al alto contenido en nitrógeno de este producto, inicialmente se produce la inmediata inhibición del proceso de digestión, aunque finalmente los

microorganismos son capaces de aclimatarse, disminuyendo la concentración de ácidos grasos volátiles y produciendo una alta y constante producción de biogás.

Diversos trabajos se han desarrollado teniendo como base la codigestión de estiércol bovino con tierras residuales procedentes del proceso de refinado de aceite, BBO (Bentonite Bound Oil). En general, la adición de este residuo a plantas a escala real produce una mayor estabilidad del proceso y un aumento en la producción de gas debido a la conversión en metano de la mayoría del carbono añadido, aunque no se observa una mejora en la tasa de conversión del estiércol en sí mismo.

La adición de BBO aumenta la producción de metano respecto a los sólidos volátiles añadidos, debido al mayor potencial de producción de biogás de la grasa contenida en la BBO que del estiércol, de 0.2 a 0.23 L de CH<sub>4</sub>/ gSV (Ahring, B.K., García, H., Mathrani, I., Angelidaki, I., 1992). Una hipótesis planteada para explicar la mejora en la producción de metano es la disminución de problemas de inhibición por amonio, debido a la capacidad de adsorción superficial de este material.

La codigestión de alpechín, residuo acuoso de la producción de aceite de oliva virgen, y estiércol bovino hace posible el tratamiento del primero mediante digestión anaerobia. La fermentación de alpechín solo presenta problemas, debido a la alta concentración de compuestos tóxicos (polifenoles), o a la baja concentración de nutrientes esenciales (N) y baja alcalinidad. La codigestión aumenta, además, el índice de producción de biogás del estiércol. La mezcla de alpechín y purín de cerdo ha mostrado buenos resultados en otros estudios, alcanzando niveles de degradación de DQO del orden del.

La mezcla de purín con lodos de depuradora, tanto en el rango termofílico como mesofílico, ha proporcionado resultados positivos (Wong, M. H., 1990); Flotats *et al.*, 1999). Se han obtenido también resultados positivos al mezclar estiércol de bovino y residuos lignocelulósicos, hojas machacadas, paja de trigo, restos vegetales pretratados con hidróxido sódico (Dar, G. H. y S. M. Tandon, 1987), así como la mezcla de purín con paja. Con residuos de tomate mejora la digestión del estiércol (Marchaim, U., 1992) (Trujillo, D. *et al* 1993) así como la mezcla de residuos bovinos y residuos de frutas y verduras.

Otros muchos residuos se exponen en la bibliografía como responsables de mejora de las producciones de biogás de los residuos ganaderos, tales como residuos de lechería (Gavala, H. N.; I. V. Skiadas, N. A. Bozinis y G. Lyberatos, 1996); (Desai, M.; V. Patel y D. Madamwar, 1994); y residuos de pescados y lodo de la industria cervecera.

En general, la mezcla de residuos ganaderos de diferentes tipos de ganado puede mejorar la producción de metano debido, principalmente, al mayor aporte de sólidos orgánicos, o a la dilución de algún efecto inhibitorio, como la concentración de amonio.

A pesar de los buenos resultados recogidos en la bibliografía, al mezclar diferentes tipos de residuos se corre el riesgo de introducción de sustancias tóxicas o inhibitoras para el proceso anaerobio, siendo preciso determinar la viabilidad de la mezcla, así como la proporción adecuada de cada sustrato, y la optimización de otros parámetros del proceso, como la temperatura, velocidad de carga, etc. Por otro lado, la introducción de sustratos altamente degradables, característica apreciada para mejorar la producción de gas, puede provocar problemas de sobrecargas orgánicas en el reactor y liberar compuestos inhibidores del crecimiento de los microorganismos.

Por ejemplo, el alto contenido en lípidos de algunos residuos industriales proporciona altos potenciales teóricos de producción de biogás, pero en función de la concentración y composición de ácidos grasos pueden resultar altamente tóxicos para el crecimiento microbiano (Galbraith, H., 1971.); (Hanaki., 1981); (Koster & Cramer, 1987); (Angelidaki & Ahring, 1992); (Hwu., 1997). Es, por tanto, necesario realizar estudios de viabilidad de las mezclas, determinando la presencia de tóxicos o inhibidores que puedan invalidar el nuevo residuo como cosustrato.

### **1.3 Proceso de digestión anaerobia.**

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno. (Guzmán Chinaa, J. M., 2013).

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90 % de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10 % de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50 % consumido en un sistema aerobio.

El proceso anaerobio ocurre de forma espontánea en la naturaleza para degradar la materia orgánica, produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes. (Ver Anexo A: Ventajas)

Ante los bajos precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología alternativa de digestión anaerobia volvió a decaer, aún así en algunos países industrializados se mantiene el desarrollo de programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero.

El principal exponente a nivel mundial es Dinamarca, quien en 1985, comenzó un programa de demostración, desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica.

El proceso de digestión anaerobia, frente a los procesos aerobios, transcurre con un menor desprendimiento calorífico, lo que determina un mayor contenido energético de los productos resultantes y consecuentemente, un mayor rendimiento energético del proceso. La fracción de la energía total disponible utilizada por los microorganismos para su propio crecimiento es mucho menor que en los sistemas aerobios.

La digestión anaerobia es un proceso complejo, que requiere bastante control para asegurar un correcto funcionamiento. Se han descrito gran cantidad de tóxicos e inhibidores del proceso, lo que puede hacer que el proceso no sea viable para determinados substratos. Es bastante sensible a las sobrecargas orgánicas por lo que la alimentación deberá ser lo más homogénea posible.

El biogás suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y el aprovechamiento del mismo, siendo necesario, en función del tipo de aprovechamiento, un sistema de depuración del mismo. Los costes de implantación son altos, mostrando un claro efecto de economía de escala, por lo que las instalaciones de pequeño tamaño no suelen resultar rentables. Es un gas difícilmente licuable, por tanto difícil de transportar.

Los principales substratos que se pueden utilizar en la digestión anaerobia son residuos agrícolas y ganaderos, cultivos energéticos, residuos industriales orgánicos, aguas residuales urbanas e industriales, lodos de depuradora y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Cada tipo de substrato plantea una serie de ventajas e inconvenientes, presentando diferentes potenciales de producción de biogás, debido al diferente contenido de materia orgánica y a la diferente composición de la misma (Flotats, X.; Bonmatí, A., Campos, E. & Antúnez, M., 1999)

### **1.3.1 Factores que influyen en el proceso de digestión anaerobia.**

Durante mucho tiempo se consideró a la digestión anaerobia como un sistema bifásico, compuesto por la fase no metanogénica en que las bacterias anaerobias transformaban los substratos en productos solubles y gaseosos incluyendo acetatos,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ; y otra, la metanogénica donde las bacterias formadoras de metano ( $\text{CH}_4$ ) utilizaban el acetato, mezclas de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  entre otros substratos para su metabolismo. Los términos con que se han identificado estas fases (acidificación y gasificación) no fueron del todo correctos; por cuanto, en la primera etapa no todos los productos que se forman son ácidos; así como no todos los productos gaseosos son derivados de la llamada etapa de gasificación.

Más tarde, se admitió que en la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en la que se distinguen cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- Hidrólisis o licuefacción: En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.
- Acidogénesis: En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.
- Acetogénesis: Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Metanogénesis: En esta etapa metabólica el  $\text{CH}_4$  es producido a partir del ácido acético o de mezclas de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ , pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas según la figura 1.2

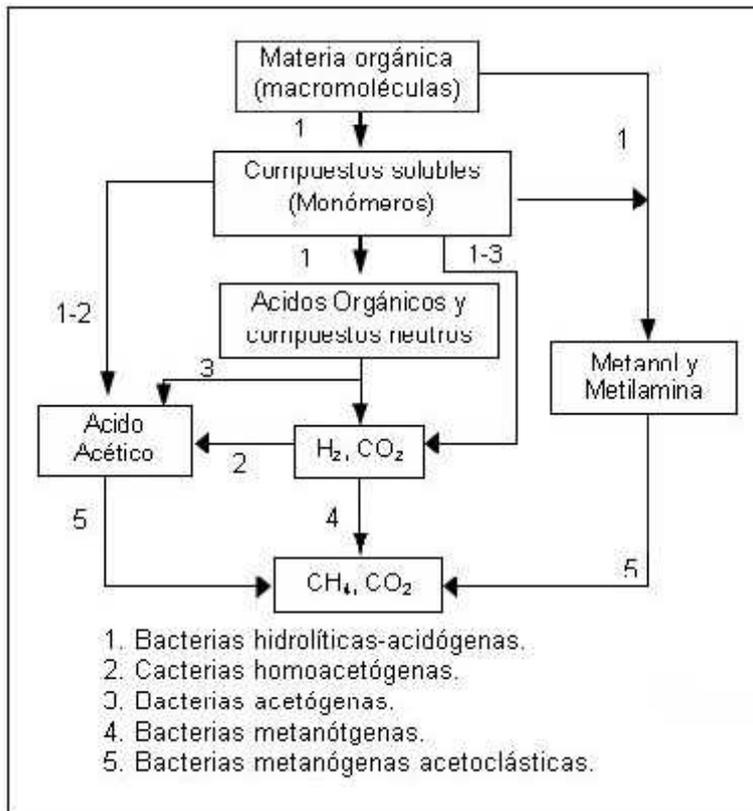


Figura 1.2: Etapas de la fermentación bacteriana. (Montalvo, S.J. y Guerrero, L., 2003) ; (Villalobos, C., 2009)

En el proceso de conversión anaerobia también intervienen otros factores como por ejemplo: del pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de sustancias tóxicas, el tiempo de retención, la relación carbono – nitrógeno (C:N ) y el nivel de carga (Ahring, B.K., García, H., Mathrani, I., Angelidaki, I, 1996).

- 

## H

El rango de pH óptimo es de 6.6 a 7.6. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y el acetato tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, estos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. Sin embargo, el equilibrio  $\text{CO}_2$ -bicarbonato opone resistencia al cambio de pH. (Marchaim, U., 1992)

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el digestor. El primero es parar la alimentación del digestor y dejar que las bacterias

metanogénicas asimilen los AGV, de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Deteniendo la alimentación disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los AGV. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del digestor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos.

El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para aumentar el pH, como el agua con cal. Las cenizas de soda (carbonato de sodio) constituyen una variante más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio. Los requerimientos de buffer varían según el residual, los sistemas de operación y tipos de operación. Las normas para calcular estos requerimientos han sido desarrolladas por Pohland y Suidon (1978).

- 

### **temperatura**

Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Para los digestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el digestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas.

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales, el primero es el psicrófilo (10 a 20 °C) el segundo el mesófilico (de 20 a 45 °C), el tercero es el termófilico (por encima de 45 a 55 °C).

El óptimo puede ser de 35 °C a 55 °C. La ventaja de la digestión termófilico es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesofílica, así

que los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general. (Gunnerson, C.G. and Stuckey D.C., 1986)

Se han realizado numerosos trabajos sobre la digestión termofílica en países templados D.C., 1986). Sin embargo, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales hasta 55 °C. El tercer rango (psicrofílico) ocurre entre los 10 y 25 °C (Cullimore, D., Maule, R. and Mansuy, N., 1985); (Paris, J. M., Vicent, T., Balague, M.D. and Cassu, C., 1988) y (Wellinger, A., Sutter, K. & Egger, K., 1998). Existen algunas restricciones para el uso de esta temperatura en la digestión anaerobia, como son la necesidad de utilización de: reactores anaerobios de cama fija (UASB), inóculos mesofílicos, un tiempo de retención alto y mantener una acidificación baja (Marchaim, U., 1992)

- 

#### **utrientes**

Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos.

Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia de nutrientes no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran en más que suficientes las cantidades de nutrientes.

Por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, pero el período de producción de biogás es más prolongado. Los materiales con diferentes relaciones de C:N difieren grandemente en la producción de biogás. Por ejemplo, la relación de C:N en residuales porcinos es de 9 a 13; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; para humanos es de 8 y para residuos vegetales es de 35. La relación óptima se considera en un rango de 20:1 hasta 30:1, una relación menor de 20:1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio (Guzmán 2015).

- 

#### **oxicidad**

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados. Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. (Marchaim, U., 1992)

En el caso del nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos es particularmente importante. Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre debe ser mantenido en 80 ppm. Sin embargo, una concentración más alta, alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada y reporta señales iniciales de inhibición a una concentración de  $\text{NH}_4^+$  de alrededor de 800 ppm. (Gunnerson, C.G. and Stuckey D.C., 1986). De Baere *et al* (1984), citado por (Marchaim, U., 1992)

Se debe tener precaución para evitar la entrada al digestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas ha reportado la reducción de gas cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos. (Rodriguez, L., 1996).

- 

### **ivel de Carga**

Este parámetro es calculado como la materia seca total (MS) o materia orgánica (MO) que es cargada o vertida diariamente por metro cúbico de volumen de digestor. La MO o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la MS o sólidos totales (TS), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 500 °C (AOAC 1980). Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10 %. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10 % en la mayoría de los casos. Por eso, los residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados.

La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de MS o SV. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura. En China, la concentración óptima es del 6% en el verano a temperaturas entre 25-27 °C y entre 10 y 12 % en la primavera a temperaturas de 18-23 °C.

- 

### **tiempo de retención**

Existen dos parámetros para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el digestor:

1. El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) que se determinan dividiendo la cantidad de MO o SV que entra al digestor entre la cantidad de MO que sale del sistema cada día. El TRSB es asumido para representar la media del tiempo de retención de los microorganismos en el digestor.
2. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el volumen del digestor (VD) entre la media de la carga diaria.

Estos parámetros son importantes para los digestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del TRSB y del TRH a través de la retención de la biomasa. La medición del TRH es más fácil y más práctico que el TRSB al nivel de las granjas (Ahring, B.K., García, H., Mathrani, I., Angelidaki, I, 1996).

#### **1.4 Tecnologías de digestión anaerobia.**

Los diseños utilizados para digestión anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, siguiendo diferentes métodos. El reactor más simple es el de mezcla completa (RMC, CSTR en inglés), y es el más utilizado para residuos.

##### Reactor de mezcla completa sin recirculación

Consiste en un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de substrato como de microorganismos (ver Figura 1.3). Esto se consigue mediante un sistema de agitación. Ésta puede ser mecánica (agitador de hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumática

(recirculación de biogás a presión), y nunca violenta. Esta tipología de reactor no ofrece problemas de diseño y es el más utilizado para residuos. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente. Si la velocidad de reacción depende de la concentración, como es el caso de los procesos biológicos, la velocidad será baja, y la forma de compensarla es aumentando el tiempo de reacción.

#### Reactor de mezcla completa con recirculación

Este sistema tiene el nombre de reactor anaerobio de contacto y sería equivalente al sistema de fangos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales (ver en la Figura 1.3).

Se comprueba que regulando la recirculación es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa.

Esto es a costa de aumentar el tiempo de retención de los microorganismos, gracias a su confinamiento en el sistema mediante la separación en el decantador y re-circulación. Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para las que sea posible una separación de fases líquido-sólido, con la fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de desgasificación, sin el cual la decantación se puede ver impedida.

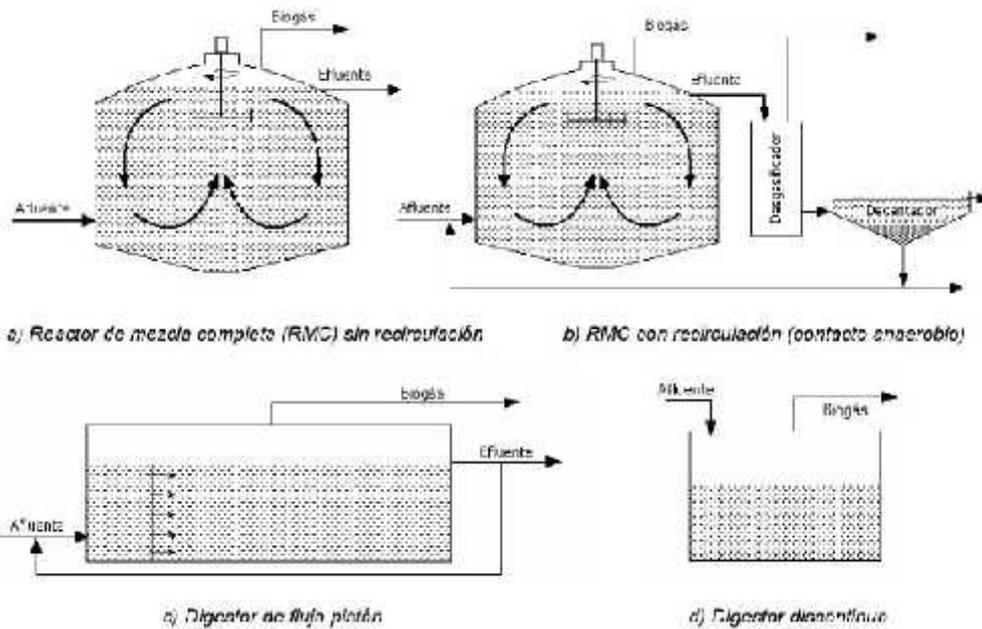


Figura 1.3. Esquema de reactores sin retención interior de biomasa. Fuente: GIRO.

#### Reactor con retención de biomasa, sin recirculación.

Si se consigue retener bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de reactor de mezcla completa, es posible reducir el tiempo de retención por debajo del reactor RMC tomado como referencia. Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos:

- a) inmovilización sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidizados);
- b) agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad (reactores de lecho de lodos). Estos sistemas se esquematizan en la Figura 1.4 y se comentan a continuación.

Aunque los reactores de flujo pistón (Figura 1.3.) no estarían encuadrados en este apartado, el hecho de que la tasa de crecimiento de microorganismos sea más elevada a la entrada del reactor, donde la concentración de sustrato también es más elevada, hace que la concentración media en el reactor sea superior a la correspondiente a mezcla completa, o en todo caso superior a la de salida, con lo cual el tiempo de retención será inferior. Este tipo de reactor ha sido aplicado a diferentes tipos de residuos orgánicos, como fracción orgánica de residuos municipales (configuración vertical y flujo ascendente), residuos de porcino y bovino, y una de las dificultades es la debida a la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo, en las

configuraciones horizontales, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal (reintroducción de biogás a presión en la base del digestor si el reactor es horizontal, por ejemplo).

El filtro anaerobio: En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte —formando biopelículas—, columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste, con flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico o plástico. Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente, Figura 1.4), y en este caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente, y en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas, recibiendo el nombre de lecho fijo con flujo descendente (Figura 1.4). En caso de utilizar un soporte orientado verticalmente con flujo ascendente y un sustrato lentamente degradable, con elevado tiempo de retención, la retención por sedimentación de los fragmentos de biopelículas desprendidos adquiere un efecto de importancia en la actividad del reactor.

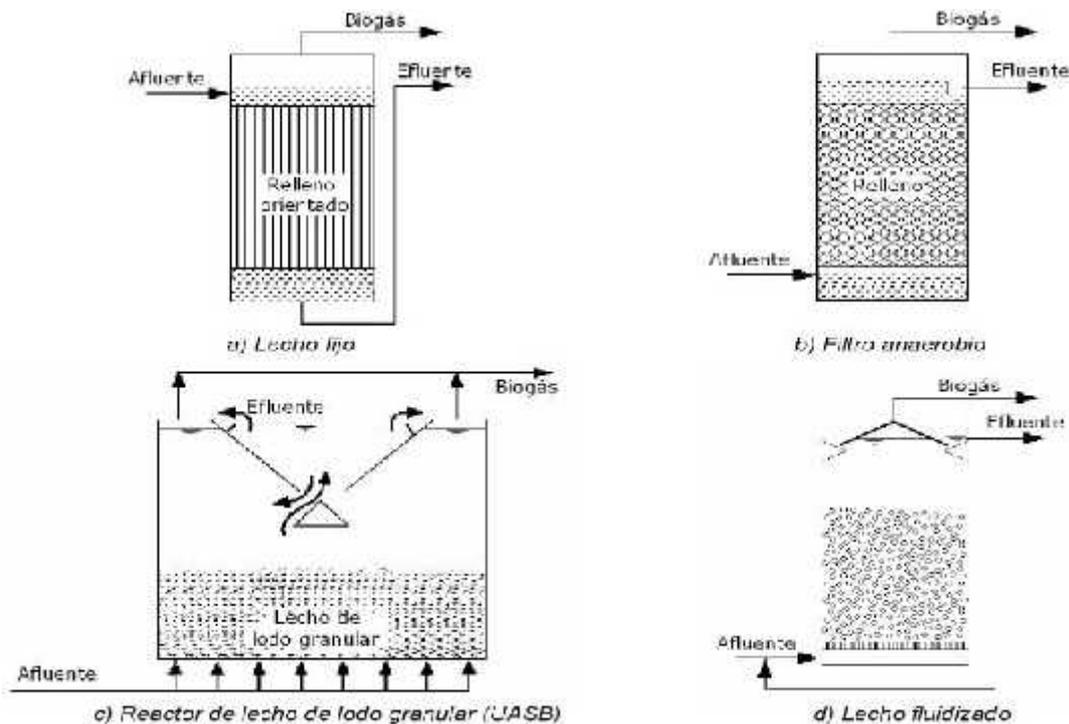


Figura 1.4. Esquema de reactores con retención interior de biomasa. Fuente: GIRO.

Este sistema ha sido extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y existen experiencias piloto para la fracción líquida de residuos ganaderos. El coste de inversión es un limitante importante para su implantación.

El lecho fluidizados: En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelículas, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizados mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación (Figura 1.4). Igual que el filtro, puede ser aplicado a aguas residuales, especialmente de la industria agroalimentaria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos ganaderos, aunque las experiencias en este ámbito son muy limitadas.

El reactor de lecho de lodos: En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido(biomasa)/líquido/gas. El diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Figura 1.4, el cual está siendo extensamente aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. Es el diseño más simple de entre los sistemas con retención de biomasa y el único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule, esto es, que forma agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición del agua a tratar y mantener una operación adecuada.

### Sistemas discontinuos.

En un sistema discontinuo, la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Aquí el concepto de tiempo de retención no tiene sentido y se hablaría de tiempo de digestión.

Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo.

Estos reactores han sido aplicados a residuos con una alta concentración de sólidos que dificultan la adopción de sistemas de bombeo, tales como residuos de ganado vacuno con lecho de paja.

#### Otros sistemas

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar.

#### Sistemas de dos etapas

Estos consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc.

#### Sistemas de dos fases

A diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. La separación es de tipo cinético, controlando el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a las más altas tasas de crecimiento de las bacterias acidogénicas. Este tipo de sistema ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos con fibras y, en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis.

Sistemas híbridos: En general serán sistemas que combinen los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos. Los dos sistemas anteriores podrían considerarse como tales. También se han realizado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos, en los cuales la parte baja de éste se comporta como un UASB y la parte superior como un filtro.

## **1.5 Usos y aplicaciones de los subproductos del proceso de digestión anaerobia.**

El biogás puede ser utilizado para generar energía eléctrica como sustituto de los combustibles convencionales, su uso puede reducir hasta en un 40 % el costo del Kwh generado. Las experiencias en Cuba son muy escasas solamente se conoce que en Santiago de Cuba ya se ha puesto a funcionar un grupo electrógeno de elevado tiempo de explotación en la localidad de Maguallal, municipio San Luis, atendido por la Universidad de Oriente. La forma de generación de la energía eléctrica en Cuba ha cambiado en los últimos años hacia la generación distribuida y de esta forma se reduce el costo diferencial entre las inversiones necesarias para suministrar un KW de demanda en el punto de uso final. En el escenario centralizado, la industria eléctrica desperdicia 2/3 del combustible primario sin considerar las pérdidas en transmisión y distribución.

Los subproductos de la digestión anaerobia son agua y digestato (sólido); para su posterior uso hay que tener en cuenta la legislación en materia de vertidos y las composiciones de los efluentes del proceso. Muchas veces no se pueden utilizar tal y como salen del digestor, por lo que se ha de aplicar una serie de tratamientos como decantación/sedimentación, secado, para su posterior utilización en el riego, fertilización de campos o venta como compost.

El efluente de los digestores es uno de los productos finales de la fermentación anaeróbica y, aunque proviene de los desechos orgánicos con que se alimenta el digestor, tiene características completamente distintas a las de esos desechos; por ejemplo: no tiene olor desagradable, su relación carbono-nitrógeno es menor, las semillas de malas hierbas han sido destruidas, y no tiene condiciones que permitan la proliferación de organismos patógenos, ni de moscas u otros insectos indeseables.

La materia orgánica, que consiste en organismos vivos (animales o vegetales) o sus desechos, puede ser incorporada al suelo como abono, luego de que haya sufrido una degradación microbiológica. La calidad de la materia orgánica

que se desee usar como abono, puede mejorarse por medio de diferentes procesos; el más común es el de la degradación aeróbica. (Ver Anexo B: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado).

### **1.6 Aspectos a considerar en el análisis de una planta de biogás.**

El futuro y el horizonte económico de las inversiones difícilmente pueden conocerse con precisión, pues una serie de factores o agentes externos incontrolables y ajenos al propio proyecto condicionan e influyen sobre los resultados. El desembolso inicial, los flujos netos de caja, e incluso la duración de la inversión, en muchos casos se comportan de forma aleatoria. En el mundo económico actual, se exige con gran anticipación determinar la conveniencia de implementar una cierta iniciativa de conversión mediante la estimación de los costos y beneficios que se asocian a su puesta en marcha y su futura operación, el inversionista se mueve casi siempre en el campo de la incertidumbre. Lo anterior es así porque este carácter anticipado determina que el resultado del proyecto pueda estar del todo equivocado, y no necesariamente por un mal trabajo del evaluador, ya que el resultado final dependerá del comportamiento de las variables que lo condicionan y sobre las cuales este no tiene ningún grado de control. Estas variables pueden ser: La Tecnológica, La Económica y Ambiental

#### **1.6.1 Evaluación Técnica.**

En la tabla 1.3 se proponen valores de diferentes parámetros que pueden causar inhibiciones o alteraciones en el proceso de biometanización y cuáles son los rangos aceptables de variación de los mismos. Estos parámetros pueden ser utilizados para la evolución del funcionamiento de una planta de Biogás, y fueron agrupados en agruparon en sustrato, digestor, digerido y biogás.

Tabla 1.3: Parámetros operacionales de control. Fuente:(López Mendosa, C; López Solís, O., 2009)

<b>Medida</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Intervalo de variación aceptable</b>
<b>Monitoreo del proceso</b>		
Temperatura	Mantenerla constante	$\pm 1$ °C
Carga de entrada (Kg. DQO/d)	Prevención de las saturaciones	+50% para DQO disuelta +100% para DQO suspendida
<b>Control del proceso</b>		
Concentración de los ácidos	Detección de posibles volátiles inestabilidades del proceso	Total: 200-500g como AAc/m AAc: 200-500g como AAc/m APr: 50-100g como AAc/m
Producción de gas	Control de las bacterias metanogénicas	$\pm 20\%$ /día(en función de la carga orgánica de entrada)
pH	Control de la inestabilidad	6-7. Variación $\pm 5\%$ /día
<b>Control del funcionamiento</b>		
Concentración de materia orgánica en el afluente	Control de la eficiencia del tratamiento	Variación $\pm 10\%$ /día
Producción de gas / calidad	Control de la media producida de metano	Variación $\pm 20\%$ /día Contenido de metano 60-75 %
Calidad del lodo digerido (% de volátiles)	Control del funcionamiento de la estabilización de la	60-70% normal, variación $\pm 5\%$

## **Capítulo 2.**

### **Diagnóstico del proceso de producción de biogás de la planta.**

En este capítulo se hace una descripción del sistema de generación de residuales destinada a la producción de biogás, para lo cual a través de visitas efectuadas a la planta y de consultas a especialistas y personal se detectaron las principales dificultades. La caracterización de los parámetros que miden la eficiencia de la planta da una idea más clara de su estado, con vista a la elaboración de acciones de mejoras.

#### **2.1 Caracterización general de la planta objeto de estudio.**

Se debe realizar la caracterización de la planta, mencionando su misión, la ubicación, la extensión territorial, la descripción del área socio-administrativa y de producción, en esta se incluye la cantidad y composición de las estructuras arquitectónicas que se emplean en la cría de animales, el inventario de cabezas existentes y los horarios de limpieza establecidos en sus áreas.

Es de gran importancia realizar un trabajo de campo para acumular información; pudiera emplearse la entrevista como una opción para su recogida y se intenta provocar reflexiones en el transcurso del diálogo que lo coloquen en un plano de conciencia sobre lo que se les inquieren, para profundizar en el tema y pueda aportar el máximo de conocimientos. Dentro de esta la no estructurada, en caso especial de ésta, la localizada, si el entrevistador dispone de una lista de cuestiones relativas al problema a investigar, se localiza la entrevista, sin una estructura formalizada.

#### **2.2 Descripción general del proceso de producción de biogás.**

En toda planta que se desee realizar una descripción general del proceso de producción de biogás se debe mencionar la forma en que se suministran y el sistema de transportación de los residuos que constituyen la materia orgánica necesaria para su operación.

Además mencionar el diseño y tecnología del biodigestores, los productos y subproductos obtenidos y el tratamiento de cada uno de ellos. Sería conveniente realizar un Flujo grama de los residuales utilizados y del proceso de producción de biogás en la planta objeto de estudio, para así facilitar al lector una mejor comprensión del tema que se trata.

### **2.3 Determinación de los parámetros de control, de operación e indicadores de eficiencia de la planta de biogás.**

Para la obtención de estos cálculos se propone primeramente determinar la cantidad de días necesarios para el muestreo, en este caso es conveniente el no probabilístico, el cual no dependerá de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la exploración ó de quien lo hace; aquí el procedimiento no es mecánico, ni con base en formulas, sino que depende del proceso de toma de decisiones de una ó grupos de personas y luego las muestras seleccionadas obedecerán a otros criterios de investigación. Desde la visión cuantitativa es útil para determinar el diseño de estudio que requiere no tanto una representatividad de elementos de una población, sino una cuidadosa y controlada elección de las especificidades planteadas en el problema y para el enfoque cualitativo, al no interesar tanto la probabilidad de generalizar los resultados, son de gran valor, pues logran obtener los casos que le interesan al investigador y que llegan a ofrecer una gran riqueza en la recolección y análisis de los datos. Se toma como referencia caracterizaciones de plantas realizadas con anterioridad.

También se deben establecer los puntos en los que se tomarán las muestras, que serán determinados según argumentos del autor, teniendo en cuenta la complejidad y principales características de las plantas. Luego se comparan los valores obtenidos con los referidos como óptimos por diferentes autores.

Según la revisión bibliográfica realizada los parámetros de control que se deben calcular son: pH, ST, SV, alcalinidad, FOS/TAC, Nitrógeno amoniacal (N NH<sub>4</sub>), Composición de biogás, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.

Los análisis se efectúan en el laboratorio de Recursos Hidráulicos a partir del financiamiento del proyecto de la Universidad de Cienfuegos, por presentar tecnología de primer nivel necesaria para estos fines. Las técnicas utilizadas aparecen en el manual de laboratorio, elaborado por investigadores del grupo de Biomasa de la UNISS. A continuación se muestra una pequeña descripción de los métodos y equipos que se propone utilizar en esta investigación.

**Sólidos Totales (ST):** Se determinan mediante el peso del residuo seco, secado a 105°C en estufa durante 24 horas, referido al peso de materia fresca inicial. Para el cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$ST = \frac{(\text{Peso}_{\text{salida}} - \text{Tara})}{(\text{Peso}_{\text{entrada}} - \text{Tara})} * 100\%$$

**Sólidos Totales Volátiles (SV):**

La determinación se realiza sobre la misma muestra, mediante calcinación, en una mufla, a 550°C durante 4 horas.

Los sólidos totales volátiles contenidos en el residuo se pueden calcular en base a materia fresca: *SV (% MF)*; o en base a los sólidos totales o materia seca: *SV (% ST)*.

$$SV(\% ST) = 100\% - \text{Cenizas}$$

$$\text{Cenizas} = \frac{(\text{Peso}_{\text{salida}} - \text{Tara})}{(\text{Peso}_{\text{entrada}} - \text{Tara})} * 100\%$$

$$SV (\% MF ) = \frac{ST * STV (\% ST )}{100}$$

**Nitrógeno amoniacal:**

Se analizó por el método de destilación, con un destilador marca Vapodest, siguiendo el método 4500-NH<sub>3</sub> B de Standard methods for examination of water and wastewater.

El cálculo de la concentración de nitrógeno amoniacal expresado en mg de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L sería:

$$N - NH_4^+ (mg / L) = \frac{(V_m - V_{bl}) * N_{HCl} * M_{HCl}}{V_m}$$

donde  $V_m$  es volumen de muestra usado.

### **Potencial de Hidrógeno (pH)**

El pH es la forma común de expresar la concentración del ion hidrógeno en las soluciones acuosas:

$$pH = - \log_{10} [H^+].$$

Se midió directamente sobre la muestra, con un electrodo conectado a un medidor de pH/mVHanna. Se realizó la calibración con disoluciones tampón estándar CRISON de pH 7,02 y 4,00 a 28 °C.

### **Alcalinidad y FOS/TAC**

La alcalinidad de un agua es su capacidad para neutralizar ácidos y constituye la suma de todas las bases valorables. La alcalinidad depende del pH de punto final utilizado.

En el presente trabajo se propone seguir la metodología propuesta por el Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundes forschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) y referida por Iza, 1995. Es un test de determinación rápida con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida (FOS) y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación (TAC). Es nombrado por sus siglas FOS/TAC, donde FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se expresa como mg Ac. Acético/L, y TAC significa Totales Anorganisches Carbonat, esto es, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se expresa en mg CaCO<sub>3</sub>/L.

Según el manual de laboratorio de biogás los valores óptimos para los parámetros referidos y la propuesta de medida para una planta de acuerdo al valor obtenido serían:

Alcalinidad total (TAC) > 10 000 mg/L, aunque valores superiores a 2500 se consideran buenos, lo cual depende del tipo de sustrato alimentado.

La Relación ácidos grasos volátiles/ Alcalinidad total (*FOS/TAC*) se considera óptima en un rango entre 0.3- 0.4. Para otros valores obtenidos se recomienda ver tabla 2.1:

La valoración se realizó con ácido sulfúrico a 0.1 N hasta 5 para el TAC y luego, en forma continua, hasta 4.4 para el FOS.

El instrumental utilizado fue el mismo que el utilizado para medir el pH, una bureta para ácidos y agitador magnético.

Para los cálculos se utilizaron las siguientes expresiones:

$$TAC = ml H_2SO_4 * 250$$

$$FOS = ((A * 1.66) - 0.15) * 500$$

donde A = ml gastados de  $H_2SO_4$  de pH 5 hasta 4.4

Tabla 2.1 Valores óptimos de la relación ácidos grasos volátiles/ Alcalinidad total.

FOS/TAC	Medida
>0.6	Dejar de alimentar el reactor
0.5–0.6	Disminuir la carga orgánica a alimentar al reactor
0.4–0.5	La carga orgánica del digestor es demasiado grande. Es necesario mantener un buen control del digestor.
0.3–0.4	La producción de biogás alcanza su máximo. Se debe mantener la alimentación de la biomasa a esa carga orgánica.

0.2–0.3	La alimentación es baja, se debe aumentar la cantidad de biomasa o carga orgánica
<0.2	La alimentación de biomasa es muy baja. Aumentar rápidamente la cantidad de biomasa o carga orgánica.

Fuente: Manual de laboratorio de Recursos Hidráulicos Cienfuegos.

### **Composición de biogás, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>**

Para la determinación de la composición del biogás se utilizó un analizador de gas marca SEWERIN SR2-DO, comercializada por La Hermann Sewerin GmbH, Robert-Bosch-Straße 3 · 33334 Gütersloh · Germany, y calibrado en agosto 2011 en la Universidad de Humbolt, Belín, Alemania.

Luego se requiere calcular el gasto de agua en la limpieza de las áreas, los estimados de los residuales generados y los m<sup>3</sup> de biogás producidos diariamente en la planta objeto de estudio, para posteriormente realizar el cálculo de los parámetros de operación e indicadores de eficiencia.

Para determinar el gasto de agua se propone tomar como referencia la norma establecida por (IIP, 2005) de 60 litros (L) por Unidad de Ganado Equivalente (UGE) en el área porcina.

Para determinar las cantidades disponibles de cada residuo se debe realizar la descripción de los recursos en existencia en la granja objeto de estudio.

Lo más importante en este paso es realizar los cálculos, referidos a la cantidad de residuo que se obtiene realmente en cada una de las áreas que conforman la granja objeto de estudio. Se debe tener en cuenta que cada tipo de residuo es diferente, y para cada uno de ellos existe un índice diferente como se muestra a continuación:

Indicadores referidos a la generación de residuales:

- ✓ 1 cerdo de 50kg excreta 2,5kg/día

En la presente investigación se propone aplicar el método para el estimado de la producción de biogás, siguiente:

Por índices de producción:

✓ 1kg de excreta porcina o vacuna produce entre 0,03 – 0,05m<sup>3</sup>/día de biogás

Este método se basa en indicadores referidos de la literatura que toman como base el potencial de biogás producido de acuerdo al sustrato utilizado. No se tiene en cuenta tecnología, parámetros de operación y los efectos sinérgicos de la codigestión. Brinda un estimado teórico de la producción de biogás.

Los parámetros de operación del proceso que se propone calcular son los siguientes:

**Tiempo de retención hidráulica (TRH)** en días, indica el tiempo medio en el que la mezcla de residuos incorporada al digester permanece en su interior sometida a la digestión anaerobia. Se calcula dividiendo el volumen útil del digester entre el caudal de alimentación.

$$TRH = \frac{m^3 \text{ reactor}}{m^3 / \text{día}} \quad (\text{días})$$

**Carga orgánica volumétrica (COV)** en kgSV/m<sup>3</sup>d, es la relación de la cantidad de materia orgánica, expresada normalmente en unidades de demanda química de oxígeno (DQO) ó de sólidos volátiles, por unidad de reactor y unidad de tiempo, siendo directamente dependiente de la concentración del sustrato y del tiempo de retención.

$$COV = \frac{G * SV \% MF}{m^3 \text{ reactor} \quad \text{día}} \quad (\text{kgSV} / m^3 d)$$

Dónde:

G: Alimentación en  $\text{kg}/\text{día}$

SV%MF: Sólidos volátiles en materia fresca.

Como indicadores de la eficiencia de las plantas se usan los siguientes:

**Rendimiento de biogás ( $y_B$ ) y de metano específico ( $y_{CH_4}$ ),** consiste en calcular el volumen de biogás o metano producido por cada gramo de materia orgánica añadida (medida como sólidos volátiles o DQO). Este índice se calcula como el volumen neto de producción de biogás o metano dividido por la cantidad total de sólidos volátiles añadidos (resultado de multiplicar la concentración por la masa total de substrato en el reactor). Se calcula tanto para el biogás acumulado como para el metano.

$$y_B = \frac{m^3 \text{ biogás} / d}{kg \text{ SV}_{a \text{ lim}} / d} \quad (m^3 / kgSV)$$

$$y_{CH_4} = \frac{m^3 \text{ biogás} / d * \% CH_4}{kg \text{ SV}_{a \text{ lim}} / d} \quad (m^3_{CH_4} / kgSV)$$

**Productividad de biogás (PB)**

$$PB = \frac{m^3 \text{ biogás} / d}{m^3_{\text{ reactor}}} \quad (m^3 / m^3 d)$$

**Eficiencia de remoción de Sólidos Volátiles (E)**

$$E = \frac{SV_{\text{entrada}} - SV_{\text{salida}}}{SV_{\text{entrada}}} * 100\% \quad (\%)$$

## **2.4 Herramientas empleadas para identificar las principales dificultades y propuestas de mejoras.**

En este epígrafe se deben determinar las principales causas que inciden en la afectación de la estabilidad y eficiencia de la planta de biogás, para ello se propone el trabajo con expertos y la utilización de la herramienta muy conocida como el método Delphi.

### **2.4.1 Procedimiento para la selección y análisis de los riesgos del proyecto mediante el método Delphi.**

El método Delphi fue creado en la década de los cuarenta por los señores T.J.Cordon y Olaf Helmer, y se ha convertido en una herramienta fundamental en el área de las proyecciones tecnológicas, incluso en el área de la administración clásica y operaciones de investigación. Existe una creciente necesidad de incorporar información subjetiva (por ejemplo el análisis de riesgo) directamente en la evaluación de los modelos que tratan con problemas complejos que enfrenta la sociedad, tales como, medio ambiente, salud, transporte, comunicaciones, economía, sociología, educación y otros.

El Método Delphi es un programa cuidadosamente elaborado, que sigue una secuencia de interrogaciones individuales a través de cuestionarios, de los cuales se obtiene la información que constituirá la retroalimentación para los cuestionarios siguientes. Consiste en la utilización sistemática del juicio intuitivo de un grupo de expertos para obtener un consenso de opiniones, el mismo tiene más efectividad si se garantizan: el anonimato, la retroalimentación controlada y la respuesta estadística de grupo.

Se utiliza como fuente de información un grupo de personas a las que se les atribuye un conocimiento elevado del tema que se va a tratar y se emplea cuando tiene lugar alguno de las siguientes condiciones:

- No existen datos históricos con los que trabajar.
- Tiene más influencia en la evolución el impacto de los factores externos que el de los internos.
- Las consideraciones éticas o morales dominan sobre las económicas y tecnológicas en un proceso evolutivo.

Este método pretende extraer y maximizar las ventajas que presentan los métodos basados en grupos de expertos y minimizar sus inconvenientes. Para ello se aprovecha la sinergia del debate en el grupo y se eliminan las interacciones sociales indeseables que existen dentro de todo grupo. De esta forma se espera obtener un consenso lo más fiable posible del grupo de expertos. El mismo presenta tres características fundamentales:

✦ Anonimato: Durante un Delphi, ningún experto conoce la identidad de los otros que componen el grupo de debate. Esto tiene una serie de aspectos positivos, como son:

1. Impide la posibilidad de que un miembro del grupo sea influenciado por la reputación de otro de los miembros o por el peso que supone oponerse a la mayoría. La única influencia posible es la de la congruencia de los argumentos.
2. Permite que un miembro pueda cambiar sus opiniones sin que eso suponga una pérdida de imagen.
3. El experto puede defender sus argumentos con la tranquilidad que da saber que en caso de que sean erróneos, su equivocación no va a ser conocida por los otros expertos.

✦ Iteración y realimentación controlada: La iteración se consigue al presentar varias veces el mismo cuestionario. Como, además, se van presentando los resultados obtenidos con los cuestionarios anteriores, se consigue que los expertos vayan conociendo los distintos puntos de vista y puedan ir modificando su opinión si los argumentos presentados les parecen más apropiados que los suyos.

✦ Respuesta del grupo en forma estadística: La información que se presenta a los expertos no es sólo el punto de vista de la mayoría, sino que se presentan todas las opiniones indicando el grado de acuerdo que se ha obtenido.

Ventajas del Método Delphi:

- ✦ Permite la formación de un criterio con mayor grado de objetividad.
- ✦ El consenso logrado sobre la base de los criterios es muy confiable.

- ★ La tarea de decisiones, sobre la base de los criterios de expertos, obtenido por éste tiene altas probabilidades de ser eficiente.
- ★ Permite valorar alternativas de decisión.
- ★ Evita conflictos entre expertos al ser anónimo, (lo que constituye un requisito imprescindible para garantizar el éxito del método) y crea un clima favorable a la creatividad.
- ★ El experto se siente involucrado plenamente en la solución del problema y facilita su implantación. De ello es importante el principio de voluntariedad del experto en participar en la investigación.
- ★ Garantiza libertad de opiniones (por ser anónimo y confidencial). Ningún experto debe conocer que a su igual se le está solicitando opiniones.

#### Desventajas del Método Delphi:

- ✦ Es muy laborioso y demanda tiempo su aplicación, debido a que se requiere como mínimo de dos vueltas para obtener el consenso necesario.
- ✦ Es costoso en comparación con otros, ya que requiere del empleo de: tiempo de los expertos, hojas, impresoras, teléfono, correo, entre otros.
- ✦ Precisa de buenas comunicaciones para economizar tiempo de búsqueda y recepción de respuestas.
- ✦ Debe ser llevado a cabo por un grupo de análisis: los expertos como tales.
- ✦ Se emiten criterios subjetivos, por lo que el proceso puede estar cargado de subjetividad, sometido a influencias externas. De aquí la necesidad de aplicar varias vueltas, buscar técnicas variadas de análisis para obtener un consenso y pruebas estadísticas para determinar su grado de confiabilidad y pertinencia.

En la aplicación práctica de este método es preciso considerar metodológicamente dos aspectos fundamentales: selección del grupo de expertos a encuestar y la elaboración del cuestionario o los cuestionarios. Pero lo más importante es determinar: ¿A quiénes se pueden considerar expertos? Se define como experto el individuo en sí, grupo de personas u organizaciones capaces de ofrecer valoraciones conclusivas de un problema en cuestión y hacer recomendaciones respecto a sus momentos fundamentales con un

máximo de competencia. De esta definición se infiere, como requisito básico para la selección de un experto, que éste tenga experiencia en el tema a consultar, dado por sus años de trabajo, y que puedan ser complementados con: conocimientos teóricos adquiridos a través de las distintas formas de superación, y grado académico o científico alcanzado en relación al tema, entre otros.

De manera resumida los pasos que se llevarán a cabo para garantizar la calidad de los resultados, para lanzar y analizar la Delphi deberían ser los siguientes:

#### Fase 1: formulación del problema

Se trata de una etapa fundamental en la realización de un Delphi. En este paso se definen los elementos básicos del trabajo, el objetivo a alcanzar, la situación actual y los componentes o elementos necesarios para llevar a cabo el trabajo.

En un método de expertos, la importancia de definir con precisión el campo de investigación es muy grande por cuanto que es preciso estar muy seguros de que los expertos reclutados y consultados poseen la misma noción de este campo. La elaboración del cuestionario debe ser llevada a cabo según ciertas reglas: las preguntas deben ser precisas, cuantificables (versan por ejemplo sobre probabilidades de realización de hipótesis y/o acontecimientos, la mayoría de las veces sobre datos de realización de acontecimientos) e independientes (la supuesta realización de una de las cuestiones en una fecha determinada no influye sobre la realización de alguna otra cuestión).

#### Fase 2: elección de expertos

La etapa es importante en cuanto que el término de "experto" es ambiguo. Con independencia de sus títulos, su función o su nivel jerárquico, el experto será elegido por su capacidad de encarar el futuro y posea conocimientos sobre el tema consultado.

La falta de independencia de los expertos puede constituir un inconveniente; por esta razón los expertos son aislados y sus opiniones son recogidas por vía

postal o electrónica y de forma anónima; así pues se obtiene la opinión real de cada experto y no la opinión más o menos falseada por un proceso de grupo (se trata de eliminar el efecto de los líderes).

Para la distinción de los expertos se determina la cantidad (n) y la correspondencia de los candidatos atendiendo a los criterios de idoneidad, competencia y creatividad, disposición a participar, su capacidad de análisis y su espíritu autocrítico. El número de expertos se calcula por la siguiente expresión:

$$n = \frac{p(1-p)K}{i^2}$$

1 - r	K
99 %	6.6564
95 %	3.8416
90 %	2.6896

Donde:

K: constante que depende del nivel de significación estadística (1- $\alpha$ ).

p: proporción de error que se comete al hacer estimaciones del problema con n expertos.

i: precisión del experimento. ( $i \leq 12$ )

### Fase 3: Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios (en paralelo con la fase2)

Los cuestionarios se elaborarán de manera que faciliten, en la medida en que una investigación de estas características lo permite, la respuesta por parte de los consultados. Preferentemente las respuestas habrán de poder ser cuantificadas y ponderadas (año de realización de un evento, probabilidad de realización de una hipótesis, valor que alcanzará en el futuro una variable o evento, etc.). Se formularán cuestiones relativas al grado de ocurrencia (probabilidad) y de importancia (prioridad), la fecha de realización de determinados eventos relacionadas con el objeto de estudio: necesidades de información del entorno, gestión de la información del entorno, evolución de los sistemas, evolución en los costes, transformaciones en tareas y necesidad de formación.

En ocasiones, se recurre a respuestas categorizadas (Si/No; Mucho/Medio/Poco; Muy de acuerdo/ De acuerdo/ Indiferente/ En desacuerdo/Muy en desacuerdo), y después se tratan las respuestas en términos porcentuales tratando de ubicar a la mayoría de los consultados en una categoría.

Puede realizarse un pilotaje para validar los instrumentos, donde pueden incluirse preguntas abiertas, con el propósito de variarlas posteriormente, una vez que haya sido posible la conformación del universo de las respuestas. Las preguntas deben hacerse por escrito, para evitar de esta forma la influencia de un experto sobre otro.

#### Fase 4: desarrollo práctico y explotación de resultados

El cuestionario es enviado a cierto número de expertos (hay que tener en cuenta las no-respuestas y abandonos. Se recomienda que el grupo final no sea inferior a 25). Naturalmente el cuestionario va acompañado por una nota de presentación que precisa las finalidades, el espíritu del Delphi, así como las condiciones prácticas del desarrollo de la encuesta (plazo de respuesta, garantía de anonimato). Además, en cada cuestión, puede plantearse que el experto deba evaluar su propio nivel de competencia.

El objetivo de los cuestionarios sucesivos es disminuir la dispersión de las opiniones y precisar la opinión media consensuada. En el curso de la 2ª consulta, los expertos son informados de los resultados de la primera consulta de preguntas y deben dar una nueva respuesta y sobre todo deben justificarla en el caso de que sea fuertemente divergente con respecto al grupo. Si resulta necesaria, en el curso de la 3ª consulta se pide a cada experto comentar los argumentos de los que disienten de la mayoría. Un cuarto turno de preguntas, permite la respuesta definitiva: opinión consensuada media y dispersión de opiniones (intervalos intercuartiles).

Para realizar el procesamiento de la información se debe tener en cuenta el tipo de pregunta, ya sea cuantitativa o cualitativa. En el procesamiento por el tipo cuantitativo es posible utilizar valores que caracterizan la variable susceptible de definir a partir de lo que está midiendo. Las variables definidas

de esta forma tendrán un determinado recorrido, lo cual posibilita la fácil utilización de Procedimientos Estadísticos.

Las características cualitativas están asociadas a atributos, donde sólo será posible asignar dos valores a la variable. Cuando se presenta la característica deseada, se le asigna digamos el valor 1 y si esta no se presenta, el valor 0, lo cual tiene un tratamiento específico desde el punto de vista estadístico.

Para el primer caso, es necesario definir la escala de puntuaciones que puede tomar la variable la cual permite conformar una tabla de doble entrada. Se confecciona una matriz con la respuesta de los expertos:

Expertos	Preguntas				
	1	2	3	...	k
1	R <sub>11</sub>	R <sub>12</sub>	R <sub>13</sub>	...	R <sub>1k</sub>
2	R <sub>21</sub>	R <sub>22</sub>	R <sub>23</sub>	...	R <sub>2k</sub>
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
n	R <sub>n1</sub>	R <sub>n2</sub>	R <sub>n3</sub>	...	R <sub>nk</sub>

Donde:

n: Cantidad de expertos.

k: Cantidad de preguntas, requisitos o atributos de calidad.

m<sub>j</sub>: Cantidad de expertos que evalúan la pregunta J;  $j = \overline{1; k}$

R<sub>i</sub>: Evaluación en puntos de la escala establecida para la pregunta j realizada por el experto i de acuerdo al rango prefijado;  $i = \overline{1; n}$

Para el procesamiento estadístico no se utilizan los valores directos de la puntuación, sino que se utilizan los rangos de dichas evaluaciones. Los rangos son el resultado de la media aritmética de las posiciones que deben ser adjudicadas si el experto emplea la misma puntuación a más de una pregunta.

Los rangos se calculan por la siguiente expresión:

$$R_{ij} = \frac{\sum R_{ij}}{K} \text{ Donde } i = \overline{1; k}; \text{ donde:}$$

R<sub>ij</sub>: Evaluación en puntos de la escala establecida por la pregunta j por el experto i de acuerdo al rango establecido.

El hecho de que se calculen rangos indica que existe la posibilidad de que un experto dé la misma evaluación a más de una pregunta. Cuando esto sucede estamos en presencia de las ligaduras.

Las ligaduras se calculan de la siguiente manera:  $T_i = \frac{\sum (t^3 - t)}{12}$  donde  $j = \overline{1; l}$

y donde:

T<sub>i</sub>: Ligaduras del experto i a las preguntas.

L: Número de grupos con evaluaciones iguales para el experto i.

t: Número de observaciones dentro de cada uno de los grupos para el experto i.

Para determinar el resultado de las diferentes respuestas se utiliza el parámetro  $\Delta$  que se define para cada pregunta como sigue:  $\Delta = \sum R_{ij} - \bar{s}$  (donde

$$i = \overline{1; n}), \bar{s} = \frac{n(K+1)}{2}$$

Para medir el grado de concordancia de los expertos, para valores de  $K \geq 7$ , se

calcula el coeficiente de Kendall:  $W = \frac{12 \sum \Delta^2}{n^2(K^3 - K) - n \sum T_i}$

Si de todas las evaluaciones realizadas por el experto i son diferentes  $T_i = 0$  y

$W \in (0, 1)$

Si  $W = 0$  No hay comunidad de preferencia.

Si  $W = 1$  Existe concordancia perfecta.

La hipótesis de que los expertos tienen o no comunidad de preferencia puede probarse si  $K \geq 7$  calculando:  $X^2_{\text{calculado}} = n(K-1)W$

Se plantean las hipótesis:

H<sub>0</sub>: No hay comunidad de preferencia entre los expertos.

H<sub>1</sub>: Existe comunidad de preferencia entre los expertos.

Se calcula un estadígrafo Chi-Cuadrado con K-1 grados de libertad y un nivel de significación prefijada, generalmente  $\alpha = 0,05$  ó  $\alpha = 0,01$ .

$$X^2_{\text{tabulado}} = X^2(\alpha, K-1)$$

Si  $K > 30$  el estadígrafo  $X^2$  tabulado se determina de la siguiente forma:

$$X^2_{\text{Tabulada}} = X^2_p = \frac{1}{2} \left( Z_p + \sqrt{(2k-1)} \right)^2 \text{ y donde:}$$

$Z_p$ , que es el valor que hay que buscar en la tabla se determina por la siguiente expresión:  $Z_p = Z_{\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)}$

Para que exista comunidad de preferencia debe cumplirse que:

$$\text{Región Crítica: } X^2_{\text{calculado}} > X^2_{\text{tabulado}}$$

Para el caso en que  $K < 7$  se calcula:  $s = \sum \Delta^2$  (donde  $j = \overline{1; k}$ )

$$\text{Región Crítica: } s \geq S_{\text{tabulada}}$$

$S_{\text{tabulada}}$ : Siegel, "Estadística no paramétrica", Tabla R.

Si se cumple la región crítica, se usa el valor  $\Delta$  la importancia de las diferentes características, de modo que el menor valor significará una mayor importancia ( $\Delta$  menor = mayor importancia).

El Delphi parece un procedimiento simple, fácilmente aplicable en el marco de una consulta a expertos. Sin embargo existe el riesgo de que los fracasos y/o decepciones desanimen a los "usuarios aficionados". El método viene bien para las aplicaciones decisionales, pero debe estar adaptada en función del objetivo del estudio para la prospectiva. En particular, no es necesario obtener a toda costa una opinión consensuada mediana, pero es importante poner en evidencia varios grupos de respuestas para el análisis de puntos de convergencia múltiples. Delphi es sin duda una técnica objeto de múltiples aplicaciones en el mundo entero.

A partir del procedimiento original, se han desarrollado otras aproximaciones. Últimamente, la utilización de nuevos modos de interacción entre expertos, como el correo electrónico, tienden a desarrollarse y a convertir el procedimiento en más flexible y rápido.

## 2.4.2 Resultado obtenido de la aplicación del método Delphi.

La aplicación de los pasos lógicos del Método Delphi se plantea a continuación:

1. Concepción inicial del problema: Se definen los elementos básicos del trabajo, el objetivo a alcanzar, la situación actual y los componentes o elementos necesarios para realizarlo. Se elaboró una relación de posibles variables de riesgos que afectan a proyectos de inversión dirigidos a la construcción y puesta en marcha de plantas de biogás con fines energéticos y para el tratamiento de los residuales porcinos, insertado dentro del desarrollo de las fuentes renovables de energía, los cuales constituyen elementos esenciales en la toma de decisiones de inversión y que implican altos niveles de incertidumbre.

2. Selección de expertos.

A continuación se muestra el resultado del cálculo del número de expertos realizado:

### Solución

Datos:

$$p = 0,05$$

$$K = 3,8416$$

$$i = 0,12$$

$$n = ?$$

$$n = \frac{p(1-p)K}{i^2}$$

$$n = \frac{0,05(1-0,05)3,8416}{(0,12)^2} = n = \frac{0,05(0,95)3,8416}{0,0144} = n = \frac{0,182476}{0,0144}$$

$$= n = 12,67 \approx 13$$

Para la selección de los 13 expertos se aplicó el siguiente procedimiento, el cual consta de las siguientes etapas:

1ra. Elaboración de una lista de candidatos a expertos dentro de la institución que cumplan los siguientes requisitos: Categoría científica (Dr., MC.), Años de Experiencia y Disposición de Participar. Teniendo en cuenta estos requisitos se logra reunir un grupo de 22 expertos.

2da. Determinación del coeficiente de competencia de cada experto.

Este es un método de autoevaluación totalmente anónimo (Ronda Pupo, 2002).

Se aplicó una encuesta, Ver Anexo C, en la cual el candidato expresa el grado de conocimiento sobre el tema Diagnóstico de los principales riesgos que intervienen en el proyecto “Diagnostico del proceso productivo de la planta de biogás en la empresa Genética Porcina de Cienfuegos”.

En el procesamiento se calcula el coeficiente de competencia de la siguiente forma:

$$K_{comp} = \frac{1}{2} (kc + ka)$$

Donde:

$K_{comp}$ : Coeficiente de competencia.

Kc: Resulta del promedio de los valores que cada candidato le otorga a cada una de las preguntas, según el conocimiento que considere tenga al respecto.

Ka: Coeficiente de argumentación: Constituye la suma de los valores del grado de influencia de cada una de las fuentes de argumentación.

El Ka resulta de la tabla patrón 2.2 de valores que maneja el conductor:

Fuentes de Argumentación	Grados de influencia de cada uno de las fuentes en su conocimiento y criterios		
	Alta	Media	Baja
Análisis teórico por usted realizado.	0.3	0.2	0.1
Experiencia adquirida.	0.5	0.4	0.2
Trabajos de autores nacionales que conoce.	0.05	0.05	0.05
Trabajos de autores internacionales que conoce	0.05	0.05	0.05
Conocimiento propio sobre el estado del tema.	0.05	0.05	0.05
Intuición.	0.05	0.05	0.05

Se concluye entonces que el código para la interpretación del coeficiente de competencia (K) fue el siguiente:

Si  $0,8 < K_{comp} < 1.0$ , entonces el coeficiente de competencia es alto.

Si  $0,5 < K_{comp} < 0,8$ , entonces el coeficiente de competencia es medio.

Si  $K_{comp} < 0,5$ , entonces el coeficiente de competencia es bajo.

Se establece que cuando K se encuentra entre los valores de 0.8 y 1 ( $0.8 < K < 1$ ) es confiable la selección realizada.

Como resultado del procesamiento, 13 de los 22 candidatos a expertos se autoevalúan de “alta competencia” en este tema, 5 candidatos se evaluaron de “competencia media” y 4 se evaluaron de “competencia baja”. De los 13 expertos seleccionados el 100 % es de nivel superior, de ellos el 61% tiene categoría científica (Doctor en ciencias o master) y el resto se compone de ingenieros o licenciados.

### 3. Preparación de las encuestas:

Se realizaron entrevistas, se revisaron documentos, leyes y/o regulaciones para la preparación de las encuestas, con la finalidad de nombrar una relación de posibles riesgos que afecten al proyecto en estudio. Ver Anexo D.

### 4. Procesamiento y análisis de la información.

Para el procesamiento y análisis de la información contenida en los cuestionarios se utilizó el paquete de programa estadístico SPSS en su versión 12.0.

Para la codificación de los riesgos en la primera ronda se utilizó la siguiente escala, la cual fue utilizada para todos los riesgos: Incidencia baja, Incidencia medianamente baja, Incidencia media, Incidencia medianamente alta, e Incidencia alta.

Para desarrollar la primera ronda del método se le propuso a los expertos un grupo de riesgos para ser evaluados, después de aplicada y procesada esta ronda los resultados fueron los siguientes: El coeficiente W de Kendall, que mide la concordancia de los expertos, según esta ronda resultó de 0,809 con un nivel de significación de 0,000 , se calculó además el estadígrafo Chi Cuadrado, el cual resultó de 147,255y se comparó con el Chi Cuadrado Tabulado con K-1 grados de libertad igual a 14 y un nivel de significación de 0,05. Como se puede apreciar en los resultados, muestran la aceptación de la

hipótesis nula, son por tanto suficientemente satisfactorios, pues el coeficiente de Kendall es alto, lo que indica que la concordancia entre los expertos es elevada, el criterio que ofrece el nivel de significación fue de 0,000 y ese es el nivel ideal de significación que debe calcular el método. Ver Anexo E.

Teniendo en cuenta estos resultados, no decidimos realizar una segunda ronda ya que existe buena concordancia de los expertos en relación a los riesgos que inciden en el proyecto.

La propuesta de las deficiencias detectadas que inciden en la planta de biogás del Genético Porcino se menciona a continuación:

- 1- Aumento de la masa porcina.
- 2- Violación del proyecto diseñado.
- 3- Violación de la licencia ambiental otorgada.
- 4- Inadecuado e insuficiente sistema de tratamiento de residuales.
- 5- Cierre temporal o permanente de la unidad porcina por un mal funcionamiento del sistema de tratamiento de residuales.
- 6- Contaminación del manto freático por impermeabilización incorrecta de las lagunas de oxidación.
- 7- Saturación actual de los cuerpos receptores.
- 8- Incumplimiento de la norma cubana de vertimiento de aguas residuales.
- 9- Emisión de gases contaminantes a la atmósfera (metano y CO<sub>2</sub>).
- 10- Sobrecarga de purín al digestor con exceso de agua por una mala explotación del sistema.
- 11- Ausencia de personal calificado para la construcción de los digestores.
- 12- Fuga de gas en los digestores.
- 13- Explosión de la cúpula fija.

Según los expertos, el riesgo que más incidencia tiene para el proyecto es la sobrecarga de purín al digestor con exceso de agua por una mala explotación del sistema. Los reactores anaerobios vienen diseñados para trabajar en continuo con una carga de materia orgánica diaria que no debe rebasar el 10%. En el caso de estudio, la planta de biogás del Genético Porcino está diseñada para una carga de

0.99 m<sup>3</sup>, durante la investigación se realizaron varios análisis de laboratorio que arrojaron como resultado un promedio de 4.3% de carga orgánica en la mezcla, esto significa que existe un exceso de agua, si tenemos en cuenta que los valores óptimos están entre 7 y 12%.

Según los expertos, como consecuencia de esta deficiente operación, ocurre un lavado de microorganismos debido al exceso de agua; como la cantidad de materia que se introduce está por debajo del valor óptimo, lógicamente la producción de biogás disminuye y los productos resultantes de la planta (Biol y Lodo) no cumplen con la calidad requerida para ser utilizados como fertilizante orgánico.

## **Capítulo 3.**

### **Diagnóstico del proceso de producción de biogás en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.**

En el capítulo se describe el sistema de generación de residuales destinado a la producción de biogás en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos. Las principales dificultades encontradas a través de visitas, así como consultas realizadas a especialistas y personal de la empresa. La caracterización de los parámetros que miden la eficiencia de la planta, permitió obtener su estado actual y la elaboración de acciones de mejoras.

#### **3.1 Caracterización general de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.**

La Granja Genética Porcina, actualmente la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, se encuentra enclavada en el poblado de Ventas del Río a 7 km de la Ciudad de Cienfuegos, perteneciente al Municipio de Cienfuegos. Su fundamental vía de acceso es un camino que se deriva de la carretera de Rodas, en tanto limita por el Norte con el área cañera de Elpidio Gómez; por el Oeste con un camino vecinal por donde transitan personas, animales y equipos agrícolas; por el Este colinda con el río salado y por el Sur con la carretera de acceso a la unidad, donde existen alrededor de 120 núcleos familiares y muchos de ellos son trabajadores del centro.

Entre los antecedentes históricos más relevantes, podemos mencionar que antes del triunfo de la revolución la ubicación de la UEB genético porcino pertenecía a una hacienda del Nene Casicedo. Con el triunfo de la Revolución Cubana se produjo una transformación social en nuestro país, mediante la cual fueron creadas las bases para el desarrollo de la economía y se priorizó la atención al sector agropecuario, dentro de éste a la producción porcina. De esta forma, el 24 de febrero de 1962 se crea la granja del genético porcino, que en sus inicios tan solo se dedicaba al pastoreo. En estos momentos, el centro cuenta con las naves de los cerdos, el almacén de piensos, instalaciones de

bombeo de agua, ganado mayor y las producciones agrícolas. Las principales especies son el CC21 de origen cubano y el Duró, que es otra raza paterna no cubana, menos prolifera, menos productora de leche pero de mejor carne. Actualmente en todo lo referente al área de maternidad la tecnología es completamente china y se controlan las líneas genealógicas hasta la 5ta generación.

### **3.1.1 Objeto Social.**

El Objeto Social actual de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, según Resolución. 1026 del 2 de febrero del 2005 del Ministerio de Economía y Planificación (M.E.P.) modifica el Objeto Social de la Empresa y se detalla a continuación:

- Producir y comercializar de forma mayorista cochinos y cochinitas genéticos como reemplazo, precebas genéticas en pie, lechonas y lechones genéticos y pie de crías raciales, en moneda nacional y divisa.
- Administrar y controlar el desarrollo del genofondo en el país, según las políticas definidas por el Instituto de Investigaciones Porcinas.
- Comercializar de forma mayorista animales genéticos de desecho (mayores y menores), en banda y en pie, a los destinos planificados, en moneda nacional y divisa.
- Brindar servicios de maquinaria, taller, transporte, técnicos para la producción, reparación de las instalaciones del sistema de la agricultura y otras entidades fuera del sistema, así como efectuar la reparación y construcción de viviendas a los trabajadores del sistema, en moneda nacional.
- Prestar servicios de comedor, cafetería, recreación y alojamiento no turístico con gastronomía asociada a éste a los trabajadores del sistema porcino y de ganado menor, en moneda nacional.
- Producir y comercializar en forma minorista las producciones agropecuarias que resultan excedentes del autoconsumo a los trabajadores del sistema porcino en moneda nacional.

### **3.1.2 Misión y Visión.**

Misión: Preservar y mejorar el genofondo porcino del país y satisfacer las necesidades de pie de cría de alta calidad genética a todos los niveles productivos dentro y fuera del país.

Visión: Producción y comercialización de cochinos y cochinas de alta calidad genética, precebas y carne de cerdo, para todas las provincias centrales: desde matanzas a Camagüey, inscriptos en el plan técnico-económico, con indicadores técnicos-productivos y económicos eficientes y eficaces, disminuyendo los daños al medio ambiente, en una empresa perfeccionada, con Cuadros Técnicos y trabajadores motivados y comprometidos con el pueblo y la revolución.

Dentro de los principales valores a reforzar en la organización se encuentran los siguientes:

- Desarrollo Interno
- Cooperación entre los miembros
- Capital Humano
- Valor del conocimiento
- Disciplina
- Profesionalidad y Solidaridad
- Creatividad e Innovación Tecnológica
- Cumplimiento de las Normas y Tareas

Entre las fundamentales áreas de resultados clave se identifican las siguientes:

- Capital Humano
- Técnico y Desarrollo
- Contable Financiero
- Control
- Logística

Las áreas estratégicas de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos son:

- Cuadro
- Capacitación
- Control Interno

- Informática y las Comunicaciones
- Perfeccionamiento Empresarial

### **3.1.3 Caracterización del entorno.**

#### Análisis interno

##### Fortalezas

1. Contar con el personal técnicamente calificado, con experiencia y comprometido con la actividad genética.
2. Productores Únicos de animales genéticos aclimatados a nuestro país.
3. Capacidad de mejoramiento genético en el sector no especializado y formación de nuevos cruces.
4. Manual de Crianza Porcina para U.E.B Genéticas validado.
5. Mercado Interno Seguro.

##### Debilidades

1. Dificultades con la informática y las comunicaciones.
2. Insuficiente parque de transporte y obsolescencia técnica.
3. Dificultades con la Tecnología de Crianza y Medios de Medición.
4. Alto contaminador del medio ambiente
5. Limitado nivel de diagnóstico de las enfermedades.

#### Análisis externo

##### Oportunidades

1. Ubicación geográfica de nuestro país.
2. Resultados científicos del Instituto de Investigaciones Porcinas a introducir.
3. Participación en ferias, exposiciones y eventos de carácter nacional e internacional.
4. Contar con una cantera joven en proceso de formación.
5. Capacidad para Exportar animales genéticos

##### Amenazas

1. Inestabilidad en calidad y surtido en la alimentación de los animales.
2. Inestabilidad en la adquisición de los Insumos Productivos.
3. Circulación viral de diferentes enfermedades de alta letalidad en el territorio nacional.

4. Enfermedades por la acción de situaciones climatológicas adversas.
5. Mayor eficiencia en el mercado por parte de los competidores directos.

### 3.1.4 Estructura organizativa.

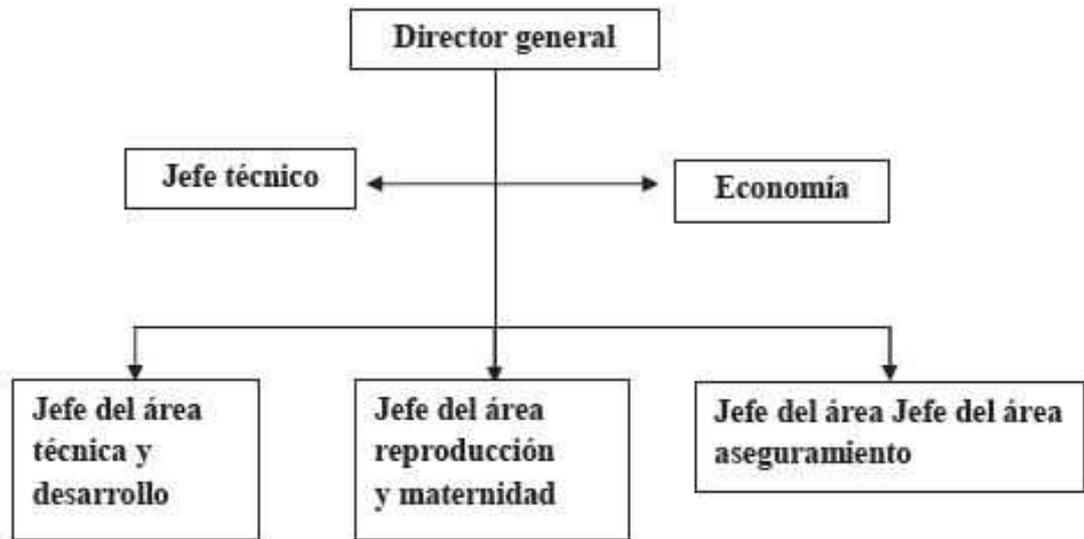


Figura 3.1: Estructura organizativa.

La plantilla actual de la UEB está cubierta y aprobada por 55 trabajadores, a continuación se detallan en la Figura 3.2 y 3.3 por categoría ocupacional y apoyado con el correspondiente análisis de género.

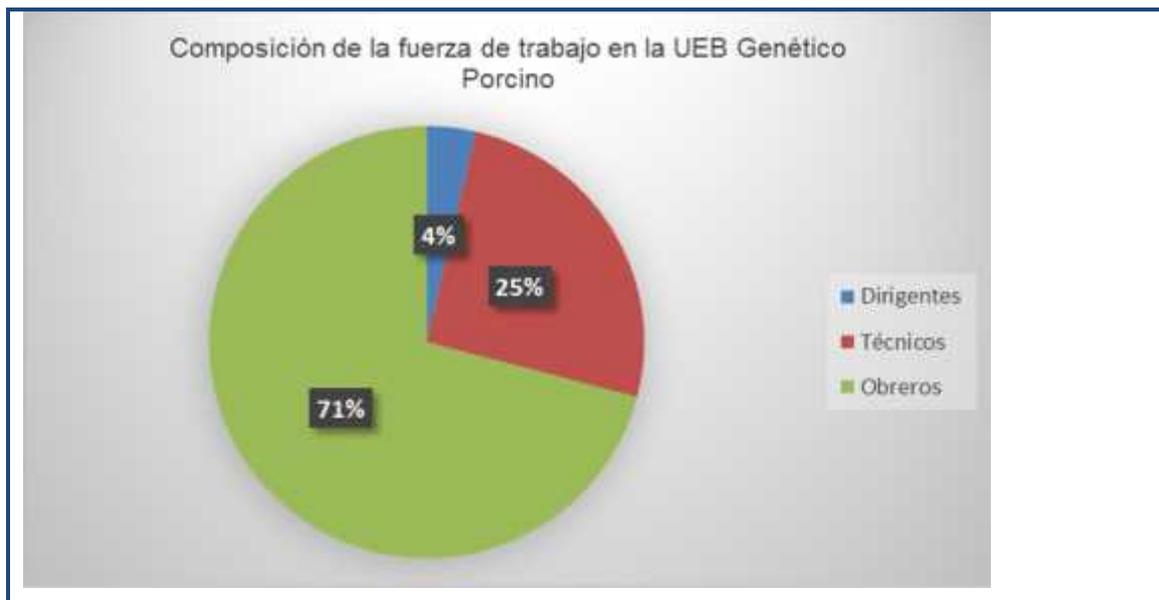


Figura 3.2: Composición de la fuerza de trabajo en la UEB Genético Porcino.



Figura 3.3: Análisis de género de la fuerza de trabajo.

### 3.2 Descripción general del proceso de producción de biogás en la planta de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

Las plantas de biogás nos aportan diferentes bondades, a continuación relacionamos lo que se produce diario y mensual.

Diario:

Lodo finales aprovechados como bio-abono: 263.2 kg

Efluente líquido utilizado como fertirriego (Residual líquido): 789.6 kg

Biogás: 11.34 m<sup>3</sup>

Mensual

Lodo finales aprovechados como bio-abono: 7,9 t

Efluente líquido utilizado como fertirriego (Residual líquido): 23,7 m<sup>3</sup>

Biogás: 340.2 m<sup>3</sup>

Equivalencia de biogás a madera (leña): 1 m<sup>3</sup> = 1.33 kg diario

Leña: 452.47 kg diario

El proyecto consiste en un digestor de cúpula fija, de 42 m<sup>3</sup> de capacidad, que producirá 11.34m<sup>3</sup> de biogás/día con un tiempo de retención de 40. Posee un tanque compensado sobre su domo, cuya eficiencia, oscila entre el 55 – 85% (STV) y su funcionamiento óptimo está dado por experiencias en otras provincias del país.

El digestor consta además del cuerpo, con un digestor de cúpula o domo fijo con fondo cónico. En el depósito mezclador es donde se produce la mezcla, compuesta por excreta y agua, en proporciones indicadas. Para cargar el digestor, se dispone también, de un depósito de descarga para la compensación de la presión interna y salida posterior del lodo digerido.

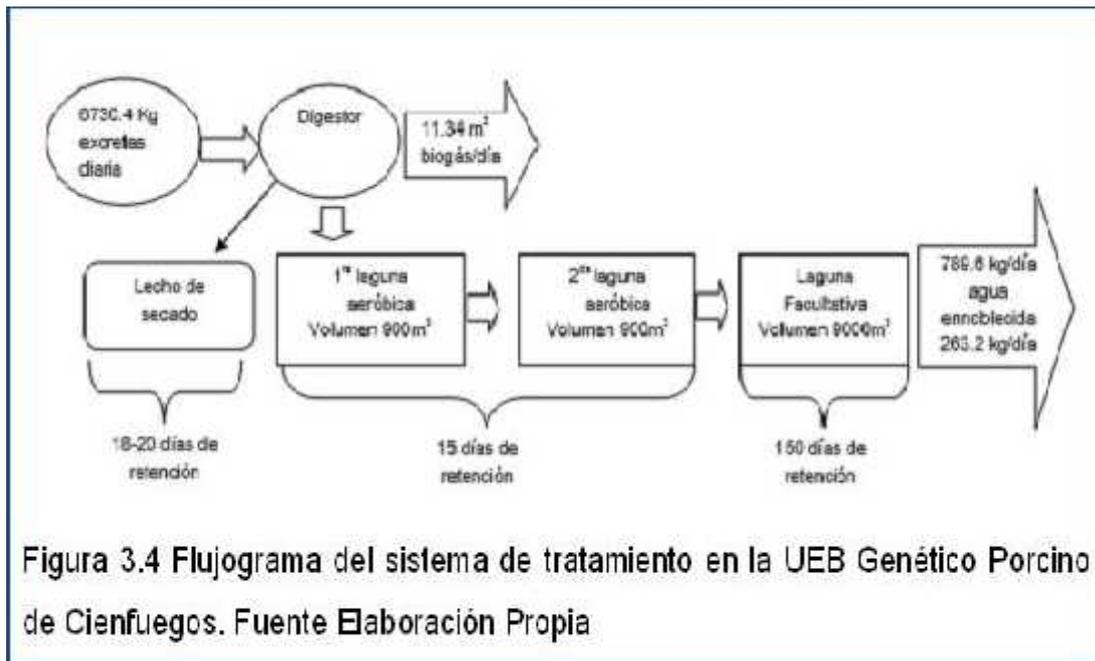
El digestor se carga por gravedad y diariamente, con un volumen de mezcla en dependencia de la materia prima que se utilice; en el caso de estudio la relación empleada fue de 1:3, es decir produce 263.2 kg (lodo) bio-abono y 789.6 kg de (biol) residual líquido diario.

Una de las ventajas de la planta de biogás es que su construcción se realizó con paredes de bloques de hormigón y cúpula de ladrillos, empleando otros materiales conocidos como: cemento, arena, piedra, garantizando resistencia y durabilidad de la obra.

No presenta partes móviles propensas al desgaste, ni tampoco componentes metálicos propensos a la corrosión y tiene una vida útil estimada entre 20 y 30 años.

El esquema de tratamiento está compuesto por los siguientes elementos y que aparecen en la figura 3.4:

- Dos Lagunas aeróbicas
- Laguna Facultativa.
- Digestor de 42 m<sup>3</sup>.
- Lecho de Secado



Para el caso en estudio se documentará lo relacionado con la etapa de ejecución y operación del proyecto Planta de biogás UEB Genético Porcino Cienfuegos.

El presente informe se compone de apartados, los cuales describen las acciones que se deben llevar a cabo para el análisis respectivo, seguidamente se mencionan muy generalmente algunos de los puntos: introducción, se describen los objetivos generales y específicos de la evaluación, seguidamente en el resumen se da una información general de la localización del proyecto, la justificación según necesidad, costos estimado del mismo, el análisis de la sostenibilidad con aspectos como formulación presupuestaria, capital humano, clima organizacional y asimilación de la tecnología, el análisis de los efectos e impactos negativos y positivos que generó el proyecto dentro del criterio de eficiencia y eficacia y finalmente, el análisis de la pertinencia, es decir, si el proyecto es útil y contribuyó a resolver el problema que se presentaba de contaminación y funcionamiento de la planta.

Se finaliza con las conclusiones y recomendaciones que se consideran pertinentes según lo investigado y analizado sobre el proyecto objeto de estudio.

Desde sus inicios el proyecto Planta de biogás en la UEB Genético Porcino tuvo un enfoque sostenible, dirigido fundamentalmente, a reducir la

contaminación ambiental que existía en la zona de microlocalización. La intervención tiene como objetivo general, tratar adecuadamente los residuos generados en el proceso de preservación y mejoramiento del genofondo porcino, con la consecuente producción de fertilizante orgánico y la solución del problema de la cocción de alimentos en la cocina comedor.

El proyecto clasifica como estratégico y de innovación tecnológica; considerado de vital importancia para la empresa, que tiene como propósito fundamental reducir la contaminación ambiental y la utilización de los productos biogás y abono con destinos disimiles; el primero, para la generación de energía calórica para la cocción de alimentos y el segundo como abono orgánico para el enriquecimiento del recurso suelo; también como beneficios del proyecto se encuentran: mejorar las condiciones higiénicas y proteger y preservar el ecosistema. Además de estar demostrada la pertinencia de la tecnología a emplear, de forma especial para los países del Tercer Mundo.

Las entidades responsables con la ejecución del proyecto fueron: la Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios (ENPA), el CITMA, Talleres Agropecuario, Empresa Genético Porcina de Cienfuegos y Planificación Física. También pudimos beneficiar al centro con la sustitución de la leña por el biogás para así mejorar la cocción de alimentos y también las condiciones de trabajo de los cocineros .

Sustitución de leña

Consumo

Compra de leña: \$ 350.00 mensual

Mas: \$ 20.00 (20 litros mensual de diesel por transportación x \$ 1.00)

MO: \$ 14.56 (2 obreros x 4h x \$ 1.82)

Seguridad social: \$ 1.75

Vacaciones: \$ 1.32

Total: \$ 387.63 mensual

Se recuperaron 20 hectáreas de tierras en cultivos como fueron arroz 3 hectáreas maíz 11 hectáreas, boniato 5 hectáreas, yuca 8 hectáreas, plátano 8 hectáreas, donde pudimos aprovechar una de las tantas bondades que nos ofrece la planta.

### Sostenibilidad del Proyecto

La sostenibilidad de un proyecto se refiere a la capacidad que tiene el mismo para continuar sus acciones de manera autónoma; para el proyecto en estudio, es la capacidad para tratar adecuadamente los residuos generados en el proceso de preservación y mejoramiento del genofondo porcino en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos; con la consecuente generación de electricidad, a partir de biogás, así como la obtención de lodos (aprovechados como bioabono) y efluente líquido para ser utilizado como fertirriego.

La búsqueda de alternativas sostenibles, en el sector agrario, para el tratamiento de los residuales procedentes de la crianza animal de forma intensiva, constituye una tarea priorizada en la esfera científico técnico a escala mundial. En este sentido es de especial interés, en países poseedores de masas ganaderas que oscilan por encima de las medias mundiales para distintas especies, como es el caso de China, Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea. En Cuba las actuales condiciones económicas favorecen el aumento del número de propietarios privados que dedican sus esfuerzos a la crianza porcina, con el consiguiente incremento de la carga orgánica vertida al medio ambiente.

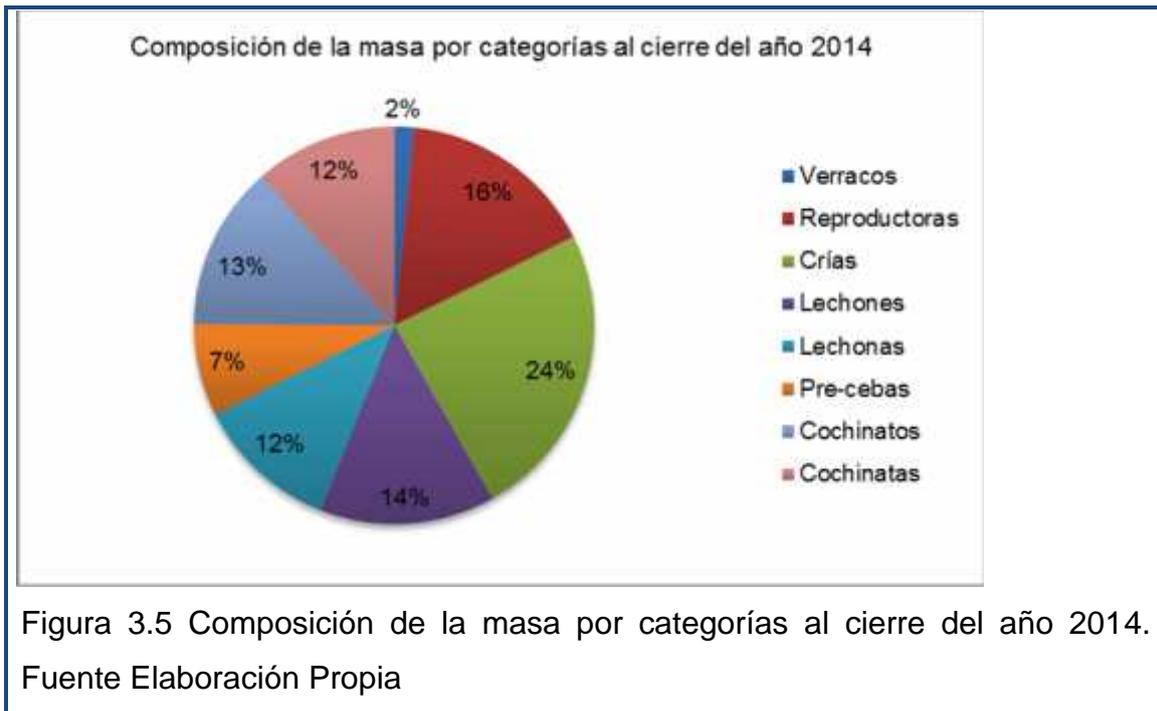
Las características y beneficios derivados de la Digestión Anaerobia han dado lugar a que este proceso se conciba no sólo como un método de descontaminación de residuos orgánicos, sino también como una vía sostenible para la generación de energía y nutrientes.

Los impactos ambientales directos de la producción porcina intensiva son la contaminación del aire, suelo y agua por los “subproductos” (gases, heces y orina) originados durante el “proceso de producción” (crecimiento de los animales). Esto es debido básicamente a que la existencia de una alta concentración animal supone una producción alta de ruidos, olores y sobre todo de desechos orgánicos, heces y orina, (León D.J.S., 1995)

El manejo que se haga de las excretas es primordial, ya que representan un alto riesgo de contaminación del suelo y mantos freáticos principalmente con nitratos y fosfatos por el probable escurrimiento y filtración, lo cual incrementa el proceso de eutrofización de los mantos acuíferos. Otra de las consecuencias

ecológicas es la relacionada con la aportación de nitrógeno hacia la atmósfera lo cual contribuye a la formación de lluvia ácida.

La panta de biogás de la UEB Genético Porcino Cienfuegos se construyo para reducir la contaminación excesiva al medioambiente. El centro cuenta hasta la fecha con 2559 cerdos, sin embargo tiene como capacidad para 4200 lo que genera 6730.4 kilogramos de excretas diarias el cual debe ser tratado según las regulaciones medioambientales y que aparecen en la figura 3.5.



### **3.3 Determinación de los parámetros de control, de operación e indicadores de eficiencia en la planta de biogás de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.**

Como se ha mostrado en los capítulos anteriores existen diferentes parámetros, los de control, operacionales e indicadores de eficiencia que pueden ser determinados por cálculos y análisis físicos químicos.

Para la realización de estos cálculos se tomaron 7 muestras para análisis de laboratorio durante un período de 2 meses, en los 5 puntos principales del biodigestor que se corresponden con:

Punto 1: Entrada a la planta.

Punto 2: Fondo del digestor (lodo)

Punto 3: Efluente del biodigestor

Punto 4: Salida 1era. Laguna de oxidación

Punto 5: Salida de la 3era. Laguna de oxidación

#### **IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS**

M	Identificación
601	Entrada Biogás - 1 <sup>ra</sup> Laguna
602	Entrada 3 <sup>ra</sup> Laguna
603	Salida 3 <sup>ra</sup> Laguna
604	Salida Biogás

Tabla 3.1. Identificación de las muestras.

## Resultados de las pruebas de laboratorio Genético Porcino Cienfuegos 2015.

Tabla 3.2. Primer resultado de laboratorio.

M	pH (u), T °C U=±0,5%	DQO mg/L U=±30%	DBO* <sub>5</sub> <sup>20</sup> mg/L
601	6.76-21.9	5193	3556
602	7.61-22.3	612	278
603	8.49-22.8	302	58
604	7.14-22.2	3720	1675

Tabla 3.3. Segundo resultado de laboratorio.

M	ST mg/L	STF mg/L	STV mg/L	SS ml/L
601	7668	1846	5822	180
602	1654	770	884	2.5
603	960	524	436	0
604	4100	1312	2788	65.0

En la tabla 3.4 se presentan los valores medios de los parámetros de control obtenidos, así como los valores referidos como óptimos según algunos autores.

Tabla 3.4. Valores medios de los parámetros de control.

Parámetro	Valor medio	CV	Óptimo	Referencia
<b>ENTRADA DIGESTOR</b>				
pH	6,76 ±0.30	4%		
ST%MF	4,15 ±0.69	45%	7-12 %	Zennaki et al.,1996
SV%MF	3,15 ±0.56	52%		
SV%ST	0,76 ±0.57	9%		
N NH4	0.52 ±0.07	13%	<3 g N-NH4/L	Van Velsen, 1979

<b>LODO</b>				
TAC	7667.86 ±1160	15%	>2500 mg/L	Fannin, 1987
FOS	7334.43 ±1709	23%	<4000 mg/L	Stafford, 1982; Ahring et al., 1995
FOS/TAC	0.96 ±0.15	16%	0.3 – 0.4	Iza, 1995
SV%ST	68,00 ±3.87	5%	>60%	Manual laboratorio biogás UNISS
<b>SALIDA BIODIGESTOR (Biol)</b>				
pH	7.14 ±0.05	0.7%	6.8-7.20	Mudrak,1986
ST%MF	3,12 ±0.31	18%		
SV%MF	2,13 ±0.24	19%		
SV%ST	0,68 ±0.02	2.5%		
N NH4	0.84 ±0.16	19%	<3 g N- NH4/L	
<b>ENTRADA</b>				
<b>3ra. Laguna</b>				
pH	7.61 ±0.03	0.44%		
ST%MF	2,15 ±0.18	20.3%		
SV%MF	1,15 ±0.16	28.2%		
SV%ST	0.53 ±0,1	15.8%		
<b>SALIDA 3 era. LAGUNAS</b>				
pH	8.49 ±0.032	0.00%		
ST%MF	1,83 ±0.05	11.18%		
SV%MF	0,83 ±0.05	24.03%		
SV%ST	0.45 ±0.06	12.56%		
SV%ST	0.45 ±0.06	12.56%		

Fuente: Elaboración propia mediante Microsoft Excel.

La cantidad de material fermentable que entra a la planta es definida por la concentración de sólidos. Este valor varía en función de la tecnología usada en el biodigestor. Entre 7 - 9% es recomendado por (Zennaki, B.Z., Zaid, A.,

Bentaya, K., 1998) y hasta un 12 % ST para reactores cúpula fija. Para el caso estudio se obtuvo un bajo contenido de sólidos totales en la alimentación a la planta, en un rango entre 4,15%, lo cual evidencia el elevado gasto de agua para la limpieza de las áreas.

El FOS/TAC en el lodo es un parámetro que se relaciona directamente con la estabilidad del proceso. Este valor se mantuvo en un rango entre 0.69-1.13, con un valor medio de AGV en 7334.43 mg/L. Ambos parámetros se encontraron por encima de los valores reportados en la literatura.

Los AGV son los compuestos intermediarios más importantes en el proceso. Frecuentemente el acetato y el propionato serán los intermediarios dominantes, por ello una especial atención la reciben las relaciones entre ellos. La velocidad de degradación del propionato es muy baja y una acumulación de este tipo de ácido significará una menor producción de metano. La respuestas de las formas iso del butirato y el valerato son también, según (Ahring, 1995), indicadores de un desbalance en el sistema. La alta capacidad buffer aportada por los residuos suministrados salvan al biodigestor de una acidificación, pero debe existir un efecto directo en el rendimiento de biogás no monitoreado por la falta de equipamiento en la planta.

El pH medido en los diferentes puntos está en el rango recomendado, 6,76-7.14, y no constituye un parámetro de control que indique el estado del proceso cuando los sustratos tratados son residuos porcinos, debido esto a su alta capacidad buffer, referida en la Tabla 3.1 como TAC, con un valor promedio de 7667.86 mg CaCO<sub>3</sub> /L. A la salida de las lagunas se alcanza un valor por encima de 8 por la conversión del nitrógeno orgánico a amoniacal lograda durante el proceso de degradación.

El contenido de Nitrógeno amoniacal fue bajo, menor 1 g/L, para este tipo de residuo lo cual resultó lógico a partir del grado de dilución aplicado.

En el estudio realizado se muestreó la calidad del biogás producido en la planta. Se obtuvo un 48 % CH<sub>4</sub> y 39 % CO<sub>2</sub>. Este valor está en función de la

alimentación y la operación del proceso. Se han reportado valores dentro del rango 50-65 % CH<sub>4</sub>, en relación con el TRH (Sánchez P. *et al*, 1992).

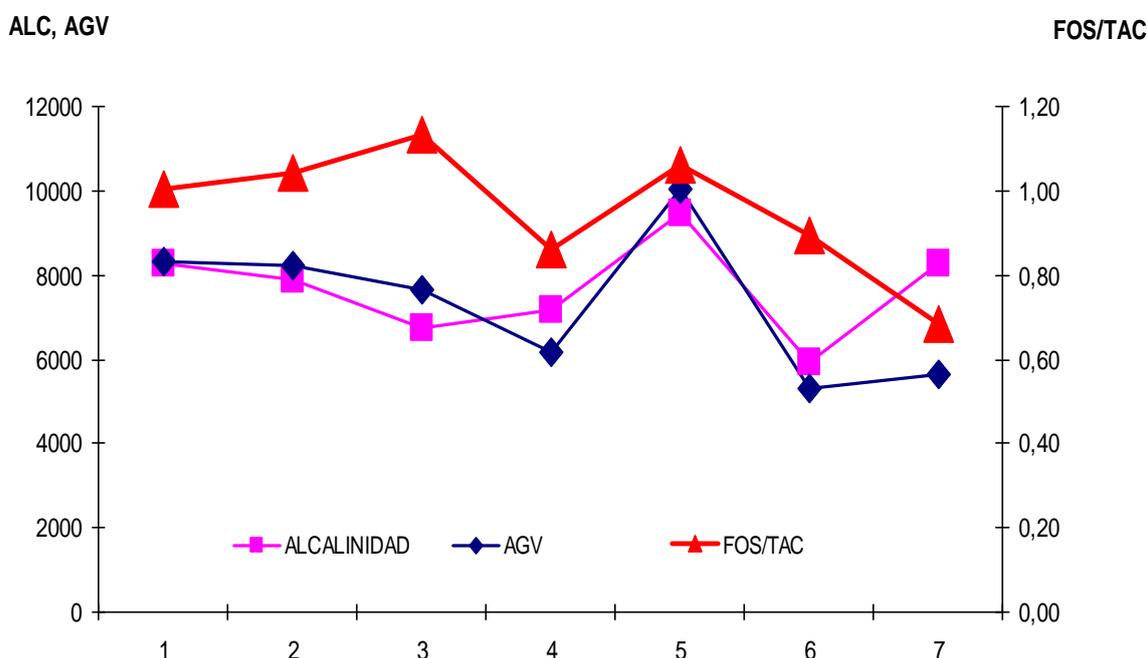


Figura 3.6: Comportamiento de la alcalinidad, AGV y el FOS/TAC. Fuente: Elaboración propia mediante Microsoft Excel.

También una cantidad apreciable de sólidos no degradados, principalmente material lignocelulósico, atraviesan el reactor y son incorporados con el efluente de la planta, por un tubo a la salida del reactor, en el separador sólido líquido. Se observó como durante el proceso de separación S/L aún se continuaba la producción de biogás.

La eficiencia de remoción del sistema entrada-biodigestor-salida, y del sistema entrada-biodigestor-salida 3ra laguna es de 28,4% en la primera y de 94,2 % la segunda. Estos valores obtenidos demuestran la ineficiencia de operación del digestor y de la eficiencia del sistema en sentido general como sistema de tratamiento, también se puede apreciar debido al lavado de la biomasa y a la incorporación del material no biodegradable que sale del digestor a las lagunas.

Remoción entrada-biodigestor-salida

$$R = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i}$$

$$R = 5193 \text{ mg/L} - 3720 \text{ mg/L} / 5193 \text{ mg/L}$$

$$R = 28,4 \%$$

Remoción entrada-biodigestor-salida 3ra laguna

$$R = DQO_I - DQO_F / DQO_I$$

$$R = 5193 \text{ mg/L} - 302 \text{ mg/L} / 5193 \text{ mg/L}$$

$$R = 94,2 \%$$

La literatura reporta valores óptimos que se necesitan alcanzar en los parámetros de operación y control de un proceso de digestión anaerobia en función de la tecnología, el tipo de sustrato y los objetivos finales que se requieren.

La eficiencia y estabilidad en la planta estará en función de la cercanía a estos valores, de ahí la importancia de un monitoreo sistemático.

A continuación, en la tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas a escala laboratorio con el purín de cerdo del Genético Porcino de Cienfuegos. Demostrando la relación purín de cerdo / agua optima.

Estimación del flujo de agua consumida, residuales generados y su potencial de biogás, de acuerdo a la metodología. Se obtuvo un 90.7 % de aguas residuales proveniente del porcino, lo cual está dado por la cantidad de animales y el elevado gasto de agua para su limpieza.

A pesar del alto contenido en materia orgánica de los residuos ganaderos los índices de producción de metano son relativamente bajos indicando la baja biodegradabilidad de los mismos.

Tabla 3.5. Caracterización a nivel de laboratorio del residual luego de sometido el residual a un proceso de digestión anaerobia en minidigestores anaerobios.

No.	Muestra:	Temp (°C)	pH	SS (ml/L)	SF (ml/L)	DQO (mg/l)	% de Rem
1	Purín de Cerdo crudo	28	6.30	700	5	1242.85	18.0
2	Mezcla cerdo/agua 1:1	28	6.54	700	5	777.77	70.4
3	Mezcla cerdo/agua 1:2	28	6.76	700	5	450	82.9
4	Mezcla cerdo/agua 1:3	28	6.73	700	5	486	73.6

Durante el proceso de digestión anaerobia en Reactores experimentales del Residual Porcino, se monitoreo de forma sistemática la producción de biogás y el aumento de presión en el interior de los reactores, para las distintas variantes de aplicación, por un período de aproximadamente un mes, con el propósito de determinar en cuales de los casos se obtenían mayores rendimientos en la producción de gas, el tiempo en el cual se obtenían estos valores y los mejores niveles de remoción de la Carga Orgánica.

Se obtiene que la variante de tratamiento No.1 alcanzó el potencial máximo de producción de biogás entre los 12 y 16 días de tratamiento, es decir antes de las restantes variantes, pero al mismo tiempo se observa una caída brusca en la producción en el día 20 de tratamiento, lo cual pudiera indicar una inhibición del proceso, motivado por la detención del régimen metanogénico y el consumo brusco de la materia orgánica; en cambio la variante No.2 de tratamiento (Residual Dilución 1:1) alcanza su nivel optimo de producción de biogás a partir del día 25, observándose una tendencia a la producción más estable y una

mayor concordancia con el tiempo de retención hidráulica (TRH) estimado para reactores de primera generación, en el caso de la reducción de la carga orgánica se pudo observar una remoción del 70%, por encima de la variante de tratamiento No. 1 en un 18 %. La variante de tratamiento No.3 (Dilución 1:2) tuvo un comportamiento similar a la No. 2 en cuanto a su potencial de producción de biogás, no así en la remoción de la carga orgánica, la cual fue de 82,9%, dado fundamentalmente por un comienzo del experimento con una menor carga orgánica debido a la dilución empleada. La variante de tratamiento No.4 (Dilución 1:3) tuvo un comportamiento similar a la No. 3 en cuanto a su potencial de producción de biogás, no así en la remoción de la carga orgánica, la cual fue de 73.6 %.

El comportamiento del pH y la temperatura durante el proceso se comporto de manera normal, observándose una reducción del pH mayor a nivel de laboratorio que el expresado en el proceso real, dado en lo fundamental por la reducción del volumen de operación en los mini digestores y la posible influencia del CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S, no obstante los pH observados experimentan un decrecimiento, en concordancia con lo que ocurre en el proceso a nivel de planta.

### **3.4 Principales dificultades y acciones a realizar para obtener mejoras en el proceso de producción de biogás.**

A partir del trabajo con expertos y observación directa y análisis de laboratorio se determinaron las principales causas que inciden en la afectación de la estabilidad y eficiencia de la planta.

#### **3.4.1 Causas que inciden en la afectación de la estabilidad y eficiencia de la planta.**

1. Se identificó las principales dificultades tanto constructivas como de explotación que presenta el digestor:

##### **Constructivas:**

- No se realizó estudios de los suelos.
- No se hizo el estudio de factibilidad económico.
- La construcción de la planta de biogás está a 300 m de donde se utiliza el biogás.
- Presenta salideros de biogás por la cúpula del digestor.
- Tuberías en mal estado corrosivas.

##### **Explotación:**

- No se ha capacitado a ningún operador.
- Afectación de la calidad de los sustratos alimentados contaminados con alimentos.
- Exceso de agua para diluir el purín de cerdo. Lavado de bacterias.
- Demasiada carga y poco tiempo de retención. Alto valor de DQO salida digestor.
- Ineficiente remoción de la masa fermentativa 28,4 %. DBO<sub>5</sub> alto a la salida digestor.

- Producción de metano 48 %.

### **3.4.2 Plan de medidas para mejorar eficiencia del reactor.**

1. Realizar una reparación general a la planta incluyendo abrir y reparar el digestor, realizando la limpieza del lodo y reparando los salideros.
2. Sustituir las tuberías en mal estado técnico.
3. Hacer un cronograma de mantenimiento y reparación de la planta:  
Mantenimiento cada 6 meses.  
Reparación cada 2 años.
4. Capacitar dos técnicos para la operación correcta de la planta.
5. Utilizar en la limpieza de los corrales la norma de agua establecida para estos tipos de animales que es de 60 Litros.
6. Realizar la carga correspondiente a este tipo de reactor que es de 1,0 m<sup>3</sup> de mezcla purín de cerdo – agua.
7. Realizar periódicamente los análisis de laboratorio para ajustar la explotación de la planta.
8. Continuar utilizando el biol a la salida de la 3ra. Laguna para su uso como abono orgánico.

## Conclusiones

1. En la bibliografía científica consultada se encontraron los parámetros de control y operación del proceso de producción de biogás y las referencias sobre evaluaciones de la eficiencia y estabilidad en las plantas.
2. Se determinó que los problemas que afectan la estabilidad y eficiencia de la planta están relacionados sobre todo con su explotación. Entre ellos podemos destacar: la elevada dilución en la limpieza de las naves al sobrecargar la mezcla, así como la falta de control y monitoreo de la planta; incidiendo también las dificultades de tipo constructivas donde existe una gran distancia entre la zona donde se produce biogás y donde se consume.
3. No es aprovechable los residuales de salida de la planta de biogás como biofertilizante, sino que se está utilizando los residuales de salida de la tercera laguna de oxidación como biofertilizante.
4. Esta planta de biogás tiene aproximadamente 4 años de explotación y no ha tenido ningún tipo de mantenimiento ni reparación, a pesar de tener salidero de biogás por la cúpula.
5. En el proceso productivo de la planta se puede apreciar una sobrecarga del digestor con elevando por ciento de contenido en agua, esto influye en la eficiencia de la producción de biogás, ya que el proceso anaerobio

se ve afectado por el lavado de bacterias. Por otra parte, encarece el proceso por el gasto excesivo de agua.

## **Recomendaciones**

1. Parar la planta y realizarle una reparación general incluyendo el digestor.
2. Realizar cada 6 meses un mantenimiento ligero a la planta y cada 2 años reparación general que incluya la limpieza del digestor.
3. Capacitar a los operadores de la planta a fin de que se explote el sistema de manera eficiente.
4. Realizar análisis de laboratorio y monitoreo al proceso de producción de biogás.



## **Bibliografía**

- Ahring B, & Angelidaki I. (1997). Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure household waste or sewage sludge. *Biodegradation* 4.
- Ahring, B.K., García, H., Mathrani, I.& Angelidaki, I. (1996). Codigestion of manure with organic toxic waste in biogas reactors.en: management of urban biodegradable waste.
- Ahring, B.K., García, H., Mathrani, I. & Angelidaki, I. (1992). Examined the effects of glucose self-monitoring for insulin-dependent diabetics in an RCT. Patients in both the control and experimental groups took five daily blood glucose measurements for a period of 12 weeks.
- Angelidaki, I. & Ahring, B. K. (1992). Effects of Free Long Fatty Acids on Thermophilic Anaerobic Digestion». *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Angelidaki, I., & Ahring, B.K. (1997a). Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge.
- Banks, C.J., & Humphreys, P.N. (1998). The anaerobic treatment of a lignocellulosic substrate offering little natural ph buffering capacity. *Water science and technology*. (Vol. 38).
- Bardiya et al. (1996). The biomethanation of banana peel and pine apple processing waste suggested their potential and suitability for economically viable waste treatment by technologically anaerobic digester.
- Brinkman, J. (1999). Anaerobic digestion of mixed waste slurries from kitchens, slaughterhouses and meat processing industries. *Proceedings of the ii international symposium on anaerobic digestion of solid waste*.
- Cullimore, D., Maule, R. & Mansuy, N. (1985). Ambient temperature methanogenesis from pig manure wastes lagoons: thermal gradient incubator studies. *Agricultural waste*, (Vol. 12).
- Dar, G. H. & S. M. Tandon. (1987). Biogas Production from Pretreated Wheat Straw, Lantan Residue, Apple and Peach Leaf Litter with Cattle Dung», *Biological Wastes* 21.

- De Baere L. A., Devocht M., Van Assche P. & Verstraete W. (1984). Influence of high NaCl and NH<sub>4</sub>Cl salt levels on methanogenic associations. *Wat. Res.* (Vol. 18).
- Desai, M. & Madamwar, D. (1994). Anaerobic Digestion of a Mixture of Cheese Whey, Poultry Waste and Cattle Dung: A Study of the Use of Adsorbents to Improve Digester Performance», *Environmental Pollution* 86.
- Desai, M.; Patel, V. & Madamwar, D. (1994). «Effect of Temperature and Retention Time on Biomethanation of Cheese Whey-Poultry Waste-Cattle Dung». *Environmental Pollution* 83.
- Di Palma L., Medici F., Merli C., Petrucci E. (n.d.). Optimizing gas production in the anaerobic co-digestion of the organic fraction of market solid waste from markets. In: Mata-Alvarez J., Tilche A., Cecchi F. (Eds.), *Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes, Barcelona (Grafiques 92., Vol. 1)*.
- Flotats, X., Bonmatí, A., Campos, E. & Antúnez, M. (1999a). Ensayos en discontinuo de codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. *Información tecnológica*.
- Flotats, X., Bonmatí, A., Campos, E. & Antúnez, M. (1999b). Ensayos en discontinuo de co-digestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. *Información tecnológica*.
- Flotats, X.; A. Bonmatí, E. Campos & M. Antúnez. (1999). «Ensayos en discontinuo de codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales» (*Información tecnológica* 10., Vol. 1).
- Galbraith, H.; T. B. Miller, A. M. Paton & J. K. Thompson. (n.d.). «Antibacterial Activity of Long Chain Fatty Acids and the Reversal with Calcium, Magnesium, Ergocalciferol y Colesterol». *Journal of applied Bacteriology* 34.
- Gavala, H. N.; I. V. Skiadas, N. A. Bozinis & G. Lyberatos. (1996). «Anaerobic Codigestion of Agricultural Industries' Wastewaters». (*Water Science and Technology* 34.).
- Gunnerson, C.G. & Stuckey D.C. (1986). *Anaerobic Digestion-Principes and Practices for Biogás Systems*. Washintong D.C.: The world Bank Technical Paper #49.

- Guzmán China, J. M. (2013d). Digestión Anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos. España: Editorial Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2013c). Evaluación económica de la energía renovable. España: Editorial Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2013b). Optimización de la digestión anaerobia. España: Editorial Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2013a). Valoración de la eficiencia de plantas de biogás a pequeña escala. España: Editorial Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2013). Optimización de la digestión anaerobia en reactores. Editorial Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2015). Optimización de la digestión anaerobia en reactores. España: Editorial Académica Española.
- Hamzawi N., Kennedy K.J. & McLean D.D. (1998). Anaerobic digestion of co-mingled municipal solid waste and sewage sludge. *Water Science and Technology*. 38.
- Hanaki, K.; Matsuo, T. & Nagase, M. (1981). «Mechanism of Inhibition Caused by Long-Chain Fatty Acids in Anaerobic Digestion Process». *Biotechnology and Bioengineering* 23.
- Hwu, C. S.; Donlon, B. & Lettinga, G. (1997). «Acute Toxicity of Oleate to Acetate-Utilizing Methanogens in Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Sludges», *Enzyme and Microbial Technology* 21.
- Koster, I. & Cramer, A. (1987). «Inhibition of Methanogenesis from Acetate in Granular Sludge by Long Chain Fatty Acids». *Applied and Environmental Microbiology* 53.
- León D.J.S. (1995). Impacto ecológico de la producción animal intensiva. El caso de la porcicultura. En: *La producción porcícola en México: Contribución al desarrollo de una visión integral*. (Editor: Luis Kato Maldonado.). Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Loher, R.C. (1974). *Agriculture. Waste management*, Academic Press Inc. London and New York.
- López Mendosa, C. & López Solís, O. (2009). Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestores anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la faculta de ciencias químicas de la universidad veracruzana. Mexico.

- Mandujano Sánchez P. (2001). Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración. España.
- Manual de laboratorio de Recursos Hidráulicos Cienfuegos. (n.d.).
- Marchaim, U. (1992). Biogas Processes for Sustainable Development. FAO Agricultural Services Bulletin 95. Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Masciandaro, G.; Ceccanti, B. & García, C. (1994). «Anaerobic Digestion of Straw and Piggery Wastewaters: II. Optimization of the Process». *Agrochimica* 38.
- Montalvo, S.J. & Guerrero, L. (2003). Tratamiento Anaerobio de Residuales. Valparaíso, Chile.: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Paris, J. M., Vicent, T., Balague, M.D. & Cassu, C. (1988). In: Tilche, A. AndRocci, A. (Eds.), Posters from 5th Intl. Symp. On Anaerobic Digestion, Bologna.
- Rodriguez, L. (1996). Participatory rural development: Experiences in Binhdien and Xuanloc villages in Vietnam. Proc. Development Workers' Course: Integrated Farming in Human Developmen, Tuncel Landboskole, Greve, In press.
- Sánchez P. (2006). La biomasa y la energía. Mexico.
- Trujillo, D.; Pérez, J. F. & Cebreros, F. J. (2006). «Energy Recovery from Wastes. Anaerobic Digestion of Tomato Plant Mixed with Rabbit Wastes», *Bioresource Technology* 45.
- Villalobos, C. (2009). Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas mezcaldas mediante digestión anaerobia.
- Wellinger, A., Sutter, K. & Egger, K., (1998). In: Hall, E.R. and Hobson, P.N. (eds), Proc. %th Intl. Symp. On Anaerobic Digestion, Bologna.
- Wong, M. H. (1990). «Anaerobic Digestion of Pig Manure Mixed with Sewage Sludge», *Biological Wastes* 31.
- Zennaki, B.Z., Zaid, A. & Bentaya, K. (1998). Anaerobic digestion of cattle manure mixed with the aquatic used Pistia stratiotes. *Cahiers (Cahiers Agric.7.)*.

# Anexos

Anexo A: Tabla 1: Ventajas del proceso de digestión anaerobia.

FACTOR	VENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA
Variabilidad en la composición	Homogeneización de la composición, más intensa cuanto mayor es el tiempo de retención.
Malos olores y compuestos orgánicos volátiles	Eliminación de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros compuestos fácilmente degradables. La materia orgánica resultante es lentamente o difícilmente degradable; los purines digeridos no presentan olor desagradable y son un producto más estable. En procesos térmicos posteriores se evitan problemas por volatilización de compuestos orgánicos. La reducción o eliminación de AGV disminuye la fitotoxicidad a los cultivos por estos compuestos.
Reducción de materia orgánica y total. Mineralización	Reducción de sólidos totales y volátiles. Reducción de materia orgánica degradable y mantenimiento de las concentraciones de nutrientes. Transformación de nitrógeno orgánico a amoniacal. En caso de separar la fase acuosa, el producto resultante presentará menor volumen, manteniendo la misma riqueza fertilizante
Distribución de partículas y de fracción soluble	Homogeneización en la distribución de partículas, lo cual favorece el diseño y aplicación de procesos posteriores de secado. Hidrólisis de partículas de pequeño tamaño y coloidales, y reducción de orgánicos solubles, con lo cual se facilita la separación entre fases solubles y en suspensión.
Consistencia	Consistencia pastosa de la fracción sólida de los purines digeridos, lo cual favorece su manipulación y peletización
Alcalinidad	Disminución muy significativa de la relación de alcalinidad. Aporte de alcalinidad para favorecer un proceso posterior de nitrificación, total o parcial. A su vez, y debido a la reducción de materia orgánica, el consumo energético en este proceso será inferior al de la nitrificación de la fracción líquida de purines frescos.
Balace energético	Balace energético positivo y proceso productor neto de energía renovable. Contribuye a disminuir las necesidades externas de energía para procesos térmicos posteriores. Permite el tratamiento de mezclas con otros residuos para optimizar la producción energética (codigestión), y facilitar la gestión integral de residuos orgánicos en la zona de aplicación del plan (cogestión).
Emisiones de gases de efecto invernadero	El proceso contribuye a la disminución en la generación de gases de efecto invernadero, si el metano producido sustituye una fuente no renovable de energía.

**Anexo B: Tabla 2: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado.**

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm (terpenos, esterés,...)

**Anexo C: Encuesta para determinar el Coeficiente de Competencia del Experto.**

Nombres y Apellidos:

Grado científico/Académico:

Título universitario:

Cargo que ocupa:

Años de experiencia como docentes/trabajador:

Usted ha sido seleccionado para participar como posible experto en la investigación, atendiendo a su experiencia, conocimientos en el tema, competencia y capacidad de análisis respecto a temas relacionados al diagnóstico del proceso productivo de la Plantas de biogás.

Antes de realizarle la consulta correspondiente, como parte del método empírico de investigación "Consulta de Expertos", es necesario determinar su coeficiente de competencia en el tema, a los efectos de reforzar la validez del resultado de la misma. Por esta razón, le pedimos que responda las siguientes preguntas de la forma más objetiva posible.

Marque con una cruz (X), en la tabla que se muestra a continuación, el valor que se corresponda con el grado de conocimientos que usted posee sobre el tema: diagnóstico del proceso productivo de la Plantas de biogás.

Considere que la escala que le presentamos es ascendente, es decir, el conocimiento sobre el tema referido va creciendo desde el 0 hasta el 10. Para ello se confeccionó la siguiente tabla:

Tabla 3. Conocimiento sobre el tema.

<b>Grado de conocimiento que tiene sobre:</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Producción Porcina											
Sistema de Tratamiento de Residuales											
Riesgos asociados al Tratamiento de Residuales Porcinos											
Gestión Ambiental											
Contaminación Ambiental											

Realice una autoevaluación del grado de influencia, según la tabla que se presenta a continuación, de sus niveles de argumentación o fundamentación de las diferentes fuentes que ha tenido en su conocimiento y criterios sobre el tema: diagnóstico del proceso productivo de la Plantas de biogás

Para ello marque con una cruz (X), según corresponde en Alto (A), Medio (M), Bajo (B), las fuentes que considere han influido más en el nivel de conocimiento que posee sobre el tema:

Tabla 4. Nivel de la fuente de su conocimiento.

Fuentes de Argumentación	Grados de influencia de cada una de las fuentes en su conocimiento y criterios		
	Alta	Media	Baja
Análisis teórico por usted realizado			
Experiencia adquirida			
Trabajos de autores nacionales que conoce			
Trabajos de autores internacionales que conoce			
Conocimiento propio sobre el estado del tema			
Intuición			

Muchas Gracias

#### **Anexo D: Encuesta de la primera ronda.**

##### **ENCUESTA**

La siguiente encuesta fue diseñada a fin de aplicar el Método Delphi (método de expertos) con el objetivo de identificar las principales variables de riesgos asociadas al proyecto “Diagnostico del proceso productivo de la planta de biogás en la empresa Genética Porcina de Cienfuegos”, con el propósito de evaluar y analizar la incidencia de los mismos en la actividad porcina.

Usted forma parte de los expertos seleccionados, contamos con sus certeros criterios y su colaboración. A continuación listamos un grupo de posibles riesgos a evaluar por usted, donde la escala a considerar es ascendente, es decir, la incidencia de estos riesgos en la actividad va creciendo desde 1 hasta 5, donde: 1- Incidencia baja, 2- Incidencia medianamente baja, 3- Incidencia media, 4- Incidencia medianamente alta, y 5- Incidencia alta.

Por favor marque con una cruz (X) en la tabla que a continuación le presentamos. Además ordene según su criterio los riesgos seleccionados por usted de mayor a menor incidencia.

Tabla 5. Riesgos a evaluar.

Ordenar	Riesgos asociados al proyecto	1	2	3	4	5
	Aumento de la masa porcina					
	Violación del proyecto diseñado					
	Violación de la licencia ambiental otorgada					
	Inadecuado e insuficiente sistema de tratamiento de residuales					
	Cierre temporal o permanente de la unidad porcina por un mal funcionamiento del sistema de tratamiento de residuales.					
	Contaminación del manto freático por impermeabilización incorrecta de las lagunas de oxidación.					
	Saturación actual de los cuerpos receptores					
	Incumplimiento de la norma cubana de vertimiento de aguas residuales					
	Emisión de gases contaminantes a la atmósfera (metano y CO <sub>2</sub> )					
	Sobrecarga de purín al digestor con exceso de agua por una mala explotación del sistema					
	Ausencia de personal calificado para la construcción de los digestores					
	Fuga de gas en los digestores					
	Explosión de la cúpula fija					
	No aprovechamiento de los resultados del sistema de residuales (agua, materia orgánica y biogás) generada en el proceso.					
	Carencia de equipos para realizar la limpieza y mantenimiento del sistema					

Por favor, sienta la libertad de presentar cualquier idea o sugerencia sobre los riesgos tratados en el cuestionario, o sugerir cualquier otro que no haya sido incluido en el espacio que aparece a continuación.

**Gracias por su cooperación en contestar esta encuesta.**

## Anexo E: Procesamiento de la primera Ronda

Tabla 6. Prueba W de Kendall. Ronda 1

Rangos	Rango promedio
1.1	6,73
1.2	1,50
1.3	5,15
1.4	1,50
1.5	12,85
1.6	10,58
1.7	9,73
1.8	6,77
1.9	10,81
1.10	13,65
1.11	6,88
1.12	11,73
1.13	11,54
1.14	4,69
1.15	5,88

Tabla 7. Estadísticos de contraste.

N	13
W de Kendall <sup>a</sup>	,809
Chi-cuadrado	147,255
gl	14
Sig. asintót.	,000

a. Coeficiente de concordancia de Kendall